



Уральский государственный
аграрный университет

ISSN 1997-4868 (print)
ISSN 2307-0005 (online)

АГРАРНЫЙ ВЕСТНИК УРАЛА

**AGRARIAN BULLETIN
OF THE URALS**

**T. 24, № 08
Vol. 24, No. 08**

2024

Сведения о редакционной коллегии

И. М. Донник (главный редактор), академик РАН, помощник президента Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Москва, Россия)
О. Г. Лоретц (заместитель главного редактора), ректор Уральского государственного аграрного университета (Екатеринбург, Россия)
П. Сотони (заместитель главного редактора), доктор ветеринарных наук, профессор, академик Венгерской академии наук, академик Польской медицинской академии, ректор Университета ветеринарной медицины Будапешта (Будапешт, Венгрия)

Члены редакционной коллегии

Н. В. Абрамов, Государственный аграрный университет Северного Зауралья (Тюмень, Россия)
Р. З. Аббас, Сельскохозяйственный университет (Фейсалабад, Пакистан)
В. Д. Богданов, член-корреспондент РАН, Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук (Екатеринбург, Россия)
В. Н. Большаков, академик РАН, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)
О. А. Быкова, Уральский государственный аграрный университет (Екатеринбург, Россия)
Э. Д. Джавадов, академик РАН, Санкт-Петербургская государственная академия ветеринарной медицины (Санкт-Петербург, Россия)
Л. И. Дроздова, Уральский государственный аграрный университет (Екатеринбург, Россия)
А. С. Донченко, академик РАН, Институт экспериментальной ветеринарии Сибири и Дальнего Востока (Новосибирск, Россия)
Б. С. Есенгельдин, Павлодарский педагогический университет (Павлодар, Казахстан)
Н. Н. Зезин, член-корреспондент РАН, Уральский научно-исследовательский институт сельского хозяйства (Екатеринбург, Россия)
С. Б. Исмурастов, Костанайский инженерно-экономический университет им. М. Дулатова (Костанай, Казахстан)
В. В. Калашников, академик РАН, Отделение сельскохозяйственных наук РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт коневодства (Рязань, Россия)
А. Г. Коцаев, академик РАН, Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия)
У. Р. Матякубов, Ургенчский государственный университет (Ургенч, Узбекистан)
В. С. Мымрин, ОАО «Уралплемцентр» (Екатеринбург, Россия)
М. С. Норов, Таджикский аграрный университет имени Шириншо Шотемур (Душанбе, Таджикистан)
В. С. Паштецкий, член-корреспондент РАН, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма (Симферополь, Россия)
Ю. В. Плугатарь, член-корреспондент РАН, член Совета при Президенте Российской Федерации по науке и образованию, начальник Отдела РАН по взаимодействию с научными организациями Крыма и города федерального значения Севастополя, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН (Ялта, Россия)
М. Б. Ребезов, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, (Москва, Россия)
О. А. Рущицкая, Уральский государственный аграрный университет (Екатеринбург, Россия)
А. Г. Самodelкин, Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия (Нижний Новгород, Россия)
А. А. Стекольников, академик РАН, Санкт-Петербургская государственная академия ветеринарной медицины (Санкт-Петербург, Россия)
В. Г. Тюрин, Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии (Москва, Россия)
И. Г. Ушачев, академик РАН, Всероссийский НИИ экономики сельского хозяйства (Москва, Россия)
С. В. Шабунин, академик РАН, Всероссийский научно-

Editorial board

Irina M. Donnik (Editor-in-Chief), academician of the Russian Academy of Sciences, Assistant to the President of the National Research Center “Kurchatov Institute” (Moscow, Russia)
Olga G. Lorets (Deputy Chief Editor), rector of the Ural State Agrarian University (Ekaterinburg, Russia)
Péter Sótönyi (Deputy chief editor) of doctor of veterinary sciences, professor, academician of Hungarian Academy of Sciences, academician of Polish Medical Academy, rector of University of Veterinary Medicine of Budapest (Budapest, Hungary)

Editorial Team

Nikolay V. Abramov, Northern Trans-Ural State Agricultural University (Tyumen, Russia)
Rao Zahid Abbas, University of Agriculture (Faisalabad, Pakistan)
Vladimir D. Bogdanov, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russia)
Vladimir N. Bolshakov, academician of the Russian Academy of Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)
Olga A. Bykova, Ural State Agrarian University (Ekaterinburg, Russia)
Eduard D. Dzhavadov, academician of the Russian Academy of Sciences, All-Russian Research and Technological Poultry Institute (St. Petersburg, Russia)
Lyudmila I. Drozdova, Ural State Agrarian University (Ekaterinburg, Russia)
Aleksandr S. Donchenko, academician of the Russian Academy of Sciences, Institute of Experimental Veterinary Science of Siberia and the Far East (Novosibirsk, Russia)
Bauyrzhan S. Yessengeldin, Pavlodar Pedagogical University Republic of Kazakhstan
Nikita N. Zezin, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Ural Research Institute of Agricultural (Ekaterinburg, Russia)
Sabit B. Ismuratov, Kostanay Engineering and Economics University named after M. Dulatov (Kostanay, Kazakhstan)
Valeriy V. Kalashnikov, academician of the Russian Academy of Sciences, Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences, the All-Russian Research Institute for Horsebreeding (Ryazan, Russia)
Andrey G. Koshchayev, academician of the Russian Academy of Sciences, Kuban State Agrarian University (Krasnodar, Russia)
Umidjon R. Matyakubov, Urgench State University (Urgench, Uzbekistan)
Vladimir S. Mymrin, “Uralplemsentr” (Ekaterinburg, Russia)
Mastibek S. Norov, Tajik Agrarian University named after Shirinsho Shotemur (Dushanbe, Tajikistan)
Vladimir S. Pashetskii, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Research Institute of Agriculture of Crimea (Simferopol, Russia)
Yuriy V. Plugatar, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, member of the Presidential Council for Science and Education, Head of the Department of the Russian Academy of Sciences for Cooperation with Scientific Organizations of Crimea and Sevastopol, The Nikitsky Botanical Garden – National Scientific Center of Russian Academy of Sciences (Yalta, Russia)
Maksim B. Rebezov, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Olga A. Rushchitskaya, Ural State Agrarian University (Ekaterinburg, Russia)
Aleksandr G. Samodelkin, Nizhny Novgorod State Agricultural Academy (Nizhny Novgorod, Russia)
Anatoliy A. Stekolnikov, academician of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg State Academy of Veterinary Medicine (Saint Petersburg, Russia)
Vladimir G. Tyurin, All-Russian Research Institute for Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology (Moscow, Russia)
Ivan G. Ushachev, academician of the Russian Academy of Sciences, All-Russian Research Institute of Agricultural Economics (Moscow, Russia)
Sergey V. Shabunin, academician of the Russian Academy of Sciences, All-Russian Veterinary Research Institute of Pathology, Pharmacology

Содержание

Агротехнологии

- Е. В. Жеряков, С. А. Семина* 970
Использование кремнийсодержащих удобрений как биостимуляторов при возделывании сахарной свеклы
- А. Ю. Кекало, В. В. Немченко* 981
Корневая гниль яровой пшеницы в условиях Зауралья, варианты оперативной защиты
- Т. В. Плотникова, В. А. Саломатин, Н. В. Сидорова* 994
Эффективность поверхностного компостирования табачной пыли с использованием микробных смесей
- А. Р. Пухаев, И. О. Газданова* 1007
Выявление патогенов картофеля с использованием различных методов диагностики

Биология и биотехнологии

- Н. С. Габышева* 1018
Урожайность гибридов смородины черной в Центральной Якутии
- О. В. Зинина, С. П. Меренкова, Е. А. Вишнякова, О. П. Неверова* 1026
Анализ эффективности применения биоактивного покрытия для обеспечения качества и биобезопасности мяса птицы при хранении
- Н. М. Казачкова, К. Ш. Картекенов, Г. К. Дускаев* 1037
Использование биологически активных веществ в кормлении сельскохозяйственной птицы (обзор)
- О. В. Ковалева, А. П. Дуктов, Н. М. Костомакхин* 1045
Способ улучшения зоогиgienических условий выращивания цыплят-бройлеров
- Д. Ю. Нохрин, О. В. Соколова, А. И. Белоусов, А. Г. Исаева, Е. В. Мокерова, Ю. С. Герасимова* 1056
Нелинейные главные компоненты биохимического профиля молочного скота пяти пород
- А. С. Тищенко, А. Г. Коцаев, А. В. Милованов, А. В. Елисютикова, В. И. Терехов, Т. В. Малышева* 1071
Генетический потенциал токсигенных *Escherichia coli*, выделенных от телят и поросят
- О. А. Шевкунов, О. В. Костюнина, О. А. Быкова, А. А. Зырянова* 1082
Идентификация гаплоблоков, потенциально ассоциированных с эмбриональной смертностью крупного рогатого скота черно-пестрого корня

Экономика

- А. А. Дубовицкий, Э. А. Климентова* 1093
Прогнозирование агропродовольственных экономических систем с использованием искусственных нейронных сетей
- Е. С. Куликова, О. А. Рущицкая, Т. И. Кружкова* 1106
Применение методов интернет-маркетинга для стимулирования агротуризма на сельских территориях

Contents

Agrotechnologies

- E. V. Zheryakov, S. A. Semina*
Use of silicon-containing fertilizers as biostimulants when cultivating sugar beets
- A. Yu. Kekalo, V. V. Nemchenko*
Root rot of spring wheat in the Trans-Ural region, options for operational protection
- T. V. Plotnikova, V. A. Salomatin, N. V. Sidorova*
Efficiency of surface composting of tobacco dust using microbial mixtures
- A. R. Pukhaev, I. O. Gazdanova*
Identification of potato pathogens using different diagnostic methods

Biology and biotechnologies

- N. S. Gabysheva*
Productivity of black currant hybrids in Central Yakutia
- O. V. Zinina, S. P. Merenkova, E. A. Vishnyakova, O. P. Neverova*
Analysis of the effectiveness of using a bioactive coating to ensure the quality and biosafety of poultry meat during storage
- N. M. Kazachkova, K. Sh. Kartekenov, G. K. Duskaev*
The use of biologically active substances in poultry feeding (review)
- O. V. Kovaleva, A. P. Duktov, N. M. Kostomakhin*
A way to improve the zoohygienic conditions of growing broiler chickens
- D. Yu. Nokhrin, O. V. Sokolova, A. I. Belousov, A. G. Isaeva, E. V. Mokerova, Yu. S. Gerasimova*
Nonlinear principal components of the biochemical profile of dairy cattle of five breeds
- A. S. Tishchenko, A. G. Koshchaev, A. V. Milovanov, A. V. Elisyutikova, V. I. Terekhov, T. V. Malysheva*
The genetic potential of toxigenic *Escherichia coli* isolated from calves and piglets
- O. A. Shevkunov, O. V. Kostyunina, O. A. Bykova, A. A. Zyryanova*
Identification of haploblocks potentially associated with embryonic mortality in Black-and-White cattle

Economy

- A. A. Dubovitskiy, E. A. Klimentova*
Forecasting of agri-food economic systems using artificial neural networks
- E. S. Kulikova, O. A. Rushchitskaya, T. I. Kruzhkova*
Analysis of the implementation of digital marketing in the agro-industrial complex

Использование кремнийсодержащих удобрений как биостимуляторов при возделывании сахарной свеклы

Е. В. Жеряков[✉], С. А. Семина

Пензенский государственный аграрный университет, Пенза, Россия

[✉]E-mail: zheryakov.e.v@pgau.ru

Аннотация. Цель исследований – оценка фитотоксичности современных гербицидов для растений сахарной свеклы, применяемых совместно с удобрениями, содержащими кремний. **Методы.** Исследования проводили в условиях полевого опыта, заложенного в 4-кратной повторности в 2022–2023 гг. Фотосинтетические пигменты в листьях определяли по оптической плотности в вытяжке 96-процентным этанолом. Анализировали влияние гербицидов и биостимуляторов на формирование массы растений, а также содержание хлорофилла в листьях и урожайность сахарной свеклы различных гибридов. **Результаты.** Установлено, что совместное применение кремнийсодержащих удобрений «Микровит-6 Кремний», «Келик Калий+Кремний» и гербицидов способствовало увеличению массы одного растения сахарной свеклы после трех гербицидных обработок на 13–17 % в зависимости от гибрида по сравнению с вариантом, где проводилась обработка только гербицидами, а фитотоксичность пестицидов не превысила 2,0–2,5 %. Формирование продуктивности сахарной свеклы зависело от токсикологической нагрузки на растения культуры. При совместном применении с гербицидами «Микровит-6 Кремний» и «Келик Калий+Кремний» общее содержание зеленого пигмента было на 49–74 % больше, чем в растениях, испытывавших стресс от воздействия гербицидов, а хлорофилла *a* возрастало в 3,1–4,5 раза. Наибольшей устойчивостью к ингибированию процессов фотосинтеза отличались гибриды отечественной селекции F1 Волна и F1 Скала. **Научная новизна** работы заключается в том, что впервые в условиях Среднего Поволжья на черноземе выщелоченном определены наиболее перспективные для снижения гербицидного стресса растений сахарной свеклы кремнийсодержащие удобрения, способствующие улучшению процесса фотосинтеза за счет увеличения концентрации хлорофилла, большему среднесуточному приросту биомассы и увеличению урожайности корнеплодов, а также выделены гибриды отечественной селекции, наиболее стрессоустойчивые к негативному воздействию гербицидов.

Ключевые слова: сахарная свекла, гибриды, гербициды, кремнийсодержащие удобрения, фитотоксичность, урожайность

Для цитирования: Жеряков Е. В., Семина С. А. Использование кремнийсодержащих удобрений как биостимуляторов при возделывании сахарной свеклы // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 08. С. 970–980. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-970-980>.

Дата поступления статьи: 28.01.2024, **дата рецензирования:** 26.04.2024, **дата принятия:** 22.05.2024.

Use of silicon-containing fertilizers as biostimulants when cultivating sugar beets

E. V. Zheryakov[✉], S. A. Semina
Penza State Agrarian University, Penza, Russia
[✉]E-mail: zheryakov.e.v@pgau.ru

Abstract. The current article is aimed at assessing the resistance of sugar beet plants of various hybrids to the phytotoxic effects of herbicides used both in pure form and in combination with silicon-containing ones. **Methods.** The research was carried out under the conditions of a field experiment, based on 4 repetitions in 2022–2023. Photosynthetic pigments in leaves were determined by optical density in an extract with 96 % ethanol. The influence of herbicides and biostimulants on the formation of plant mass, as well as the chlorophyll content in the leaves and the sugar beets yield of various hybrids were analyzed. **Results.** It was identified that the combined use of silicon-containing fertilizers “Mikrovit-6 Kremnyi”, “Kelik Kaliy+Kremnyi” in combination with herbicides contributed to an increase in the weight of one sugar beet plant after three herbicide treatments by 13–17 % depending on the hybrid compared to the option where only herbicides were treated, and the phytotoxicity of pesticides did not exceed 2.0–2.5 %. The sugar beet productivity depended on the toxicological load on the crop plants. In combination with the herbicides Mikrovit-6 Silicon and Kelik Potassium+Silicon, the total content of green pigment was 49–74 % higher than in plants stressed by herbicides, and chlorophyll *a* increased by 3.1–4.5 times. The domestic selection hybrids F1 Volna and F1 Skala were the most resistant to inhibition of photosynthesis processes. **The scientific novelty** of the current research lies in the fact that for the first time in the conditions of the Middle Volga region on leached chernozem, the most efficient silicon-containing fertilizers for reducing herbicidal stress of sugar beet plants have been identified. The identified results also contribute to the improvement of the photosynthesis process by increasing the concentration of chlorophyll, a greater average daily increase in biomass and an increase in the yield of sugar beet plants, as well as hybrids of domestic selection that are more stress-resistant to the negative effects of herbicides.

Keywords: sugar beet, hybrids, herbicides, silicon-containing fertilizers, phytotoxicity, productivity

For citation: Zheryakov E. V., Semina S. A. Use of silicon-containing fertilizers as biostimulants when cultivating sugar beets. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (08): 970–980. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-970-980>. (In Russ.)

Date of paper submission: 28.01.2024, **date of review:** 26.04.2024, **date of acceptance:** 22.05.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

Сахарная свекла в Российской Федерации является одной из основных экономически важных сельскохозяйственных культур. Корнеплоды сахарной свеклы богаты углеводами, они являются источником производства сахара. Несмотря на то что в настоящее время Россия занимает первое место в мире по площади посевов сахарной свеклы, доля семян отечественных гибридов данной культуры, используемых сельхозтоваропроизводителями, составляет менее 3 % [1].

Основными причинами вытеснения российских семян с рынка являются высокий биологический потенциал гибридов иностранной селекции, их более совершенная предпосевная подготовка к севу и лучшая пригодность растений к уборке зарубежными комбайнами. Однако экономический анализ и широкая производственная проверка подтвердили, что гибриды иностранной селекции дороже отечественных и уступают им по способности к хране-

нию, цитоплазматическим свойствам, устойчивости к корневым и кагатным гнилям, по фитопатологическим и технологическим показателям [2; 3]. Конкурентоспособность отечественных гибридов зависит от возможности практической реализации заложенного в них генетического потенциала. Одним из факторов повышения продуктивности свекловичных плантаций должно быть увеличение производства семян отечественных гибридов, адаптированных к почвенно-климатическим условиям российских свеклосеющих регионов, что позволит также достигнуть задачи импортозамещения.

В современной системе выращивания сахарной свеклы по интенсивной технологии важное место занимает защита посевов от сорняков с помощью гербицидов. За последние годы наметилась тенденция увеличения засоренности посевов всех культур, в том числе и сахарной свеклы, явившаяся следствием введения в севооборот залежных земель, нарушения агротехники возделывания, в первую

очередь несоблюдения севооборотов и системы обработки почвы. Произошло значительное увеличение численности многолетних и трудноистребимых однолетних сорных растений [4].

Засоренность посевов часто носит сложный характер. В агроценозе сахарной свеклы присутствуют около 60 видов сорных растений, которые относятся к различным биологическим группам: однолетние и многолетние однодольные, однолетние и многолетние двудольные. С момента появления всходов и до смыкания рядков культура слабо конкурирует с сорняками [5]. Ведущая роль в уничтожении сорняков в посевах сахарной свеклы принадлежит гербицидам, подбор которых должен осуществляться с учетом их видового состава и численности [6; 7]. При обработке гербицидами сахарной свеклы большое внимание уделяют двудольным сорнякам [8; 9]. В настоящее время нет ни одного селективного гербицида для сахарной свеклы, который мог бы надежно защитить посевы от всего спектра двудольных сорняков, поэтому для достижения желаемого результата применяют различные гербицидные смеси. Несмотря на избирательность, растения сахарной свеклы испытывают стресс от применения гербицидов, а при вынужденном повышении концентрации – угнетение [10; 11].

Последствия стресса на биохимическом и физиологическом уровнях проявляются в изменении баланса фитогормонов, а также подавлении фотосинтетических процессов, что в целом приводит к изменению физиологического состояния растений и проявлению симптомов страдания. После такой резкой внутренней перестройки растений наступает фаза адаптации, в которой организм перестраивает свой биохимизм для преодоления стрессового состояния и возвращения гомеостаза [12].

Устойчивость растений к повреждающему действию пестицидов зависит от анатомо-морфологических и физиологических особенностей вида, условий произрастания, типа почвы. Нарастание массы корнеплода зависит от функциональной активности листьев и сформированности листового аппарата. Поэтому адаптация растений сахарной свеклы к воздействию гербицидов посредством активации роста листового аппарата (количество, масса и площадь листьев) может протекать в диспропорции с нарастанием корнеплода. При уборке посевов с химической прополкой сорняков нередко отмечается недобор урожая корнеплодов у растений с хорошо сформированным листовым аппаратом вследствие незавершенной биологической спелости сахарной свеклы [13].

За последнее десятилетие значительно возросло использование различных видов биостимуляторов роста растений, которые способны улучшать рост и продуктивность растений, качество урожая, устойчивость к биотическим и абиотическим стрессам.

Многочисленные современные исследования свидетельствуют, что активные формы кремния положительно влияют на рост растений и устойчивость к стрессам различной природы.

Известно несколько кремний-опосредованных механизмов, обеспечивающих защиту растений в условиях стресса:

1) механическая защита благодаря аккумуляции кремния в эпидермальных тканях и образованию двойного кремний-эпидермального слоя, препятствующего атакам насекомых, вредителей и развитию грибковых заболеваний;

2) физиологическая защита за счет улучшения развития корневой системы и усиления фотосинтеза;

3) защита посредством химического взаимодействия между монокремниевой кислотой и токсичными соединениями в тканях растений;

4) транспорта микро- и макроэлементов [14; 15].

В связи с этим несомненный интерес представляет применение кремнийсодержащих удобрений, которые помогают индуцировать иммунитет растений и повышают способность противостоять неблагоприятным факторам внешней среды.

Цель исследований – оценка фитотоксичности современных гербицидов для растений сахарной свеклы, применяемых совместно с удобрениями, содержащими кремний.

Методология и методы исследования (Methods)

Полевые исследования проводились в 2022–2023 гг. в условиях полевого опыта в ООО «Красная горка» Колышлейского района Пензенской области на типичной почве Среднего Поволжья – черноземе выщелоченном среднесуглинистом.

Для решения поставленных задач был проведен двухфакторный полевой опыт, заложенный по схеме: фактор А – гибрид: 1 – F1 Кайман; 2 – F1 Бриз; 3 – F1 Буря; 4 – F1 Волна; 5 – F1 Скала; фактор В – кремнийсодержащее удобрение: 1 – контроль (ручная прополка + обработка водой); 2 – «Эталон» (гербициды избирательного действия; баковая смесь составлялась с учетом количества сорняков, их фазы развития, а также видового состава); 3 – «Эталон» + «Микровит-6 Кремний» (микроудобрение с содержанием микроэлементов Mn, Zn, Cu, Mo на основе ОЭДФ (оксизетилендифосфоновой кислоты) и кремния (13 %) – 1,0 л/га; 4 – «Эталон» + «Келик Калий+Кремний» (удобрение с иммунопротекторными свойствами, содержащее калий (15 %) и кремний (10 %) в хелатной форме) – 1,5 л/га; 5 – «Эталон» + «Силиплант универсальный» (микроудобрение жидкое с содержанием K₂O не менее 1,0 %; Si – не менее 7,0 %; Mg – не менее 100 мг/л, Fe – не менее 300 мг/л, Mn – не менее 150 мг/л, B – не менее 90 мг/л, Cu – не менее 70 мг/л, Zn – не менее 80 мг/л, Co – не менее 15 мг/л) – 0,4 л/га; 6 – «Эталон» + «НаноКремний» (удобрение минераль-

ное с микроэлементами Si –17–22 %, Fe – 1–4 %, Cu – 0,05–0,1 %, Zn – 0,05–0,1 %). При проведении исследований общая площадь делянки составила 540 м², учетная – 54 м², размещение вариантов рендомизированное, повторность четырехкратная.

Агротехника в опыте принятая в хозяйстве. Сахарная свекла возделывалась в паровом звене зернопаропропашного севооборота. Предшественник – озимая пшеница. Посев проводили сеялкой Мопорил-Ассорд. Норма высева – 120 тыс. шт/га. Убирали урожай вручную. Общим фоном под культивацию вносились минеральные удобрения (N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀).

Фотосинтетические пигменты (хлорофилл *a* и *b*) в листьях определяли по оптической плотности в вытяжке 96-процентным этанолом на спектрометре СФ-46 при длине волн 649 и 665 нм [16].

Учет урожайности корнеплодов, т. е. массы всех корнеплодов на опытной делянке, очищенных от почвы и ботвы с обрезкой хвостика до толщины 10 мм, отнесенной к площади 1 га, а также определение технологических качеств корнеплодов проведено в соответствии с Послерегистрационными испытаниями сортов и гибридов сахарной свеклы в сырьевой зоне сахарного завода, Методикой полевого опыта в свекловодстве.

Результаты (Results)

Для полевой оценки фитотоксичного действия гербицидов часто используют показатель массы

100 растений либо массы одного растения вне зависимости от их возраста [19; 20].

Гербициды тормозят нарастание массы растений. Сахарная свекла испытывает стресс и после обработки останавливается в росте и развитии. В это время срабатывают механизмы адаптации к воздействию гербицидов, после чего растения возобновляют активный рост. Стрессовое состояние растений сахарной свеклы в зависимости от дозы гербицидов, условий среды, фазы развития растений длится от 6 до 14 суток. Поэтому массу растений определяли после окончания стрессового состояния растений – через 6 суток после проведения обработки.

После трех гербицидных обработок (вариант 2) масса одного растения сахарной свеклы у гибрида иностранной селекции F1 Кайман была на 1,88–13,37 % больше, чем у гибридов отечественной селекции. Среди российских наибольшая масса была у гибрида F1 Волна и составила 32,96 г.

Показатель массы растений характеризует интенсивность роста растений сахарной свеклы и отражает степень воздействия препарата на процессы роста и развития, которые в сильной степени снижают вегетативную массу. Установлено, что гербициды, применяемые для защиты сахарной свеклы, оказывали достоверное ингибирующее влияние на нарастание биомассы. Фитотоксичность гербицидов на растениях сахарной свеклы составила 13,3–17,5 % в зависимости от гибрида (таблица 1).

Таблица 1
Масса растений сахарной свеклы после трех гербицидных обработок, г/растение, среднее за 2 года

Кремнийсодержащее удобрение (фактор В)	Гибрид (фактор А)				
	F1 Кайман	F1 Бриз	F1 Буря	F1 Волна	F1 Скала
Вода	38,74	35,00	34,94	39,95	37,42
Эталон	33,59	29,89	29,10	32,96	31,51
Микровит-6 Кремний	38,99	33,84	33,72	38,65	36,24
Келик Калий+Кремний	39,15	33,97	33,83	38,67	36,38
Силиплант универсальный	40,63	35,25	35,17	39,87	37,54
НаноКремний	40,33	35,00	34,84	39,59	37,48

НСР₀₅: частных различий – 0,35 т/га, фактор А – 0,14, фактор В и взаимодействие АВ – 0,16

Table 1
Weight of sugar beet plants after three herbicide treatments, g/plant, average for 2 years

Silicon fertilizer (factor B)	Hybrid (factor A)				
	F ₁ , Kayman	F ₁ , Briz	F ₁ , Shtorm	F ₁ , Volna	F ₁ , Skala
Water	38.74	35.00	34.94	39.95	37.42
Etalon	33.59	29.89	29.10	32.96	31.51
Mikrovit-6 Kremniy	38.99	33.84	33.72	38.65	36.24
Kelik Kaliy+Kremniy	39.15	33.97	33.83	38.67	36.38
Siliplant universal'nyy	40.63	35.25	35.17	39.87	37.54
NanoKremniy	40.33	35.00	34.84	39.59	37.48

LSD₀₅: partial differences – 0.35 t/ha, factor A – 0.14, factor B and interaction AB – 0.16

При этом важно отметить, что гибрид иностранной селекции F1 Кайман быстрее возобновляет свой активный рост после негативного воздействия гербицидов, чем гибриды отечественной селекции. Среди изучаемых отечественных гибридов наибольшей гербицидной стрессоустойчивостью обладает F1 Бриз.

Стресс-фактор активирует сигнальную систему растений сахарной свеклы, инициируя дополнительный синтез стресс-белков и антиоксидантов. Одновременно с этим растение усиливает поглощение кремния извне и инициирует перераспределение уже накопленного кремния в подверженный стрессу орган, т. е. листья. Поэтому именно совместное фолиарное внесение гербицидов и кремнийсодержащих удобрений как биостимуляторов способствовало снижению фитотоксичности пестицидов. Масса одного растения сахарной свеклы на вариантах с совместным применением гербицидов и кремнийсодержащих удобрений «Микровит-6 Кремний» и «Келик Калий+Кремний» составила в среднем по опыту 36,29–36,40 г, а фитотоксичность пестицидов не превысила 2,5 %. Химическая прополка в сочетании с кремнийсодержащими удобрениями «Силиплант универсальный» и «НаноКремний» вызывала более кратковременное торможение роста с последующей активизацией накопления массы не только относительно контроля с ручной прополкой, но и варианта с «чистым» применением гербицидов.

Применение современных гербицидов с обязательным соблюдением регламента их применения способствует остановке развития, роста сорных растений и, соответственно, их гибели. Гербициды, применяемые на посевах сахарной свеклы против однолетних двудольных сорняков, содержат действующие вещества фенмедифам, десмедифам (производные бискарбамата). Десмедифам обладает характерными свойствами ингибитора фотосинтеза, например, возрастающей фитотоксичностью при высокой интенсивности света и зависимостью фитотоксичности от климатических условий.

Один из показателей интенсивности фотосинтеза – содержание хлорофилла. Интенсивность фотосинтеза возрастает с увеличением содержания хлорофилла. «Хлорофилл является важнейшим компонентом фотосинтетического аппарата листьев, является фотокатализатором, и его нехватка ограничивает скорость фотосинтеза. Его содержание обусловлено генетической природой культуры, вследствие чего может быть использовано в качестве физиологического показателя, характеризующего онтогенетические, возрастные и генетические особенности растения» [21]. Количество пигментов отражает и реакцию растительного организма на условия произрастания. С продуктивностью расте-

ний связано содержание пигментов (хлорофиллов и каротиноидов) и их состояние в листьях. Содержание пигментов, их соотношение являются важными показателями сформированности фотосинтетического аппарата.

В результате проведенных исследований было установлено, что под действием гербицидов в листьях сахарной свеклы уменьшалось общее содержание хлорофилла. Анализ показал, что через шесть суток после проведения третьей гербицидной обработки общее содержание хлорофилла в листьях на эталонном варианте уменьшилось в среднем на 0,083 абс. % по сравнению вариантом, где была проведена ручная прополка. Совместное применение с гербицидами удобрений «Микровит-6 Кремний» и «Келик Калий+Кремний» способствовало уменьшению фитотоксичного воздействия на растения сахарной свеклы. Общее содержание зеленого пигмента было на 49–74 % больше, чем в растениях сахарной свеклы, испытывавших стресс от воздействия гербицидов. При обработке гербицидами без кремнийсодержащих удобрений период адаптации к воздействию гербицидов и возобновление активного роста затягиваются. Исследования показали, что через шесть суток после проведения третьей пестицидной обработки совместное применение удобрений «Силиплант универсальный» и «НаноКремний» с гербицидами способствует более быстрому возобновлению активного роста, у испытуемых растений сахарной свеклы динамика индукции флуоресценции хлорофилла восстанавливалась до уровня контрольных растений (рис. 1).

Нарушение содержания зеленых пигментов определялось и изменениями количества хлорофилла *a*, который играет ключевую роль в процессе фотосинтеза.

Экспериментально установлено, что при добавлении кремнийсодержащих удобрений в баковую смесь с гербицидами концентрация хлорофилла *a* возрастала в 3,1–4,5 раза по сравнению с односторонним применением гербицидов (рис. 2), но эффективность их как биостимуляторов несколько отличалась: при применении препарата «Микровит-6 Кремний» содержание хлорофилла *a* в листьях составляло 1,037–1,116 % в зависимости от гибрида, «Келик Калий+Кремний» – 1,258–1,354, «Силиплант универсальный» – 1,441–1,549 %, а совместное применение гербицидов и «НаноКремния» способствовало увеличению содержания хлорофилла *a* на 1,18–1,275 абс. % по сравнению «чистым» применением гербицидов и на 0,671–0,740 абс. % содержания хлорофилла *a* в интактных листьях.

Исследования механизмов адаптации растений к экстремальным факторам среды на уровне сортовой, гибридной или видовой устойчивости не утратили своей значимости и в настоящее время.

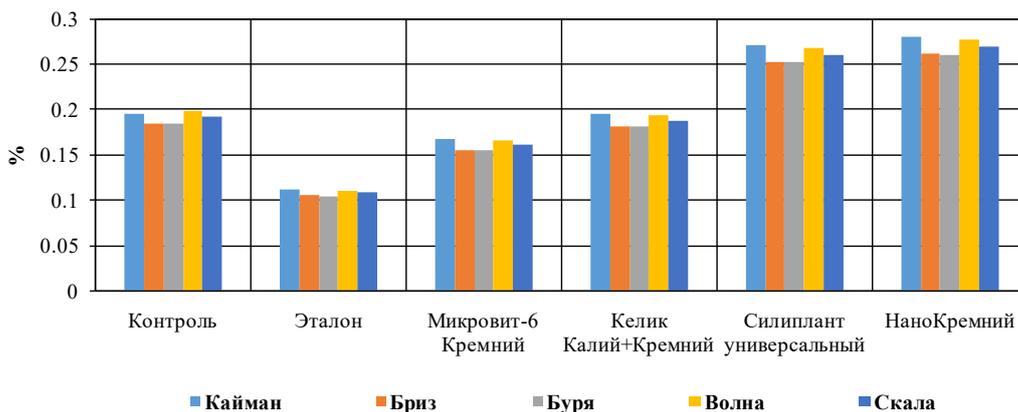


Рис. 1. Общее содержание хлорофилла после третьей обработки гербицидами, % массы листьев

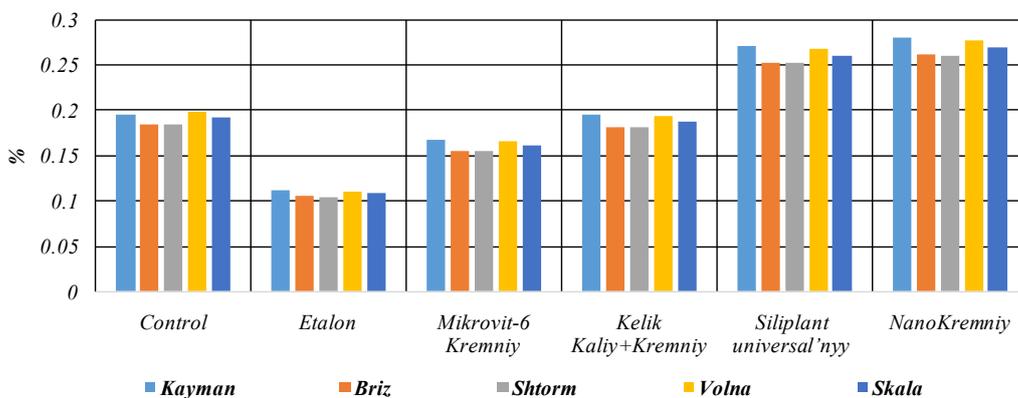


Fig. 1. Total chlorophyll content after the third treatment with herbicides, % leaf mass

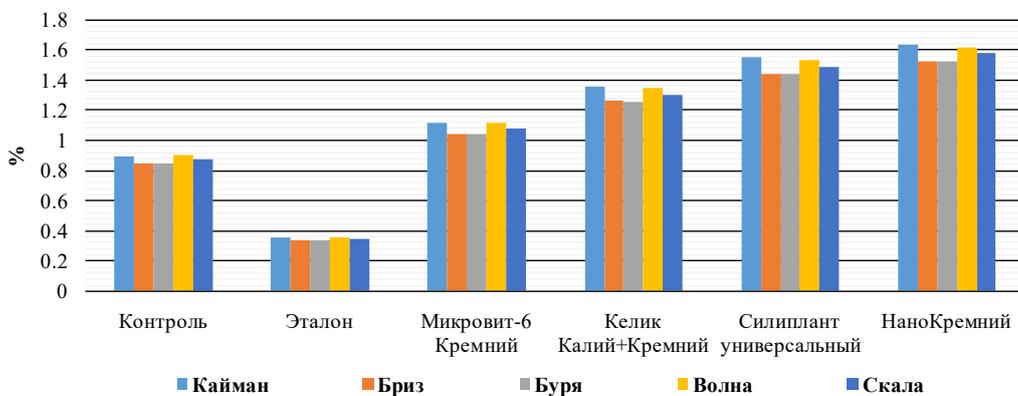


Рис. 2. Содержание хлорофилла а после третьей обработки гербицидами, % массы листьев

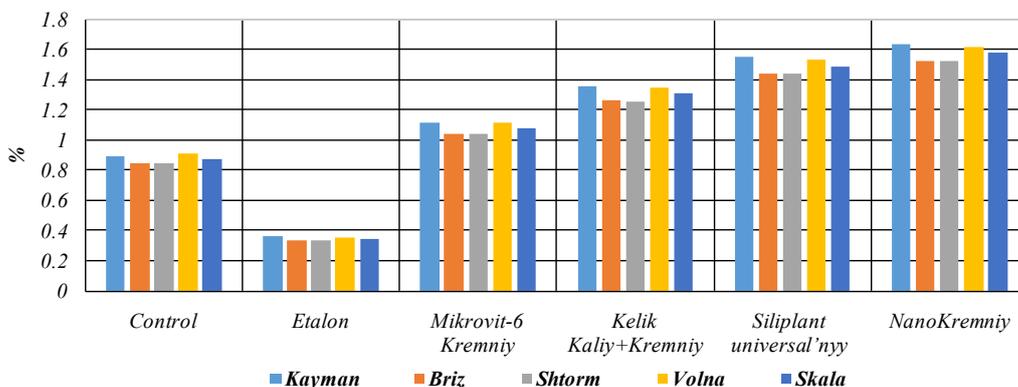


Fig. 2. Chlorophyll a content after the third treatment with herbicides, % of leaf mass

Поэтому очень важна оценка пластичности гибридов сахарной свеклы отечественной селекции. Установлено, что общее содержание хлорофилла в интервале 0,192–0,198 % было в листьях гибрида сахарной свеклы отечественной селекции F1 Волна, F1 Скала и иностранной селекции F1 Кайман. Гибриды F1 Буря и F1 Бриз характеризовались меньшим содержанием хлорофилла – 0,185 %. По данному показателю была проведена оценка устойчивости различных гибридов сахарной свеклы к негативному воздействию гербицидов на культурные растения. Наибольшей устойчивостью к ингибированию процессов фотосинтеза отличались гибриды отечественной селекции F1 Волна (0,111 %) и F1 Скала (0,109 %). У гибридов F1 Буря и F1 Бриз отмечено более низкое общее содержание хлорофилла (0,104 % и 0,106 %), т. е. период адаптации к воздействию гербицидов удлинен. Совместное применение кремнийсодержащих удобрений с гербицидами позволило растениям сахарной свеклы

всех изучаемых гибридов быстрее адаптироваться к воздействию ингибиторов фотосинтеза и возобновить активный рост. По степени устойчивости к фитотоксичности гербицидов изучаемые удобрения можно расположить в следующем порядке (по возрастанию): «Микровит-6 Кремний» → «Келик Калий+Кремний» → «Силиплант универсальный» → «НаноКремний».

Нарастание массы корнеплода зависит от функциональной активности листьев. Поэтому адаптация растений сахарной свеклы к воздействию гербицидов посредством активации роста листового аппарата может протекать в диспропорции с нарастанием корнеплода. Вследствие этого химическая обработка посевов от сорных растений нередко приводит к недополучению урожая корнеплодов у растений с хорошо сформированным листовым аппаратом (незавершенная биологическая спелость корнеплода) [13].

Таблица 2

Эффективность кремнийсодержащих удобрений при использовании в качестве антидотов совместно с гербицидами, среднее за 2022–2023 гг.

Гибрид F1 (фактор А)	Кремнийсодержащее удобрение (фактор В)	Урожайность, т/га	Различие с контролем, т/га	Антидотный эффект	
				т/га	%
Кайман	Контроль	60,12			
	Эталон	54,74	–5,38		
	Микровит-6 Кремний	61,45	1,33	6,71	12,26
	Келик Калий+Кремний	61,67	1,55	6,93	12,66
	Силиплант универсальный	63,93	3,81	9,19	16,79
	НаноКремний	63,49	3,37	8,75	15,98
Бриз	Контроль	57,14			
	Эталон	51,64	–5,50		
	Микровит-6 Кремний	57,25	0,11	5,61	10,86
	Келик Калий+Кремний	57,44	0,30	5,80	11,24
	Силиплант универсальный	59,55	2,41	7,91	15,32
	НаноКремний	59,15	2,01	7,51	14,54
Буря	Контроль	57,09			
	Эталон	50,95	–6,14		
	Микровит-6 Кремний	57,14	0,05	6,19	12,15
	Келик Калий+Кремний	57,32	0,23	6,37	12,50
	Силиплант универсальный	59,48	2,39	8,53	16,74
	НаноКремний	59,01	1,92	8,06	15,82
Волна	Контроль	61,05			
	Эталон	54,23	–6,82		
	Микровит-6 Кремний	61,18	0,13	6,95	12,82
	Келик Калий+Кремний	61,29	0,24	7,06	13,02
	Силиплант универсальный	63,34	2,29	9,11	16,79
	НаноКремний	62,90	1,85	8,67	16,00
Скала	Контроль	59,08			
	Эталон	53,02	–6,06		
	Микровит-6 Кремний	59,24	0,16	6,22	11,73
	Келик Калий+Кремний	59,44	0,36	6,42	12,11
	Силиплант универсальный	61,45	2,37	8,43	15,90
	НаноКремний	61,20	2,12	8,18	15,44
НСР ₀₅ : фактор А – 0,19 т/га, фактор В, взаимодействие АВ – 0,21, частных различий – 0,47 т/га					

Table 2

Efficiency of silicon-containing fertilizers when used as antidotes in combination with herbicides, average for 2022–2023

Hybrid F1 (factor A)	Silicon fertilizer (factor B)	Productivity, t/ha	Difference with control, t/ha	Antidote effect	
				t/ha	%
Kayman	Control	60.12			
	Etalon	54.74	-5.38		
	Mikrovit-6 Kremniy	61.45	1.33	6.71	12.26
	Kelik Kaliy+Kremniy	61.67	1.55	6.93	12.66
	Siliplant universal'nyy	63.93	3.81	9.19	16.79
	NanoKremniy	63.49	3.37	8.75	15.98
Briz	Control	57.14			
	Etalon	51.64	-5.50		
	Mikrovit-6 Kremniy	57.25	0.11	5.61	10.86
	Kelik Kaliy+Kremniy	57.44	0.30	5.80	11.24
	Siliplant universal'nyy	59.55	2.41	7.91	15.32
	NanoKremniy	59.15	2.01	7.51	14.54
Shtorm	Control	57.09			
	Etalon	50.95	-6.14		
	Mikrovit-6 Kremniy	57.14	0.05	6.19	12.15
	Kelik Kaliy+Kremniy	57.32	0.23	6.37	12.50
	Siliplant universal'nyy	59.48	2.39	8.53	16.74
	NanoKremniy	59.01	1.92	8.06	15.82
Volna	Control	61.05			
	Etalon	54.23	-6.82		
	Mikrovit-6 Kremniy	61.18	0.13	6.95	12.82
	Kelik Kaliy+Kremniy	61.29	0.24	7.06	13.02
	Siliplant universal'nyy	63.34	2.29	9.11	16.79
	NanoKremniy	62.90	1.85	8.67	16.00
Skala	Control	59.08			
	Etalon	53.02	-6.06		
	Mikrovit-6 Kremniy	59.24	0.16	6.22	11.73
	Kelik Kaliy+Kremniy	59.44	0.36	6.42	12.11
	Siliplant universal'nyy	61.45	2.37	8.43	15.90
	NanoKremniy	61.20	2.12	8.18	15.44

LSD₀₅: factor A – 0.19 t/ha, factor B, interaction AB – 0.21, partial differences – 0.47 t/ha

Увеличить продуктивность сахарной свеклы возможно и при иницировании процессов синтеза органического вещества на конкретных этапах органогенеза. При этом результаты воздействия фитоактиватора на культурное растение на поздних фазах возможно запланировать обработкой на начальных этапах их развития.

Установлено, что подавление растений сахарной свеклы гербицидами в раннем возрасте в регламентированных нормах расхода приводит к снижению урожайности корнеплодов (таблица 2).

Биологическая урожайность корнеплодов при одностороннем применении гербицидов составила 51,64–54,74 т/га в зависимости от гибридов, что на 8,95–11,17 % ниже, чем на контрольном варианте.

Совместное применение кремнийсодержащих удобрений и гербицидов способствовало увеличению урожайности по сравнению и с контрольным вариантом, и с вариантом, где применялись только

гербициды, что позволило дополнительно получить от 5,61 до 9,11 т/га корнеплодов. Наибольший антидотный эффект от применения кремнийсодержащих удобрений был получен при совместном применении гербицидов и «Силиплант универсальный» – 15,32–16,79 % в зависимости от гибрида. Лишь немного уступает ему по эффективности «НаноКремний», способствующий приросту урожайности на 7,51–8,67 т/га, или 14,54–16,00 %. Установлено, что при воздействии гербицидов достоверное снижение урожайности отмечено у всех изучаемых гибридов. Наибольшая фитотоксичность гербицидов была отмечена при возделывании гибридов отечественной селекции F1 Буря и F1 Волна, а урожайность корнеплодов была ниже на 6,14 и 6,82 т/га по сравнению с контролем. Наименьшая продолжительность депрессии от применения гербицидов была у гибридов F1 Кайман и F1 Бриз, а сбор корнеплодов составил 54,74 т/га и 51,64 т/га соответственно. При

совместной обработке посевов удобрением «Силиплант универсальный» и гербицидами наибольшая урожайность была получена у гибридов F1 Кайман и F1 Волна.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Таким образом, использование кремнийсодержащих удобрений в качестве антидотов имеет высокий агротехнологический эффект. Применение препаратов данной группы в интенсивных фитосанитарных технологиях позволит значительно снизить отрицательные последствия применения пестицидов и значительно повысить продуктивность сахарной свеклы. По степени снижения фитотоксичности гербицидов изучаемые удобрения можно расположить в следующем порядке (по возрастанию): «Микровит-6 Кремний» → «Келик Калий+Кремний» → «Силиплант универсаль-

ный» → «НаноКремний». Наиболее перспективным для снижения гербицидного стресса растений сахарной свеклы является применение удобрений «Силиплант универсальный» и «НаноКремний», способствующих улучшению процесса фотосинтеза за счет увеличения концентрации светособирающего пигмента хлорофилла и, как следствие, большему среднесуточному приросту биомассы и увеличению урожайности корнеплодов. Наибольшей устойчивостью к ингибированию процессов фотосинтеза (по содержанию общего хлорофилла) отличались гибриды отечественной селекции F1 Волна (0,111 %) и F1 Скала (0,109 %). Наибольший прирост урожайности корнеплодов был получен при совместном применении гербицидов и «Силиплант универсальный» – 15,32–16,79 % в зависимости от гибрида.

Библиографический список

1. Минакова О. А., Александрова Л. В., Вилков В. М. Влияние различных уровней удобренности почв на особенности потребления NPK и урожайность гибридов сахарной свеклы отечественной и иностранной селекции в центральном черноземном регионе // *Агрохимия*. 2022. № 10. С. 38–46. DOI: 10.31857/S0002188122100064.
2. Zheryakov E. V. Influence of the field storage on the content of basic molasses in roots of various sugar beet hybrids // *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2020. Vol. 63, No. 1. Pp. 642–646.
3. Zheryakov E. V., Semina S. A., Gavryushina I. V. Duration of Storage and Quality of Sugar Beet Roots // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018. Vol. 9, No. 3. Pp. 1096–1100.
4. Жеряков Е. В., Дмитриева С. Ю., Близнов В. А. Засоренность посевов сахарной свеклы и ее влияние на урожайность корнеплодов // *Научная жизнь*. 2019. № 1. С. 15–23.
5. Дядюченко Л. В., Дмитриева И. Г. Поиск гербицидных антидотов для растений сахарной свеклы // *Агрохимия*. 2021. № 5. С. 621–627. DOI: 10.31857/S0002188121050045.
6. Четкин Ю. М. Эффективность воздействия совместного применения гербицидов и регуляторов роста на урожайность и технологические качества корнеплодов сахарной свеклы // *Сахар*. 2020. № 9. С. 40–41. DOI: 10.24411/2413-5518-2020-10904.
7. Дворянkin Е. А. Фитотоксичность различных комбинаций гербицидов для сахарной свеклы в зависимости от нормы расхода препаратов и фазовой устойчивости к ним сорняков // *Сахар*. 2023. № 5. С. 39–43. DOI: 10.24412/2413-5518-2023-5-39-43.
8. Веневцев В. З., Захарова М. Н., Рожкова Л. В. Эффективность использования гербицидов в посевах сахарной свеклы // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. № 5. С. 50–53. DOI: 10.30850/vrns/2019/5/50-53.
9. Спиридонов Ю. Я., Ларина Г. Е., Шестаков В. Г. Методическое руководство по изучению гербицидов, применяемых в растениеводстве. Москва: Печатный Город, 2009. 252 с.
10. Islamgulov D., Ismagilov R., Alimgafarov R., Bakirova A., Enikeev R. Technological qualities of sugar beetroot crops under the conditions of the middle cis-ural region // *Periódico Tchê Química*. 2020. Vol. 17, No. 36. Pp. 72–84. DOI: 10.21498/2518-1017.15.1.2019.162492.
11. Гамуев О. В., Вилков В. М. Система защиты сахарной свеклы от сорняков в севообороте // *Сахар*. 2019. № 12. С. 40–43. DOI: 10.24411/2413-5518-2019-00004.
12. Чумикина Л. В., Арапова Л. И., Колпакова В. В., Топунов А. Ф. Фитогормоны и абиотические стрессы (обзор) // *Химия растительного сырья*. 2021. № 4. С. 5–30. DOI: 10.14258/jcprm.2021049196.
13. Дворянkin Е. А. Потери урожая сахарной свеклы от фитотоксичности гербицидов. Методика исследования токсичности гербицидов // *Сахар*. 2018. № 7. С. 25–29. DOI: 10.24411/2413-5518-2018-00041.
14. Гранкина А. О., Бочарникова Е. А., Матыченков В. В. Влияние кремнийсодержащих биостимуляторов на холодостойкость пшеницы и сахарной свеклы // *Агрохимия*. 2022. № 2. С. 22–27. DOI: 10.31857/S0002188122080075.
15. Куликова А. Х., Карпов А. В., Яшин Е. А. Кремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Ульяновск: УлГАУ, 2020. 176 с.

16. Практикум по физиологии растений: учеб. пособие для агрономических специальностей / Под ред. Н. Н. Третьякова. Москва: КолосС, 2003. 288 с.
17. Послерегистрационные испытания сортов и гибридов сахарной свеклы в сырьевой зоне сахарного завода. Методические рекомендации / Под ред. А. В. Корниенко. Рамонь: [б. и.], 2010. 50 с.
18. Корниенко А. В., Нанаенко А. К. Методика полевого опыта в свекловодстве. Рамонь: [б. и.], 2004. 104 с.
19. Дворянкин Е. А. Особенности роста и развития сахарной свеклы в период обработки посевными гербицидами // Сахар. 2020. № 10. С. 32-35. – DOI: 10.24411/2413-5518-2020-00001.
20. Дворянкин Е.А. Специфические и неспецифические реакции растений на гербициды // Сахар. 2019. № 8. С. 26–29. – DOI: 10.24411/2413-5518-2019-00046.
21. Глаз Н. В., Казакова Н. И., Уфимцева Л. В. Методические подходы к выбору условий пробоотбора и оценке содержания хлорофилла в листьях растений кукурузы // Вестник КрасГАУ. 2015. № 3. С. 73–77.

Об авторах:

Евгений Викторович Жеряков, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Растениеводство и лесное хозяйство», Пензенский государственный аграрный университет, Пенза, Россия;

ORCID 0000-0003-1288-6323, AuthorID 321563. E-mail: zheryakov.e.v@pgau.ru

Светлана Александровна Семина, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры «Переработка сельскохозяйственной продукции», Пензенский государственный аграрный университет, Пенза, Россия; ORCID 0000-0002-7015-8175, AuthorID 569105. E-mail: semina.s.a@pgau.ru

References

1. Minakova O. A., Aleksandrova L. V., Vilkov V. M. Influence of different levels of soil fertilization on the characteristics of NPK consumption and the yield of sugar beet hybrids of domestic and foreign breeding in the Central Black Earth Region. *Eurasian Soil Science*. 2022; 10: 38-46. DOI: 10.31857/S0002188122100064. (In Russ.)
2. Zheryakov E. V. Influence of the field storage on the content of basic molasses in roots of various sugar beet hybrids. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2020; 63 (1): 642–646.
3. Zheryakov E. V., Semina S. A., Gavryushina I. V. Duration of Storage and Quality of Sugar Beet Roots. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 3 (9): 1096–1100.
4. Zheryakov E. V., Dmitriyeva S. Yu., Bliznov V. A. Weed infestation of sugar beet crops and its impact on the root plants yield. *Scientific Life*. 2019; 1: 15–23. (In Russ.)
5. Dyadyuchenko L. V., Dmitrieva I. G. Search for herbicide antidotes for sugar beet plants. *Eurasian Soil Science*. 2021; 5: 621–627. DOI: 10.31857/S0002188121050045. (In Russ.)
6. Chechetkin Yu. M. The effectiveness of the impact of the combined use of herbicides and growth regulators on the yield and technological qualities of sugar beet roots. *Sugar*. 2020; 9: 40–41. DOI: 10.24411/2413-5518-2020-10904. (In Russ.)
7. Dvoryankin E. A. Phytotoxicity of various combinations of herbicides for sugar beet with the application rate of the preparations and the phase of weed resistance. *Sugar*. 2023; 5: 39–43. DOI: 10.24412/2413-5518-2023-5-39-43. (In Russ.)
8. Venevtsev V. Z., Zakharova M. N., Rozhkova L. V. Effectiveness of herbicides application in sowings of sugar beet. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2019; 5: 50–53. DOI: 10.30850/vrsn/2019/5/50-53. (In Russ.)
9. Spiridonov Yu. Ya., Larina G. E., Shestakov V. G. *Methodological guidelines for the study of herbicides used in plant growing*. Moscow: Pechatnyy Gorod, 2009. 252 p. (In Russ.)
10. Islimgulov D., Ismagilov R., Alimgafarov R., Bakirova A., Enikeev R. Technological qualities of sugar beetroot crops under the conditions of the middle cis-ural region. *Periódico Tchê Química*. 2020; 36 (17): 72–84. DOI: 10.21498/2518-1017.15.1.2019.162492.
11. Gamuev O. V., Vilkov V. M. Sugar beet protecting system from weeds in crop rotation. *Sugar*. 2019; 12: 40–43. DOI: 10.24411/2413-5518-2019-00004. (In Russ.)
12. Chumikina L. V., Arabova L. I., Kolpakova V. V., Topunov A. F. Phytohormones and abiotic stresses (review). *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2021; 4: 5–30. DOI: 10.14258/jcprm.2021049196. (In Russ.)
13. Dvoryankin E. A. Yield losses from phytotoxicity of herbicides. Methods of herbicide toxicity study. *Sugar*. 2018; 7: 25–29. DOI: 10.24411/2413-5518-2018-00041. (In Russ.)
14. Grankina A. O., Bocharnikova E.A., Matychenkov V.V. Effect of Silicon-Containing Biostimulants on the Cold Resistance of Wheat and Sugar Beet. *Eurasian Soil Science*. 2022; 2: 22–27. DOI: 10.31857/S0002188122080075. (In Russ.)

15. Kulikova A. Kh., Karpov A. V., Yashin E. A. Iliceous rocks in crop fertilization system. Ul'yanovsk: UIGAU, 2020. 176 p. (In Russ.)
16. *Practical Work on Plant Physiology: textbook for agricultural students* / Under the editorship of N. N. Tret'yakov. Moscow: KolosS, 2003. 288 p. (In Russ.)
17. *Post-Registration Testing of Sugar Beet Varieties and Hybrids in the Raw Material Area of a Sugar Factory: methodological recommendations* / Under the editorship of A. V. Korniyenko. Ramon', 2010. 50 p. (In Russ.)
18. Korniyenko A. V., Nanayenko A. K. *Methodology of Field Experiment in Beet Growing*. Ramon', 2004. 104 p. (In Russ.)
19. Dvoryankin E. A. Features of growth and development of sugar beet during treatment with post-emergence herbicides. *Sugar*. 2020; 10: 32–35. DOI: 10.24411/2413-5518-2020-00001. (In Russ.)
20. Dvoryankin E. A. Specific and nonspecific reactions of plants to herbicides. *Sugar*. 2019; 8: 26–29. DOI: 10.24411/2413-5518-2019-00046. (In Russian.)
21. Glaz N. V., Kazakova N. I., Ufimtseva L. V. Methodical approaches to the choice of the sampling conditions and the assessment of the chlorophyll content in the maize plant leaves. *The Bulletin of KrasGAU*. 2015; 3: 73–77. (In Russ.)

Authors' information:

Evgeniy V. Zheryakov, candidate of agricultural sciences, associate professor of the department “Plant growing and forestry”, Penza State Agrarian University, Penza, Russia; ORCID 0000-0003-1288-6323, AuthorID 321563.
E-mail: zheryakov.e.v@pgau.ru

Svetlana A. Semina, doctor of agricultural sciences, professor of the department “Agricultural products processing”, Penza State Agrarian University, Penza, Russia; ORCID 0000-0002-7015-8175, AuthorID 569105.
E-mail: semina.s.a@pgau.ru

Корневая гниль яровой пшеницы в условиях Зауралья, варианты оперативной защиты

А. Ю. Кекало[✉], В. В. Немченко

Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

[✉]E-mail: alena.kekalo@mail.ru

Аннотация. Корневая гниль – это вредоносное и широко распространенное заболевание злаковых культур. В условиях Урала, Сибири, Северного Казахстана ее возбудителями являются различные виды грибов рода *Fusarium* и гриб *Bipolaris sorokiniana*. Цель данного исследования – сравнительное определение эффективности микробиологической, химической и комбинированной защиты семян пшеницы яровой. Полевые эксперименты проводились на опытном поле Курганского НИИСХ – филиала ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН (Курганская область РФ, южная лесостепь) в 2019, 2021, 2022 гг. Научная новизна заключается в определении конкурентоспособности различных способов защиты семян пшеницы яровой в условиях Зауралья в рамках современной технологии возделывания. Методики использованы общепринятые в РФ. Результаты. В условиях практически ежегодного проявления негативных природных явлений для роста и развития растений (засухи, заморозки, резкие перепады температурного режима, суховеи и др.) использование протравителей семян бывает дополнительным стрессом для растений, наличие эффекта укорачивания подземного междоузлия может негативно сказаться на полевой всхожести культуры. Для снижения этих рисков, а также пестицидной нагрузки рекомендуем использование комбинированного метода защиты семян. Он включает в себя применение смеси бактериального фунгицида на основе *Bacillus subtilis* с химическим протравителем в половинной норме расхода. При этом сохраняется уровень контроля фитопатогенов, отсутствует ретардантный эффект и хозяйственная эффективность не уступает уровню применения двухкомпонентного химического протравителя семян (113–114 %). Химзащита семян снижала развитие возбудителей корневой гнили на 63–72 %. Использование комбинированной защиты обеспечило хороший контроль фитопатогенов, в том числе доминирующих фузариевых грибов. Преобладающими видами из рода *Fusarium* являлись высокоопасные *F. oxysporum*, *F. graminearum*, *F. sporotrichioides*.

Ключевые слова: корневая гниль, фитопатогены, яровая пшеница, фунгициды, микробиологические препараты, биологическая эффективность

Благодарности. Исследования выполнены в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования по теме № 0532-2021-0002.

Для цитирования: Кекало А. Ю., Немченко В. В. Корневая гниль яровой пшеницы в условиях Зауралья, варианты оперативной защиты // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 08. С. 981–993. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-981-993>.

Дата поступления статьи: 12.02.2024, **дата рецензирования:** 02.05.2024, **дата принятия:** 28.05.2024.

Root rot of spring wheat in the Trans-Ural region, options for operational protection

A. Yu. Kekalo✉, V. V. Nemchenko

Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

✉E-mail: alena.kekalo@mail.ru

Агротехнологии

Abstract. Root rot is a harmful and widespread disease of cereal crops. In the conditions of the Urals, Siberia, and Northern Kazakhstan, its causative agents are various species of fungi of the genus *Fusarium* and the fungus *Bipolaris sorokiniana*. **The purpose** of this study was to comparatively determine the effectiveness of microbiological, chemical and combined protection of spring wheat seeds. Field experiments were carried out on the experimental field of the Kurgan Scientific Research Institute of Agriculture – branch of the Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Kurgan SRIA – branch of FSBSI UrFASRC, UrB of RAS) in 2019, 2021, 2022. **Scientific novelty** lies in the determining the competitiveness of various methods of protecting spring wheat seeds in the conditions of the Trans-Urals within the framework of modern cultivation technology. **The methods** used are generally accepted in the Russian Federation. **Results.** In conditions of almost annual occurrence of negative natural phenomena for the growth and development of plants (droughts, frosts, sudden changes in temperature, dry winds, etc.), the use of seed treaters can be an additional stress for plants; the presence of the effect of shortening the underground internode can negatively affect field germination culture. To reduce these risks, as well as the pesticide load, we recommend using a combined method of seed protection. It involves the use of a mixture of a bacterial fungicide based on *Bacillus subtilis* with a chemical disinfectant at half the consumption rate. At the same time, the level of control of phytopathogens is maintained, there is no retardant effect, and economic efficiency is not inferior to the level of using a two-component chemical seed protectant (113–114 %). Chemical protection of seeds reduced the development of root rot pathogens by 63–72 %. The use of combined protection provided good control of phytopathogens, including the dominant fungi *Fusarium*. The predominant species from the genus *Fusarium* were the highly dangerous *F. oxysporum*, *F. graminearum*, *F. sporotrichioides*.

Keywords: root rot, phytopathogens, spring wheat, fungicides, microbiological preparations, biological effectiveness

Acknowledgments. The research was carried out within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education on topic No. 0532-2021-0002.

For citation: Kekalo A. Yu., Nemchenko V. V. Root rot of spring wheat in the Trans-Ural region, options for operational protection. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (08): 981–993. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-981-993>. (In Russ.)

Date of paper submission: 12.02.2024, **date of review:** 02.05.2024, **date of acceptance:** 28.05.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

По площадям заражения фитопатогенами яровых зерновых культур в последнее десятилетие корневая гниль занимала второе место в Уральском ФО (105–233 тыс. га – по данным Россельхозцентра РФ), уступая только бурой ржавчине, и четвертое место в России (556–945 тыс. га) [1].

Ситуация с почвенными фитопатогенами особенно неблагоприятна в регионах, подверженных гидротермическим стрессам, которые снижают устойчивость растений к инфицированию микромицетами, угнетают супрессирующую активность почвенной микробиоты [2; 3]. По результатам наших ранее проведенных исследований потери уро-

жая пшеницы от корневой гнили в годы с острой засухой (ГТК вегетационного периода 0,32–0,34) составили 22 %, а при умеренно-засушливых и удовлетворительных условиях периода вегетации (ГТК 0,7–1,1) – 11–13 % [4].

Корневая гниль – это хроническая форма заболевания, главный «дом» возбудителей этой болезни – почва, а семена – дополнительный фактор передачи. В условиях УрФО, Сибири, Северного Казахстана распространена гельминтоспориозно-фузариозная корневая гниль, первичными возбудителями являются различные виды грибов рода *Fusarium* и гриб *Bipolaris sorokiniana* [4–7].

Поскольку факторами передачи возбудителей корневой гнили пшеницы являются не только почва, но и семена, их необходимо подвергать фитопатологической экспертизе [8].

По данным Россельхозцентра, многолетние результаты фитоэкспертизы свидетельствуют о том, что в нашей стране 98 % семян зерновых яровых культур заражены в той или иной степени грибами и бактериями (от 2171 до 2983 тыс. тонн в период с 2019 по 2022 гг.). Общий средневзвешенный процент заражения семян зерновых культур составил 32. Кариопсы злаковых культур были заражены фузариозом на 50 %, гельминтоспориозом – на 67 %, бактериозом – на 15 %, септориозом – на 13 %. Факультативными сапрофитами грибами рода *Alternaria* и плесенями заселено 89 и 64 % обследованных семян соответственно [1].

Обязательным и часто сложным объектом контроля являются грибы рода *Fusarium*. Большинство их могут существовать как сапротрофы и на живых растениях, и на их растительных остатках. Данные микромицеты играют важную роль в биоценоотическом круговороте, участвуя в процессах деградации целлюлозы, лигнина и других субстратов. Однако растительные остатки всех культур на поверхности почвы, которые восприимчивы к ним, являются одним из основных источников инфекции [9–12].

По данным ВИЗР, в Уральском регионе доминирующими видами в комплексе грибов рода *Fusarium* на зерновых злаковых культурах являются *F. sporotrichioides*, *F. avenaceum*, *F. poae* и *F. anguoides*. Они являются токсинопродуцентами (НИВ, ДАС, Т-2, МОН, ФУМ) и требуют пристального внимания и контроля. *Fusarium graminearum* и его микотоксин дезоксиниваленол (ДОН) часто встречаются в микобиоте зерна зерновых культур на территории, как Урала, так и Западной Сибири. Обнаружены также редкие на азиатской территории России виды грибов (*F. langsethiae* и *F. sibiricum*) в Курганской и Кемеровской областях [8].

Профессор Е. Ю. Торопова с соавторами указывают на то, что в семенном и продовольственном зерне яровой пшеницы в Западной Сибири выявлено высокое (близкое к 100 %) распространение грибов рода *Fusarium*. Из семян яровой пшеницы выделяли следующие виды грибов этого рода: *F. sporotrichioides*, *F. equiseti*, *F. oxysporum*, *F. culmorum*, *F. solani*, *F. heterosporum*, *F. acuminatum* и др. Около половины партий были инфицированы более критичных 10 % [11].

В составе патоконплекса корневой гнили пшеницы находится также гриб *Bipolaris sorokiniana*. Тяжелые инфекции этого патогена в корнях и стебле проростков могут привести к гибели растений. Он может вызывать также пятнистости листьев, увядание, черноту зародыша у культур. Гриб имеет очень широкий спектр хозяев, поскольку может поражать

пшеницу, ячмень, кукурузу, рис – всего более 60 видов мятликовых. Этот фитопатоген накапливает несколько токсинов, убивающих или ослабляющих клетки растений [13].

Постоянным представителем микробиоты зерновок злаковых культур являются грибы рода *Alternaria*. Отношение к ним специалистов по защите растений неоднозначное, но в целом большинство экспертов сходятся во мнении, что мониторинг заражения зерна грибами *Alternaria* всегда актуален, поскольку эти организмы способны продуцировать микотоксины, негативно влияющие на потребителей зерна. Учитывая это, следует брать во внимание данный род грибов как потенциально вредоносный [14; 15].

Практически всегда на кариопсах пшеницы присутствуют, помимо грибов, также бактерии. Они могут быть как патогенными, так и симбиотическими. Опасными для злаковых растений являются возбудители базального и черного бактериоза (*Pseudomonas syringae* pv. *atrovaciens*, *Xanthomonas campestris* pv. *translucens*) [8].

Контроль развития и распространения корневой гнили в настоящее время основан на химическом методе, в частности протравливании семенного материала фунгицидными препаратами. Перечень их, разрешенных к применению в РФ, достаточно широк. Только на основе тебуконазола (в соло-варианте и в многосоставных препаратах) более 50 торговых марок [16].

По данным Л. Д. Гришечкиной с соавторами, эффективность современных протравителей семян против корневых гнилей (как однокомпонентных препаратов, так и многосоставных) находится в пределах 50–75 %, а контроль плесневения – до 50 % [17]. В исследованиях В. В. Чекмарева с соавторами установлено, что наибольшей (91,5 %) биологической эффективностью в отношении корневых гнилей, вызываемых видами грибов *Microdochium nivale*, *Fusarium oxysporum*, *F. sambucinum*, *F. semitectum* и *F. tricinctum*, обладал препарат «Кинто дуо». Препараты «Виал ТТ», «Витарос», «Иншур Перформ», «Максим», «Максим экстрим», «Премис Двести», «Раксил» и «Систива» снижали уровень развития корневых гнилей на 72,8–83,6 %. Эффективность фунгицидов «Винцит», «Витавакс 200 ФФ», «Дивиденд стар» и «Фундазол» составила 64,1–69,4 %. Развитие корневых гнилей в контроле варьировало от 45,0 до 57,5 %. Существует необходимость дальнейшего проведения скрининга фунгицидов и их баковых композиций для выявления наиболее эффективных средств для контроля развития фузариозов зерновых культур [18].

Заразное начало часто преобладающих грибов рода *Fusarium* сохраняется в почве, на растительных остатках, семенах. Полностью устойчивых к данному заболеванию сортов пшеницы пока не

создано. Научные данные в различных регионах нашей страны свидетельствуют о том, что не все протравители семян способны полностью ингибировать развитие фузариевых грибов, вызывающих корневую гниль пшеницы [19].

Значительное применение пестицидов в современных технологиях возделывания пшеницы имеет, помимо положительных результатов, также негативные экологические последствия. Поэтому современные тенденции развития области защиты растений направлены на использование препаратов на основе живых культур микроорганизмов. Обладающие данными свойствами препараты наравне с химическими должны быть востребованы в современных технологиях интенсивного растениеводства с включением адаптивно-интегрированной системы защиты растений [20–23].

Микробиологические препараты позиционируются как относительно безопасные для окружающей среды по сравнению с продуктами химической природы, используемыми для защиты растений. Кроме того, биопрепараты, как правило, дешевле, что делает их привлекательнее для растениеводов. Однако следует учитывать, что результативность биологического метода не столь явна и стабильна, как химзащиты. Применение биосредств требует четкого соблюдения определенных условий для проявления их положительного действия и обязательно системного подхода.

Наиболее жизнеспособным вариантом защиты растений считаем комбинированное использование методов био- и химзащиты с базированием на агротехническом и иммунологическом методах системы контроля вредных организмов. Целью данного исследования являлось сравнительное определение эффективности микробиологической, химической и комбинированной защиты семян пшеницы яровой.

Методология и методы исследования (Methods)

Лабораторные исследования проводили в Курганском НИИСХ – филиале ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН. Использовали естественно зараженные семена яровой пшеницы сорта Омская 36. Варианты с фунгицидными композициями включали биофунгицид «Фитоспорин-М, Ж» 1 л/т (*Bacillus subtilis*, штамм 26Д); однокомпонентные протравители «Бункер» 0,5 л/т (тебуконазол 60 г/л), «Премис Двести» 0,2 л/т (трифлюпролахон 200 г/л), «Максим» 2 л/т (флудиоксонил 25 г/л), ТМТД 3 л/т (тирам 400 г/л), «Зим 500» 1,2 л/т (карбендазим 500 г/л); двухкомпонентные препараты «Дивиденд Экстрим» 0,8 л/т (дифеноконазол 92 г/л + мефеноксам 23 г/л), «Ламадор» 0,2 л/т (протиоконазол 250 г/л + тебуконазол 150 г/л), «Скарлет» 0,4 л/т (имазалил 100 г/л + тебуконазол 60 г/л), «Виал траст» 0,4 л/т (тиабендазол 80 г/л + тебуконазол 60 г/л), «Иншур перформ» 0,5 л/т (трифлюпролахон 80 г/л + пиракло-

стробин 40 г/л), «Оплот» 0,6 л/т (дифеноконазол 90 г/л + тебуконазол 45 г/л), а также контроль без обработки семенного материала. Семена на варианте комбинированной защиты протравливались баковой смесью препаратов «Фитоспорин-М, Ж» 1 л/т + «Бункер» 0,25 л/т.

Методики фитопатологических лабораторных и полевых исследований использованы стандартные. Фитопатологическая экспертиза семян – по ГОСТ 12044-93, методом рулонной культуры [24]. Биометрические показатели роста надземных органов и зародышевых корней определялись по методике Е. Ю. Тороповой [25]. Для проведения микологического анализа на органах яровой пшеницы образцы растений отбирали в фазе кущения и молочной спелости зерна с последующей инкубацией на среде Чапека. Идентификацию микроорганизмов проводили по культурально-морфологическим признакам. Для микроскопирования препаратов использовали оптический микроскоп «Биометод-2» (Camera Levenhuk C 310 NG).

Учеты развития корневой гнили в полевых опытах проводили летом в фазу 25 (середина кущения), пользуясь методикой В. А. Чулкиной, по 6-балльной шкале [25].

Почва опытного участка, на котором возделывали яровую пшеницу, – чернозем выщелоченный маломощный тяжелосуглинистый с $pH_{\text{вод}}$ от 5,5 до 5,7 и содержанием гумуса 4,8–5,7 %. Содержание подвижного P_2O_5 (по Чирикову) – 69–77 мг/кг почвы, обменного K_2O – 107–126 мг/кг почвы, нитратного азота $N-NO_3$ – от 13,2 до 15,9 мг/кг почвы.

Агротехника в опытах – широко используемая для возделывания яровой пшеницы в условиях южного Зауралья. Опыты закладывали на пшенице по пару в рамках трехпольного зернопарового севооборота. Повторность четырехкратная, размер опытных делянок составлял 20–22 м². Протравливание семян осуществляли из расчета 10 л рабочего раствора на тонну семян вручную. Сев яровой пшеницы проводился дисковой сеялкой ССФК-6, норма высева – 5,0 млн всхожих зерен на 1 га, способ посева рядовой, ширина междурядий – 21 см. Срок посева 22–28 мая. Уход за посевом в течение вегетации заключался в проведении химпрополки в фазу кущения культуры, фолиарной обработки фунгицидом, инсектицидом по необходимости. Убирали яровую пшеницу прямым поделяночным комбайнированием селекционным комбайном Sampo-130. Биологическую эффективность препаратов рассчитывали по формуле Аббота, хозяйственную эффективность – на основе величины сохраненного урожая в сравнении с контролем без обработки семян.

Полученные данные обрабатывались методом дисперсионного анализа по Б. А. Доспехову [26].

Влияние различных протравителей семян на состав микробиоты кариопсов пшеницы яровой, 2019, 2021, 2022 гг. (перед посевом, весна)

Вариант	Показатель	Микроорганизмы, заселяющие зерновку пшеницы							
		<i>Fusarium spp.</i>	<i>Bipolaris sorokiniana</i>	<i>Parastagonospora nodorum</i>	<i>Pseudomonas spp.</i>	<i>Penicillium spp.</i>	<i>Alternaria spp.</i>	Всего фитопатогенов	Всего прочих
Контроль без обработки семян	Процент зараженности семян	11,6	0,4	2,9	4,6	10,4	21,7	19,5	21,3
Биологический фунгицид*	Процент зараженности семян	11,3	0,0	1,3	1,3	11,7	21,7	13,9	19,5
	Биологическая эффективность, %	3	100	55	77	-13	0	29	9
1/2 нормы расхода химического препарата + биофунгицид на основе сенной палочки	Процент зараженности семян	2,0	0,0	1,0	1,8	3,9	11,6	4,8	15,5
	Биологическая эффективность, %	82	100	97	76	63	47	75	27
Однокомпонентные химические препараты**	Процент зараженности семян	3,5	0,0	0,9	3,6	6,0	5,9	7,2	12,7
	Биологическая эффективность, %	70	100	70	22	42	73	63	40
Двухкомпонентные химические препараты***	Процент зараженности семян	2,1	0,0	1,4	3,2	3,0	4,8	6,7	7,8
	Биологическая эффективность, %	82	100	52	30	71	78	66	63

Примечание. * «Фитоспорин-М, Ж» 1 л/т; ** среднее по препаратам «Бункер» 0,5 л/т, «Максим» 2 л/т; ТМТД 3 л/т, «Зим 500» 1,2 л/т; *** среднее по препаратам «Дивиденд Экстрим» 0,8 л/т, «Ламадор» 0,2 л/т, «Скарлет» 0,4 л/т, «Виал траст» 0,4 л/т, «Иншур перформ» 0,5 л/т, «Оплот» 0,6 л/т.

Table 1

The influence of various disinfectant on the composition of the microbiota of spring wheat caryops, 2019, 2021, 2022 (before sowing, spring)

Option	Index	Microorganisms colonizing wheat grains							
		<i>Fusarium spp.</i>	<i>Bipolaris sorokiniana</i>	<i>Parastagonospora nodorum</i>	<i>Pseudomonas spp.</i>	<i>Penicillium spp.</i>	<i>Alternaria spp.</i>	Total phytopathogens	All others
Control without seed treatment	Percentage of seed contamination	11.6	0.4	2.9	4.6	10.4	21.7	19.5	21.3
Biological fungicide*	Percentage of seed contamination	11.3	0.0	1.3	1.3	11.7	21.7	13.9	19.5
	Biological effectiveness, %	3	100	55	77	-13	0	29	9
1/2 the consumption rate of a chemical product + biofungicide	Percentage of seed contamination	2.0	0.0	1.0	1.8	3.9	11.6	4.8	15.5
	Biological effectiveness, %	82	100	97	76	63	47	75	27
One-component chemical disinfectant**	Percentage of seed contamination	3.5	0.0	0.9	3.6	6.0	5.9	7.2	12.7
	Biological effectiveness, %	70	100	70	22	42	73	63	40
Two-component chemical disinfectant***	Percentage of seed contamination	2.1	0.0	1.4	3.2	3.0	4.8	6.7	7.8
	Biological effectiveness, %	82	100	52	30	71	78	66	63

Note. * «Fitosporin-M, Zh» 1 l/t; ** average for the preparations «Bunker» 0.5 l/t, «Maksim» 2 l/t; TMTD 3 l/t, «Zim 500» 1.2 l/t; *** average for the disinfectant «Dividend Extrim» 0.8 l/t, «Lamador» 0.2 l/t, «Skarlet» 0.4 l/t, «Vial trast» 0.4 l/t, «Inshur perform» 0.5 l/t, «Oplot» 0.6 l/t.

Результаты (Results)

В лабораторных условиях проводилось определение эффективности химических и биологических препаратов для предпосевной обработки семян, впоследствии исследуемые объекты оценивались в полевых условиях.

В среднем за годы исследований зараженность элитных семян яровой пшеницы возбудителями корневой гнили составила 19,5 %, преобладали фузариевые грибы. Условно патогенными грибами из рода *Alternaria* было заражено 21,7 % кариопсов, плесенями – 10,4 % (таблица 1).

Химзащита семян снижала развитие фитопатогенов на 63–66 %. Условно-патогенные грибы рода *Alternaria* контролировались на 73–78 %. При использовании однокомпонентных фунгицидов был ослаблен контроль плесневых грибов (биоэффективность – 42 %), обработка семян двухкомпонентными продуктами была результативнее (71 %).

Фузариевые грибы угнетались фунгицидами химической природы на 70–82 %, также лучше при обработке препаратами на основе двух действующих веществ. Биологический фунгицид на основе сенной палочки был малоэффективен в условиях

лаборатории (29 % по группе фитопатогенов). Использование бактериального препарата совместно с половинной нормой химического протравителя обеспечило дополнительную защиту семени, в том числе от доминирующих фузариевых грибов. Он также достаточно результативно сдерживал бактериальную инфекцию (77 %), вызывающую загнивание проростков. Для химических фунгицидов бактерии не являются целевым объектом, только у некоторых из них может отмечаться бактерицидное действие (тирам, например). В нашем исследовании химические препараты в среднем не оказывали значимого влияния на данный компонент микробиоты зерна (22–30 %).

Лабораторная всхожесть семян составила на контроле 87,8 %. Увеличение показателя на 5,6 процентных пункта (п. п.) отмечалось на варианте с биозащитой и на 2,8 п. п. – при использовании смеси биологического и химического фунгицидов. Обработка однокомпонентными химическими препаратами снизила показатель на 2,7 п. п., фунгициды на основе двух действующих веществ не оказали влияния на показатель (таблица 2).

Таблица 2
Влияние изучаемых препаратов на биометрические параметры корневой системы и роста пшеницы яровой в лабораторных условиях, 2019, 2021, 2022 гг.

Вариант	Всхожесть, %	Корень		Колеоптиле		Росток	
		Количество, шт.	Длина, см	Длина, см	+/- к контролю	Длина, см	+/- к контролю
Контроль без обработки	87,8	4,7	9,8	5,2	–	10,3	–
Биофунгицид	93,4	4,8	12,2	5,7	0,5	11,9	1,6
1/2 нормы расхода химического препарата + биофунгицид	90,6	4,7	9,9	4,1	-1,0	10,4	0,1
Однокомпонентный химический фунгицид	85,1	4,7	10,3	4,4	-0,8	10,3	0,0
Двухкомпонентный химический фунгицид	88,7	4,7	9,1	3,9	-1,3	9,6	-0,7
НСР ₀₅		0,86	2,03		1,03		0,97

Table 2
The influence of the studied disinfectant on the biometric parameters of the root system and seedlings of spring wheat in laboratory conditions, 2019, 2021, 2022

Option	Seed germination, %	Root		Coleoptile		Wheat sprout	
		Quantity	Length, cm	Length, cm	+/- to control	Length, cm	+/- to control
Control without seed treatment	87.8	4.7	9.8	5.2	–	10.3	–
Biological fungicide	93.4	4.8	12.2	5.7	0.5	11.9	1.6
1/2 the consumption rate of a chemical product + biofungicide	90.6	4.7	9.9	4.1	-1.0	10.4	0.1
One-component chemical disinfectant	85.1	4.7	10.3	4.4	-0.8	10.3	0.0
Two-component chemical disinfectant	88.7	4.7	9.1	3.9	-1.3	9.6	-0.7
Smallest significant difference	–	0.86	2.03		1.03		0.97

Влияние протравителей семян на параметры корневой системы пшеницы яровой в фазу кущения, 2019, 2021, 2022 гг.

Вариант	Средняя длина корней, см	Масса корней с растения	
		Граммов	% к контролю
Контроль без обработки семян	8,1	0,18	–
Биофунгицид	7,3	0,22	22
1/2 нормы расхода химического препарата + биофунгицид	7,6	0,21	17
Однокомпонентный фунгицид	8,4	0,22	19
Двухкомпонентный фунгицид	8,5	0,22	19

Table 3

The influence of disinfectants on the parameters of the root system of spring wheat during the tillering phase, 2019, 2021, 2022

Option	Average root length, cm	Weight of roots per plant	
		Grams	% to control
Control without seed treatment	8.1	0.18	–
Biological fungicide	7.3	0.22	22
1/2 the consumption rate of a chemical product + biofungicide	7.6	0.21	17
One-component chemical disinfectant	8.4	0.22	19
Two-component chemical disinfectant	8.5	0.22	19

Определение биометрических параметров проростков пшеницы в лабораторных условиях показало, что химические препараты вызывали укорачивание coleoptile на 0,8–1,3 см, при использовании для обработки семян биологического фунгицида такого не наблюдалось (таблица 2). Прирост линейных размеров надземной и подземной частей пшеницы обеспечил только биофунгицид.

Поскольку возбудители корневой гнили – это почвенные обитатели, то важно знать фитосанитарный статус пахотного слоя на поле, где возделываются восприимчивые культуры. Для установления статуса почвы опытного участка были отобраны почвенные образцы в слое 0–10 см.

Результаты учета распространения почвенных микроорганизмов показали, что микробоценоз чернозема выщелоченного был представлен различными группами микроскопических организмов: грибы – 5,5 тыс. КОЕ/г почвы, бактерии – 2,2 млн КОЕ/г почвы. Среди грибов присутствовали представители родов *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Fusarium*, преобладали плесени. Супрессивность почвы в отношении *Bipolaris sorokiniana* составила 52 %, а фузариевых грибов – 55 %. Почву можно характеризовать, как среднесупрессивную по шкале профессора Е. Ю. Тороповой, представленную в работе Ю. Я. Спиридонова с соавторами [27].

Экологическая ниша грибов рода *Fusarium spp.* на зерновых культурах достаточно широка, затрагивает надземные, подземные, генеративные органы и почву, что дает возможность поддерживать стабильно высокую популяцию. По данным сибирских ученых, на зерновых культурах ежегодно паразитируют более 10 видов рода *Fusarium spp.*, среди которых наиболее распространены *F. equiseti*,

F. oxysporum, *F. solani*, *F. sporotrichioides* [12]. По данным специалистов ВИЗР, в Уральском регионе доминирующими видами в комплексе грибов рода *Fusarium* на зерновых злаковых культурах являются *F. sporotrichioides*, *F. poae* и *F. avenaceum* [8].

По итогам нашего исследования на яровой пшенице в фазе кущения основным видом из рода *Fusarium* был возбудитель трахеомикозного увядания культур *F. oxysporum* (98 %), встречались также *F. sporotrichioides*, *F. graminearum* (34, 40 %), *F. poae*, *F. proliferatum*, *F. heterosporum*, *F. avenaceum* (6–12 %). В фазе молочно-восковой спелости представленность видов уменьшилась, но преобладающими остались также высоко опасные *F. oxysporum*, *F. graminearum*, *F. sporotrichioides* (встречаемость 65, 34 и 7 % соответственно).

В годы исследований развитие растений в полевых условиях проходило при различных уровнях влагообеспеченности и температурных режимах, что влияло на уровень поражения корневой гнилью. В 2019 году кущение пшеницы проходило при пониженных температурах (–2,3 °С) и увлажнении ниже нормы. Развитие корневой гнили составило до 32,3 %, признаки поражения наблюдались у 96 % растений. Погодные условия вегетации 2021 года характеризовались крайне неравномерным распределением гидротермических ресурсов и в целом были малоблагоприятны для роста и развития растений. В мае и июне практически не было продуктивных осадков (ГТК 0,02 и 0,14 соответственно), что привело к угнетению растений и поражению их почвенными фитопатогенами (до 12,1 %). Погодные условия в мае 2022 года были близкими к среднегодовым значениям. Июнь отличался недобором тепла, колебаниями дневных и ноч-

ных температур воздуха и хорошим увлажнением (82,6 мм, или 169 %), поражение растений коревой гнилью не превышало 6,5 %.

Влияние протравителей семян на биометрические показатели растений пшеницы в фазу кущения представлено в таблице 3. Масса корней увеличивалась при использовании мер защиты семян на 17–22 %, результативнее на варианте с биопрепаратом. При этом средняя длина корней была меньше на вариантах с биосредствами (–0,5...–0,8 к контролю).

В развитии надземной части растений пшеницы на вариантах с обработкой семян отмечались положительные изменения в высоте растений, длине и ширине листьев, а также в увеличении массы. Защищенные растения формировали на 19–34 % большую массу, особенно выделялся вариант с биологическим фунгицидом (таблица 4).

Степень поражения пшеницы болезнью в условиях естественного инфекционного фона при посеве непротравленными семенами (контроль) составляла в среднем за годы исследований 20 %, признаки поражения наблюдались у 69 % растений (таблица 5). Распространенность корневой гнили на вариантах с мерами защиты снижалась до 30–46 %, результативнее при использовании химического метода.

Полевая всхожесть семян пшеницы яровой на контроле без обработки составила 68 %, что на 19,8 п. п. меньше, чем лабораторный показатель. Негативно сказались как малоблагоприятные ги-

дротермические условия периодов прорастания (особенно в 2019 и 2021 гг.), так и зараженность фитопатогенами. На вариантах с мерами защиты отмечено повышение показателя до 72–73 %.

Показатели контроля корневой гнили пшеницы имели отличия при использовании разных методов защиты (химического, биологического, комбинированного). Биологическая эффективность химических протравителей семян составила 60–72 %, выше при использовании поликомпонентных препаратов. На варианте биологической защиты семян снижение развития корневой гнили составило 63 %, что на уровне с однокомпонентными химическими фунгицидами и вариантом со смесью бактериального препарата и половинной нормы расхода химического протравителя (таблица 5).

Урожайность яровой пшеницы на контроле без средств защиты за годы исследований составила 18,3 ц/га. Теснота корреляционной зависимости между развитием корневой гнили и урожайностью пшеницы яровой характеризовалась по шкале Чеддока как высокая обратная ($r = -0,908$).

Обработка семенного материала фунгицидами способствовала достоверному сохранению 1,5–2,5 ц/га урожая культуры (таблица 6). По хозяйственной эффективности биофунгицид был равнозначен с однокомпонентным химическим протравителем (108–109 %), а применение комбинированного метода защиты семян – двухкомпонентному протравителю (113–114 %).

Таблица 4
Влияние протравителей семян на рост и развитие надземной части пшеницы в фазу кущения, 2019, 2021, 2022 гг.

Вариант	Высота растения, см	Средняя длина листа, см	Средняя ширина листа, см	Масса надземной части растения	
				Граммов	% к контролю
Контроль без обработки семян	35,1	18,4	0,5	1,35	–
Биофунгицид	36,3	18,7	0,6	1,80	34
1/2 нормы расхода химического препарата + биофунгицид	36,0	19,3	0,6	1,63	21
Однокомпонентный фунгицид	39,3	19,5	0,6	1,63	21
Двухкомпонентный фунгицид	37,5	19,0	0,6	1,61	19

Table 4
The influence of disinfectants on the growth and development of the aboveground part of wheat during the tillering phase, 2019, 2021, 2022

Option	Plant height, cm	Average leaf length, cm	Average sheet width, cm	Weight of the above-ground part of the plant	
				Grams	% to control
Control without seed treatment	35.1	18.4	0.5	1.35	–
Biological fungicide	36.3	18.7	0.6	1.80	34
1/2 the consumption rate of a chemical product + biofungicide	36.0	19.3	0.6	1.63	21
One-component chemical disinfectant	39.3	19.5	0.6	1.63	21
Two-component chemical disinfectant	37.5	19.0	0.6	1.61	19

Таблица 5

Влияние фунгицидных протравителей семян на полевую всхожесть и пораженность растений пшеницы яровой корневой гнилью в фазу кущения, 2019, 2021, 2022 гг.

Показатели	Вариант				
	Контроль без обработки	Биофунгицид	Биофунгицид + ½ нормы хим. препарата	Однокомпонентный фунгицид	Двухкомпонентный фунгицид
Полевая всхожесть, %	68	73	72	73	72
Развитие корневой гнили, %	20,0	7,5	7,4	8,1	5,6
Биологическая эффективность препарата, %	–	63	63	60	72
Распространенность корневой гнили, %	69	46	46	40	35

Table 5

The influence of fungicidal disinfectants on field germination and infection of wheat plants by spring root rot during the tillering phase, 2019, 2021, 2022

Indicators	Option				
	Control without seed treatment	Biological fungicide	1/2 the consumption rate of a chemical product + biofungicide	One-component chemical disinfectant	Two-component chemical disinfectant
Field germination, %	68	73	72	73	72
Development of root rot, %	20,0	7,5	7,4	8,1	5,6
Biological effectiveness, %	–	63	63	60	72
Prevalence of root rot, %	69	46	46	40	35

Таблица 6

Влияние фунгицидных различных протравителей семян на урожайность пшеницы яровой, 2019, 2021, 2022 гг.

Показатели	Вариант				
	Контроль без обработки	Биофунгицид	биофунгицид + ½ нормы химпрепарата	Однокомпонентный фунгицид	Двухкомпонентный фунгицид
Урожайность, ц/га	18,3	20,0	20,7	19,8	20,8
Прибавка урожайности к контролю, ц/га	–	1,7	2,4	1,5	2,5
Хозяйственная эффективность препарата, %	–	109	113	108	114
НСР ₀₅	1,17				

Table 6

The influence of fungicidal seed protectants on the yield of spring wheat, 2019, 2021, 2022

Indicators	Option				
	Control without seed treatment	Biological fungicide	Biofungicide + 1/2 the consumption rate of a chemical product	One-component chemical drugs	Two-component chemical drugs
Productivity, dt/ha	18.3	20,0	20,7	19,8	20,8
Yield increase, dt/ha	–	1,7	2,4	1,5	2,5
Drug effectiveness, %	–	109	113	108	114
LSD ₀₅	1.17				

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Возбудителями корневой гнили пшеницы в условиях южной лесостепи Зауралья являлись грибы, преимущественно из рода *Fusarium*, а также *Bipolaris sorokiniana*. Семенной материал пшеницы яровой был заражен ими на 19,5 %, условно-патогенными грибами из рода *Alternaria* – на 21,7 %, плесенями – на 10,4 %.

Лабораторная всхожесть семян существенно увеличивалась на вариантах с биологической и комбинированной защитой (+5,6 и 2,8 п. п. соответственно). Обработка однокомпонентными химическими препаратами снизила показатель на 2,7 п. п., фунгициды на основе двух действующих веществ не оказали влияния на показатель. В полевых условиях густота всходов увеличивалась с 68 % на контроле до 72–73 % на вариантах с мерами защиты.

Химические протравители семян способствовали укорачиванию coleoptile на 0,8–1,3 см, при использовании для обработки семян биологического фунгицида такого не наблюдалось. Прирост линейных размеров надземной и подземной частей пшеницы обеспечил только биофунгицид на основе сенной палочки.

Показатели контроля корневой гнили пшеницы в полевых условиях имели отличия при использовании разных методов защиты (химического, биологического, комбинированного). Биологическая эффективность химических протравителей семян составила 60–72 %, выше при использовании поликомпонентных препаратов. На варианте биологической

защиты семян снижение развития корневой гнили составило 63 %, что на уровне с однокомпонентными химическими фунгицидами и со смесью бактериального препарата с половинной нормой расхода химического протравителя.

В фазе кущения на яровой пшенице основным видом из рода *Fusarium* был возбудитель трахеомикозного увядания культур *F. oxysporum* (98 %). В фазе молочно-восковой спелости представленность видов уменьшилась, но преобладающими остались также высокоопасные *F. oxysporum*, *F. graminearum*, *F. sporotrichioides*.

В условиях южной лесостепи Зауралья практически ежегодно отмечаются негативные для роста и развития растений природные явления (засухи, заморозки, резкие перепады температурного режима и др.). Использование протравителей семян бывает дополнительным стрессом для растений, наличие эффекта укорачивания подземного междоузлия может негативно сказаться на полевой всхожести культуры. Для снижения этих рисков, а также пестицидной нагрузки рекомендуем использование комбинированного метода защиты семян, включающего в себя применение смеси фунгицида на основе бактерии *Bacillus subtilis* с химическим протравителем в половинной норме расхода. При этом определено, что сохраняется уровень контроля фитопатогенов, отсутствует ретардантный эффект, хозяйственная эффективность не уступает уровню применения двухкомпонентного химического протравителя семян (113–114 %).

Библиографический список

1. Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в РФ [Электронный ресурс]. URL: <https://rosselhoscenter.com> (дата обращения: 15.12.2023).
2. Торопова Е. Ю., Кудрявцев А. Е., Стецов Г. Я., Селюк М. П. Фактологические критерии оценки здоровья сибирских почв // Агрохимия. 2020. № 5. С. 3–11. DOI: 10.31857/S0002188120050166.
3. Toropova E. Yu., Glinushkin A. P., Insebaeva M. K., Stetsov G. Ya. The conidia *Bipolaris sorokiniana* Sacc. Shoem. distribution in the soil of Altai and Kazakhstan arid regions // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1942. Article number 012078. DOI: 10.1088/1742-6596/1942/1/012078.
4. Кекало А. Ю., Немченко В. В., Заргарян Н. Ю., Филиппов А. С., Козлова Т. А. Современный подход к вопросу защиты пшеницы от болезней и вредителей // Земледелие. 2020. № 5. С. 41–45.
5. Торопова Е. Ю., Воробьева И. Г., Мустафин М. А., Селюк М. П. Грибы рода *Fusarium* в Западной Сибири // Защита и карантин растений. 2019. № 1. С. 20–23.
6. Торопова Е. Ю., Воробьева И. Г., Стецов Г. Я. [и др.] Фитосанитарный мониторинг и контроль фитопатогенов яровой пшеницы // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35, № 6. С. 25–32. DOI: 10.24411/0235-2451-2021-10605.
7. Здрожевская С. Д., Гришечкина Л. Д. Влияние погодных условий на эффективность протравителей // Защита и карантин растений. 2019. № 2. С. 11–12.
8. Гаврилова О. П., Гагкаева Т. Ю., Орина А. С., Гогина Н. Н. Разнообразие грибов рода *Fusarium* и их микотоксинов в зерне из азиатской части России // Микология и фитопатология. 2022. Т. 56, № 3. С. 194–206.
9. Гаврилова О. П., Орина А. С., Гогина Н. Н., Гагкаева Т. Ю. Проблема фузариоза зерна в Зауралье: ретроспектива исследований и современная ситуация // Аграрный вестник Урала. 2020. № 7 (198). С. 29–40. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-198-7-29-40.
10. Домрачева Л. И., Фокина А. И., Скугорева С. Г., Ашихмина Т. Я. Почвенные грибы рода *Fusarium* и их метаболиты: опасность для биоты, возможность использования в биотехнологии (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 6–15.

11. Торопова Е. Ю., Воробьева И. Г., Мустафина М.А., Селюк М. П. Мониторинг грибов рода *Fusarium* Link. и их микотоксинов на зерне пшеницы в Западной Сибири // *Агрехимия*. 2019. № 5. С. 76–82.
12. Торопова Е. Ю., Селюк М. П., Воробьева И. Г. Динамика и механизмы колонизации колосьев яровой пшеницы фитопатогенными микромицетами // *Успехи медицинской микологии*. 2023. Т. 25. С. 448–452.
13. Торопова Е. Ю., Сухомлинов В. Ю., Кириченко А. А., Пискарев В. В. Паразитирование *Bipolaris sorokiniana* Sacc. Shoem. в системе органов сортов яровой пшеницы в северной лесостепи Приобья // *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2022. № 1 (62). С. 76–87. DOI: 10.31677/2072-6724-2022-62-1-76-87.
14. Орина А. С., Гаврилова О. П., Гагкаева Т. Ю., Ганнибал Ф. Б. Микромицеты *Alternaria* spp. и *Bipolaris sorokiniana* и микотоксины в зерне, выращенном в Уральском федеральном округе // *Микология и фитопатология*, 2020. Т. 54, № 5. С. 365–377. DOI: 10.31857/S0026364820050086.
15. Орина А. С., Гаврилова О. П., Гагкаева Т. Ю., Гогина Н. Н. Контаминация зерна в Западной Сибири грибами *Alternaria* и их микотоксинами // *Вестник защиты растений*. 2021. Т. 104, № 3. С. 153–162. DOI: 10.31993/2308-6459-2021-104-3-15019.
16. Список пестицидов и агрохимикатов разрешенных к применению на территории Российской Федерации 2022 год // Приложение к журналу «Защита и карантин растений». 2022. № 4.
17. Гришечкина Л. Д. Фунгициды для защиты пшеницы яровой от семенной и почвенной инфекции // *Защита и карантин растений*. 2022. № 3. С. 13–17. DOI: 10.47528/1026-8634_2022_3_13.
18. Чекмарев В. В., Бучнева Г. Н., Корабельская О. И., Дубровская Н. Н., Гусев И. В. Влияние фунгицидов на развитие возбудителей корневых гнилей пшеницы фузариозной этиологии в условиях *in vivo* // *Advances in Science and Technology: сборник статей XV международной научно-практической конференции*. Москва, 2018. 272 с.
19. Чекмарев В. В. Фузариозная корневая гниль пшеницы и контроль развития заболевания // *The Scientific Heritage*. 2020. № 57-1. С. 18–19. DOI: 10.24412/9215-0365-2020-57-1-18-19.
20. Tariq M., Khan A., Asif M., Khan F., Ansari T., Shariq M., Siddiqui M. Biological control: a sustainable and practical approach for plant disease management // *Acta Agriculturae Scandinavica B – Soil & Plant Science*. 2020. No. 70 (6). Pp. 507–524. DOI: 10.1080/09064710.2020.1784262.
21. Санин С. С. Защита растений и устойчивое земледелие в XXI столетии // *Защита и карантин растений*. 2020. № 4. С. 9–16.
22. Павлюшин В. А., Новикова И. И., Бойкова И. В. Микробиологическая защита растений в технологиях фитосанитарной оптимизации агроэкосистем: теория и практика // *Сельскохозяйственная биология*. 2020. № 3. С. 421–438 DOI: 10.15389/agrobology.2020.3.421rus.
23. Власенко Н. Г., Павлюшин В. А., Теплякова О. И. Эффективность защиты яровой пшеницы биопрепаратами и фунгицидами в лесостепи Приобья: I. Первые результаты в экстремальных погодных условиях // *Вестник защиты растений*. 2021. № 4. С. 202–212. DOI: 10.31993/2308-6459-2021-104-4-15029.
24. ГОСТ 12044-93. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения зараженности болезнями. Москва: Стандартинформ, 2011. 209 с.
25. Фитосанитарная диагностика агроэкосистем: учебно-практическое пособие / В. А. Чулкина, Е. Ю. Торопова, Г. Я. Стецов [и др.] Барнаул: ГРАФИКС, 2017. 210 с.
26. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Москва: Альянс, 2011. 350 с.
27. Спиридонов Ю. Я. [и др.] Адаптивно-интегрированная защита растений. Москва: Печатный Город, 2019. 626 с.

Об авторах:

Алена Юрьевна Кекало, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0003-0802-1722, AuthorID 341054. *E-mail: alena.kekalo@mail.ru*

Владимир Васильевич Немченко, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-5324-6309, AuthorID 160275. *E-mail: nem.cad@mail.ru*

References

1. *Review of the phytosanitary state of agricultural crops in the Russian Federation* [Internet] [cited 2023 Dec 15]. Available from: <https://rosselhoscenter.com>. (In Russ.)

2. Toropova E. Yu., Kudryavtsev A. E., Stetsov G. Ya., Selyuk M. P. Factual criteria for assessing the health of Siberian soils. *Agrochemistry*. 2020; 5: 3–11. (In Russ.)
3. Toropova E. Yu., Glinushkin A. P., Insebaeva M. K., Stetsov G. Ya. The conidia *Bipolaris sorokiniana* Sacc. Shoem. distribution in the soil of Altai and Kazakhstan arid regions. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1942: 012078. DOI: 10.1088/1742-6596/1942/1/012078.
4. Kekalo A. Yu., Nemchenko V. V., Zargaryan N. Yu., Filippov A. S., Kozlova T. A. A modern approach to the wheat protection from diseases and pests. *Zemledelie*. 2020; 5: 41–45. DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10511. (In Russ.)
5. Toropova E. Yu., Vorob'eva I. G., Mustafina M. A., Selyuk M. P. Fungi of fusarium genus on wheat grains in Western Siberia. *Plant Protection and Quarantine*. 2019; 1: 20–23. (In Russ.)
6. Toropova E. Yu., Vorob'eva I. G., Stetsov G. Ya. Phytosanitary monitoring and control of spring wheat phytopathogens. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2021; 35 (6): 25–32. DOI: 10.24411/0235-2451-2021-10605. (In Russ.)
7. Zdrozhevskaya S. D., Grishechkina L. D. The influence of weather conditions on the effectiveness of disinfectants. *Plant Protection and Quarantine*. 2019; 2: 11–12. (In Russ.)
8. Gavrilova O. P., Gagkaeva T. Yr., Orina A. S., Gogina N. N. Diversity of Fusarium Species and Their Mycotoxins in Cereals Grain from the Asian Territory of Russia. *Mycology and Phytopathology*. 2022; 56 (3): 194–206. (In Russ.)
9. Gavrilova O. P., Orina A. S., Gogina N. N., Gagkaeva T. Yu. The problem of Fusarium head blight in the Trans-Urals region: the history and current situation. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2020; 7: 29–40. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-198-7-29-40. (In Russ.)
10. Domracheva L. I., Fokina A. I., Skugoreva S. G., Ashihmina T. Ya. Two sides of soil fungi of the genus Fusarium and their metabolites: danger to biota and the possibility of use in biotechnology (review). *Theoretical and Applied Ecology*. 2021; 1: 6–15. (In Russ.)
11. Toropova E. Yu., Vorob'eva I. G., Mustafina M. A., Selyuk M. P. Monitoring of fungi of the genus Fusarium Link. and their mycotoxins on wheat grain in Western Siberia. *Agrochemistry*. 2019; 5: 76–82. (In Russ.)
12. Toropova E. Yu., Selyuk M. P., Vorob'eva I. G. Dynamics and mechanisms of colonization of spring wheat ears by phytopathogenic micromycetes. *Advances in Medical Mycology*. 2023; 25: 448–452. (In Russ.)
13. Toropova E. Yu., Sukhomlinov V. Yu., Kirichenko A. A., Piskarev V. V. Parasitization of *Bipolaris sorokiniana* Sacc. Shoem. in the organ system of spring wheat varieties in the northern forest-steppe of Priobye region. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2022; 1 (62): 76–87. DOI: 10.31677/2072-6724-2022-62-1-76–87. (In Russ.)
14. Orina A. S., Gavrilova O. P., Gagkaeva T. Yu., Gannibal F. B. Micromycetes *Alternaria* spp. and *Bipolaris sorokiniana* and Mycotoxins in the Grain from the Ural Region. *Mycology and Phytopathology*. 2020; 54 (5): 365–377. DOI: 10.31857/S0026364820050086. (In Russ.)
15. Orina A. S., Gavrilova O. P., Gagkaeva T. Yu., Gogina N. N. Contamination of grain in West Siberia by *Alternaria* fungi and their mycotoxins. *Plant Protection News*. 2021; 104 (3): 153–162. DOI: 10.31993/2308-6459-2021-104-3-15019. (In Russ.)
16. List of pesticides and agrochemicals approved for use on the territory of the Russian Federation in 2022. *Supplement to the magazine Plant Protection and Quarantine*. 2022; 4. (In Russ.)
17. Grishechkina L. D. Fungicides for protecting spring wheat from seed and soil infections. *Plant Protection and Quarantine*. 2022; 3: 13–17. DOI: 10.47528/1026-8634_2022_3_13. (In Russ.)
18. Chekmarev V. V., Buchneva G. N., Korabel'skaya O. I., Dubrovskaya N. N., Gusev I. V. The influence of fungicides on the development of root rot pathogens of fusarium wheat under in vivo conditions. *Advances in Science and Technology: collection of articles from the XV international scientific and practical conference*. Moscow, 2018. 272 p. (In Russ.)
19. Chekmarev V. V. Fusarium root rot of wheat and disease development control. *The Scientific Heritage*. 2020; 57-1: 18–19. DOI: 10.24412/9215-0365-2020-57-1-18-19. (In Russ.)
20. Tariq M., Khan A., Asif M., Khan F., Ansari T., Shariq M., Siddiqui M., et al. Biological control: a sustainable and practical approach for plant disease management. *Acta Agriculturae Scandinavica B – Soil & Plant Science*. 2020; 70 (6): 507–524. DOI: 10.1080/09064710.2020.1784262.
21. Sanin S. S. Plant protection and sustainable agriculture in the XXI century. *Plant Protection and Quarantine*. 2020; 4: 9–16. (In Russ.)
22. Pavlyushin V. A., Novikova I. I., Bojkova I. V. Microbiological control in phytosanitary optimization technologies for agroecosystems: research and practice (review). *Agricultural Biology*. 2020; 3: 421–438. DOI: 10.15389/agrobiology.2020.3.421rus. (In Russ.)

23. Vlasenko N. G., Pavlyushin V. A., Teplyakova O. I. Protection of spring wheat with biopreparations and fungicides in the forest steppe of Priobye: I. First results in extreme weather conditions. *Plant Protection News*. 2021; 4: 202–212. DOI: 10.31993/2308-6459-2021-104-4-15029. (In Russ.)

24. *GOST 12044-93. Agricultural seeds. Methods for Determining Disease Infestation*. Moscow: Standartinform, 2011. 209 p. (In Russ.)

25. Chulkina V. A., Toropova E. Yu., Stetsov G. Ya., et al. *Phytopathological Diagnostics of Agroecosystems*. Barnaul: GRAFIKS, 2017. 210 p. (In Russ.)

26. Dospekhov B. A. *Methodology of Field Experience (with the basics of statistical processing of research results)*. Moscow: Al'yans, 2011. 350 p. (In Russ.)

27. Spiridonov Yu. Ya., et al. *Adaptive-Integrated Plant Protection*. Moscow: Pechatnyy Gorod, 2019. 626 p. (In Russ.)

Authors' information:

Alena Yu. Kekalo, candidate of agricultural sciences, leading researcher, Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0003-0802-1722, AuthorID 1291-6540. *E-mail: alena.kekalo@mail.ru*

Vladimir V. Nemchenko, doctor of agricultural sciences, professor, chief researcher, Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0002-5324-6309, AuthorID 160275. *E-mail: nem.cad@mail.ru*

Эффективность поверхностного компостирования табачной пыли с использованием микробных смесей

Т. В. Плотникова[✉], В. А. Саломатин, Н. В. Сидорова

Всероссийский научно-исследовательский институт табака, махорки и табачных изделий (ВНИИТТИ), Краснодар, Россия

[✉]E-mail: agrotobacco@mail.ru

Аннотация. Основным отходом при производстве курительных изделий является табачная пыль. Цель исследования – изучение возможности утилизации табачной пыли способом поверхностного компостирования совместно с микробными смесями «Стимикс Компост», «Пробиокс Агро» и «Геостим» непосредственно в полевых условиях, способствующим восстановлению почвенного плодородия. **Методы.** В годы исследований (2020–2021) табачную пыль вносили в дозах 5 и 8 т/га в чистом виде и совместно с микробиологическими препаратами. **Научная новизна.** Предложен способ использования отходов табачного производства в качестве удобрения совместно с деструкторами. **Результаты.** Установлено, что за 30–60 суток на фоне применения табачной пыли совместно с микробными препаратами в почве увеличивается содержание главных питательных элементов: аммонийной формы азота на 65–207 %, нитратной – на 83–225 %, доступного фосфора – на 21–107 %, обменного калия – на 80–194 %. Определено повышение показателей биологической активности почвы. Процесс нитрифицирующей способности усиливается на 70–194 %, ускоряется целлюлозоразрушающая активность микроорганизмов – на 27–133 %, повышается количество продуцированной CO₂ из почвы – на 61–129 %. Содержание органического вещества (гумуса) увеличивается до 4,2–5,5 % за период учета (на контроле 4,0–4,7 %). Установлено повышение влагоудерживающей способности почв в вариантах опыта с табачной пылью и деструкторами (влажность почвы за период исследований составила 18,4–25,5%, в контроле – 17,1–18,7 %). Лучшие результаты по поверхностному компостированию табачной пыли получены во влажных условиях 2021 г. (ГТК = 1,38), в 2020 г. ГТК = 0,87. Микологический анализ выявил снижение заселения почвы патогенными микромицетами в вариантах опыта с табачным отходом. Прибавка к урожайности перца горького (сорт Бараний рог) на фоне смеси табачной пыли и биодеструкторов составила 12–32 % (2020 г.), огурца посевного (сорт Дальневосточный 27) – 20–33 %.

Ключевые слова: отходы, табачная пыль, Стимикс Компост, Пробиокс Агро, Геостим, поверхностное компостирование, плодородие почвы, урожайность

Для цитирования: Плотникова Т. В., Саломатин В. А., Сидорова Н. В. Влияние способа поверхностного компостирования отхода табачного производства – табачной пыли совместно с деструкторами на повышение плодородия почвы и урожайность сельскохозяйственных культур // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 08. С. 994–1006. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-994-1006>.

Дата поступления статьи: 29.02.2024, **дата рецензирования:** 29.03.2024, **дата принятия:** 22.05.2024.

Efficiency of surface composting of tobacco dust using microbial mixtures

T. V. Plotnikova[✉], V. A. Salomatin, N. V. Sidorova

All-Russian scientific research institute of tobacco, makhorka and tobacco products, Krasnodar, Russia

[✉]E-mail: agrotobacco@mail.ru

Abstract. Tobacco dust is the main waste in the production of smoking products. **The purpose** is to study the possibility of tobacco dust utilization by surface composting together with microbial mixtures “Stimiks Kompost”, “Probioks Agro” and “Geostim”, directly in the field conditions, contributing to the restoration of soil fertility. **Methods.** In the years of research (2020–2021) tobacco dust was applied in doses of 5 and 8 t/ha in pure form and together with microbiological preparations. **Scientific novelty.** The method of using tobacco production waste as a fertilizer together with microbiological preparations is proposed. **Results.** It was established that for 30–60 days, tobacco dust application together with destructors, the content of basic nutrient elements in the soil increased: ammonium nitrogen form by 65–207 %, nitrate nitrogen by 83–225 %, available phosphorus by 21–107 %, exchangeable potassium by 80–194 %. Also Increasing of soil biological activity indicators was determined. The process of nitrifying ability of soil increases by 70–194 %, cellulose-destroying activity of microorganisms increases by 27–133 %, the amount of produced CO₂ from soil increases by 61–129 %. The content of organic matter (humus) increases up to 4.2–5.5 % for the period of counting (4.0–4.7 % on the reference). Increase of moisture-holding capacity of soils in variants of experiment with tobacco dust and destructors was established (soil moisture for the period of research amounted to 18.4–25.5 %, in control – 17.1–18.7 %). The best results for surface composting of tobacco dust were obtained under wet conditions in 2021 (Hydrothermal coefficient (HTC) = 1.38), in 2020 HTC = 0.87. Mycological analysis revealed a decrease in soil infestation with pathogenic micro-mycetes in the variants of the experiment with tobacco waste. The increase in yield of bitter pepper (variety Baraniy rog) on the background of a mixture of tobacco dust and biodegraders amounted to 12–32 % (2020), seed cucumber (variety Dal’nevostochnyy 27) – 20–33 %.

Keywords: waste, tobacco dust, Stimiks Kompost, Probioks Agro, Geostim, surface composting, soil fertility, yield

For citation: Plotnikova T. V., Salomatin V. A., Sidorova N. V. Influence of the method of surface composting of tobacco production waste – tobacco dust together with destructors on improvement of soil fertility and crop yields. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (08): 994–1006. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-994-1006>. (In Russ.)

Date of paper submission: 29.02.2024, **date of review:** 29.03.2024, **date of acceptance:** 22.05.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

В табачной промышленности при производстве курительных изделий образуются большие объемы отходов – до 12 % от общего количества выпускаемой продукции. Отходы подразделяются на возвратные и невозвратные. К возвратным отходам относят остатки табака, волокно после переработки брака сигарет и штранга, к невозвратным – срезы главной жилки, мелочь и пыль. Основная часть невозвратных отходов – это табачная пыль, в состав которой входит до 50 % минеральных примесей. Данный отход отнесен к третьему классу опасности и подлежит утилизации на специальных полигонах ТБО. При этом большое скопление отхода небезопасно для окружающей среды и человека, так как способствует появлению очагов самовозгорания, загрязнению грунтовых вод и изъятию земель. Поэтому как за рубежом, так и в нашей стране предлагаются альтернативные способы утилизации

направления по вовлечению табачных отходов в хозяйственный оборот в качестве вторичных ресурсов [1–3]. На сегодняшний день одним из таких направлений является применение в качестве органического удобрения как прямым внесением в почву, так и через процесс компостирования.

Компостирование – это эффективная процедура переработки сельскохозяйственных и промышленных отходов и превращения их в ценный материал [4; 5]. В Турции изучено влияние компоста из табачной пыли в сочетании с навозом при разных соотношениях на урожайность салата (*Lactuca sativa* L. var. capitata). Лучшие результаты по урожайности получены при применении компоста из стопроцентной табачной пыли [6]. Улучшение свойств ксерофлювиальной почвы и повышение урожайности кукурузы (*Zea Mays* L.) установлено при внесении в почву компоста из табачных отходов в количестве 50 т/га [7]. В Индонезии проведены

исследования по определению влияния биогумуса в дозах 1–4 т/га, полученного из отходов табачной промышленности, на рост и продуктивность дыни (*Cucumis melo* L.) [8]. Во Вьетнаме компостировали табачные отходы совместно с куриным пометом в разных пропорциях и в сочетании с микробным деструктором, содержащим биоагенты *Bacillus subtilis* и *Trichoderma harzianum*. Компост применяли (0, 10, 15 и 20 т/га) совместно с фосфорным (40 кг/га), азотным (60 кг/га) и калийным (90 кг/га) удобрениями для выращивания горчицы листовой (*Brassica integrifolia*) [9]. В Китае разработан способ приготовления органического удобрения из табачных отходов совместно с куриным пометом, грибными отрубями и биоуглем [10; 11]. В Греции табачные отходы компостировали совместно с торфом и испытывали на росте и развитии растений герани [12]. В Польше изготавливали компост, приготовленный из табачных отходов, коры и соломы [13]. Есть данные по применению табачной пыли в качестве удобрения в чистом виде. Так, в Бразилии установлено, что дозы внесения отходов табачного производства от 15 до 20 т/га наиболее эффективны для роста растений [14]. В Бангладеше изучали влияние совместного применения табачной пыли и прессовой грязи сахарного тростника. В результате на фоне оздоровления почвы (повышение органического вещества, общего азота, доступного фосфора, серы и обменного калия) получена высокая урожайность риса [15]. Выращивание табака также характеризуется большим количеством отходов биомассы, утилизация которых часто представляет собой сложную и дорогостоящую проблему [16]. Есть исследования по эффективному применению в качестве удобрения непосредственно в поле отходов сырого табака в норме 40 т/га [17]. В нашей стране мало изучено данное направление.

Во ВНИИТТИ с 2012 года начаты исследования по вторичному использованию табачной пыли, а именно в качестве удобрения как в чистом виде, так и в смеси с биодеструкторами для ускорения процесса разложения пыли до нетоксичного состояния. Установлены оптимальные дозы (от 2 до 5 т/га) внесения отхода в чистом виде за месяц до проведения весенне-полевых работ в качестве удобрительного средства [18]. Эффективность и экологичность приема подтверждаются не только оптимизацией агрохимических и микологических показателей почвы, но и наличием в ней геобионтов и геофилов, а именно дождевых червей (сем. *Lymbricidae*) и жуков (сем. *Carabidae*) [19]. Применение более высоких доз табачной пыли (8 т/га) за указанный период приводит к угнетению биологических процессов в почве. Однако при добавлении биодеструкторов («Стернифаг», «Биокомплекс БТУ», птичий помет, сахарный дефекал и др.) к табачной пыли в вышеуказанной дозе отмечается ускорение разложения от-

хода, проявляемое активизацией процессов биологической активности и улучшение всех показателей почвенного плодородия, а именно увеличение содержания подвижных форм основных питательных элементов, повышение биологической активности, снижение плотности микопатогенной инфекции и увеличение урожайности сельскохозяйственных культур [20–22]. При этом предлагаемое поверхностное компостирование табачной пыли непосредственно в поле является доступным и дешевым методом возврата в почву органического вещества. Таким образом, опираясь на опыт российских и зарубежных специалистов, можно сделать вывод, что отходы табачного производства целесообразно использовать в качестве органического удобрения как в чистом виде, так и в сочетании с другими растительными отходами и бактериальными добавками.

Поэтому целью данных исследований являлось изучение возможности применения отхода табачного производства – табачной пыли – в качестве почвоудобрительного средства способом поверхностного компостирования совместно с микробными смесями «Стимикс Компост», «Пробиокс Агро» и «Геостим».

Методология и методы исследования (Methods)

Опыт проводили на опытно-селекционном участке ВНИИТТИ (г. Краснодар). В качестве деструкторов использовали микробные смеси, специально разработанные для разложения растительных остатков: «Стимикс Компост», «Пробиокс Агро» и «Геостим».

Препарат «Стимикс Компост» (ООО НПО «Биоцентр»), состоит из живых активных азотфиксирующих, молочных бактерий, бактерий фотосинтеза, сахаромицетов. В состав препарата «Геостим» (ООО «Биотехагро») входят сапротрофный гриб *Trichoderma viride* и ассоциативные микроорганизмы *Azomonas agilis*, *Azotobacter chroococcum*. «Пробиокс Агро» (НПК «Пробиокс») представляет собой симбиотическое сообщество полезных микроорганизмов: азотфиксирующих, фотосинтезирующих, актиномицетов, ферментирующих грибов, молочнокислых, дрожжей и др.

Почва опытного участка – западно-предкавказский чернозем выщелоченный. Опыт по поверхностному компостированию табачной пыли в 2020 г. (III декада марта – III декада мая) проводился на фоне низкой влагообеспеченности. По количеству выпавших осадков в марте отмечен дефицит по сравнению со средней многолетней величиной на 37,0 мм, в апреле – на 24,5 мм, в мае – на 2,8 мм. По температурному режиму март оказался теплее средней многолетней нормы на +6,8 °С, апрель – на +0,8 °С, май – на +1,9 °С. Деструкция табачного отхода в 2021 г. осуществлялась в более оптимальных по влагообеспеченности условиях. В апреле количество выпавших осадков составило 70 мм, что

превысило среднеголетние данные на +26,2 мм, в мае – 108 мм, при этом превышение нормы составило +56,2 мм. Среднемесячная температура была выше нормы на +1,6 °C и +2,6 °C соответственно месяцам проведения исследований. Гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК), характеризующий уровень влагообеспеченности, составил по годам 0,87 и 1,38 соответственно.

Табачную пыль вносили в дозах 5 и 8 т/га в чистом виде и совместно с микробиологическими препаратами. Микробные смеси смешивали с водой в количестве 1,0 л/м² в дозах согласно схеме полевого опыта («Стимикс Компост» – 10 л/га, «Геостим» – 1 л/га, «Пробиокс Агро» – 3,0 л/га) и с помощью лейки наносили на обрабатываемую площадь (в данном случае на участок с внесенной табачной пылью) и заделывали в почву с помощью мотыги на глубину 10 см. Микробиологический препарат «Геостим» применяли согласно рекомендациям производителя в дозе 1 л/га совместно с гуминовым удобрением в жидкой форме «Гумат 1», а для усиления роста гриба триходермы добавляли в раствор селитру в количестве 10 кг/га. Площадь учетной делянки в опыте – 5 м². Повторность четырехкратная.

Отбор проб почвы для агрохимического анализа осуществляли через 30 суток и 60 суток после закладки опыта. В почвенных образцах определяли нитрифицирующую способность по возрастанию в почве содержания нитратов, при выдерживании ее в оптимальных для микроорганизмов условиях (в термостате с температурой 27–28 °C) в течение 7 суток по методу Кравкова; целлюлозоразрушающую активность – по степени разложения клетчатки после двухнедельной инкубации (в термостате с температурой 27–28 °C) по методу Федорова; интенсивность дыхания по количеству выделившегося из почвы углекислого газа после суточной экспозиции – по методу Штатнова; содержание нитратного и аммонийного азота – по методу Мещерякова; подвижного фосфора – по методу Чирикова; обменного калия – по методу Масловой. Микологический состав почвы устанавливали на 60-е сутки после внесения всех природных компонентов. Грибы из почвы изолировали, для этого почвенную навеску, смешивали со стерильной водой и встряхивали на шейкере в течение 15 минут. Из полученной суспензии отбирали 0,3 мл и высевали в чашки Петри на голодный алкогольный агар. Засеянные чашки Петри инкубировали в термостате при температуре 24 °C в течение 14 дней. Идентификация и учет колоний грибов проводили на микроскопе «Биолам» в лабораторных условиях КубГАУ.

Эффективность использования отходов табачного производства в качестве органического удобрения оценивали по урожайности перца горького (сорт Бараний рог) (2020 г.) и огурца посевого (сорт Дальневосточный 27) (2021 г.). Статистиче-

ский анализ экспериментальных данных проводили по методике Б. А. Доспехова (1985) с использованием компьютерной программы Excel.

Результаты (Results)

Опыт заложен на черноземе выщелоченном (контроль) с низким содержанием подвижных форм основных питательных элементов за период проведения опыта (2020–2021 гг.): NH₄ – 1,3–2,3 мг, NO₃ – 4,8–9,0 мг, P₂O₅ – 7,5–10,1 мг и K₂O – 13,7–14,9 мг на 100 г почвы. При внесении в почву в качестве удобрительного средства табачной пыли (ТП) в дозах 5 и 8 т/га в 2020 г на фоне выпадения небольшого количества атмосферных осадков – 24 мм и 15 мм (в течение первых и вторых 30 суток соответственно) и, следовательно, относительно низкого обеспечения почвы влагой в весенний период (9,9–24,9 %) отмечена достаточно высокая интенсивность деструкции отхода табачного производства как с использованием микробных коктейлей, так и в чистом виде. Данный факт подтверждается изменением, а именно повышением процесса минерализации в почве, при этом увеличивается содержание доступных форм основных питательных элементов, необходимых для роста растений. Так, в вариантах опыта на фоне применения табачной пыли в дозах 5 и 8 т/га отмечено увеличение в сравнении с контролем содержания аммонийной формы азота через 30 суток на 93–100 % и через 60 суток на 86–114 %, нитратной формы азота – на 35–63 % и 140–160 %, доступного фосфора – на 10 % и на 24–27 %, обменного калия – на 41–61 % и 78–99 % соответственно. Причем на 30-е сутки в условиях недостаточного увлажнения процесс разложения табачной пыли протекает активнее на фоне применения отхода в дозе 5 т/га. Доза табачной пыли 8 т/га вызывает угнетение биологических процессов. Через 60 суток результаты в варианте опыта с табачной пылью в дозе 8 т/га уже превышают фон опыта с меньшей дозой табачного отхода.

Применение табачной пыли в дозах 5 и 8 т/га в условиях повышенной влажности 2021 г. на фоне выпадения превышающих норму количества осадков – 70 мм и 108 мм (за первые и за вторые 30 суток) и, следовательно, оптимального обеспечения почвы влагой в весенний период (18,4–25,5%) также отмечена высокая интенсивность деструкции отхода табачного производства во всех вариантах опыта, проявляемая повышением содержания основных питательных элементов в почве. Табачная пыль, внесенная в почву в дозах 5 и 8 т/га за период наблюдений, способствует увеличению содержания аммиачной формы азота через 30 суток на 39–74 %, через 60 суток – на 130–162 %, нитратной формы – на 90–106 % и 82–114 %, фосфора – на 57–78 % и 54–76 %, обменного калия – на 43–94 % и 77–121 % соответственно.

Анализ полученных результатов показал, что улучшение показателей биологической активности почвы, а именно процесс окисления аммиака в азотную кислоту, осуществляемый нитрифицирующими бактериями, ускоряется в вариантах опыта с применением табачной пыли в чистом виде в двух дозах на 30-е сутки в опыте на 127–136 % и на 60-е сутки – на 50–62 % (по результатам 2020 года), на 30-е сутки – на 50–79 % и на 60-е сутки – на 79–100 % (по результатам 2021 года) (таблица 1). Микробиологическая активность по разложению клетчатки увеличивается в 2020 г. в вариантах опыта с табачной пылью в дозах 5 и 8 т/га на 30-е сутки на 9–25 % и на 60-е сутки – на 19 %, соответственно в 2021 году – на 84–124 % и 87–112 %. Выделение углекислоты и других газов из почвы (дыхание почвы), связанное с функционированием почвенной биоты, повышается на 49–65 % и 13–16 % соответственно датам отбора проб по результатам опыта в 2020 году и на 60–77 % и 82–93 % в 2021 году.

Внесение табачной пыли совместно с деструкторами «Стимикс Компост», «Пробиокс Агро» и «Геостим» значительно повышает все изучаемые агрохимические показатели почвы в сравнении не только с контролем, но и с вариантами опыта, где применяли табачную пыль в чистом виде в дозах 5 и 8 т/га. Так, табачная пыль, примененная в двух дозах совместно с препаратом «Стимикс Компост», в опыте за 2020 года способствует увеличению содержания в почве аммиачного азота на 147–193 % (на 30-е сутки) и на 124–157 % (на 60-е сутки), нитратного азота – на 65–85 % (на 30-е сутки) и на 157–194 % (на 60-е сутки), фосфора – на 25–81 % (на 30-е сутки) и на 64–92 % (на 60-е сутки), обменного калия – на 85–101 % (на 30-е сутки) и на 101–123 % (на 60-е сутки) в сравнении с контролем. Нитрифицирующая способность почвы увеличивается на 133–172 % и 72–110 %, интенсивность процесса разложения клетчатки – на 27–59 % и 29–47 %, интенсивность дыхания почвы – на 72–110 % и 84–99 % соответственно дозам пыли и датам отбора проб.

В 2021 году на данном фоне также отмечается качественное изменение в почве, проявляемое повышением содержания аммиачного азота соответственно дозам отхода (5 и 8 т/га) и датам отбора проб на 87–126 % и 123–146 %, нитратного азота – на 140–168 % и 93–124 %, фосфора – на 46–67 % и 36–59 %, обменного калия – на 82–99 % и 100–137 %. Отмечено повышение нитрифицирующей способности почвы на 86–116 % и 120–167 %, целлюлозоразрушающей активности – на 106–129 % и 113–126 %, интенсивности дыхания почвы – на 61–81 % и 93–106 % соответственно на 30-е и 60-е сутки проведения учетов.

Положительные изменения произошли в почве и на фоне применения табачной пыли в двух испы-

танных дозах (5 и 8 т/га) совместно с деструктором «Геостим». По данным 2020 года, данная смесь увеличивает в почве доступный аммонийный азот на 133–153 % (на 30-е сутки учета) и 95–133 % (на 60-е сутки учета), нитратный азот – на 79–88 % и 159–206 %, фосфор – на 21–80 % и 61–91 %, калий – на 81–110 % и 85–143 %. Определено повышение нитрификационной активности почвы на 131–169 % и 70–123 %, интенсивности процесса разложения клетчатки на 40–45 % и 30–34 %, дыхания почвы – на 85–115 % и 93–117 % соответственно дозам и датам отбора проб. В 2021 году за период исследований (через 30 и 60 суток соответственно) установлено увеличение содержания в почве аммиачной формы азота на 65–100 % и 100–138 %, нитратной – на 154–209 % и 144–160 %, фосфора – на 36–66 % и 35–53 %, калия – на 88–102 % и 111–143 %. Созданы благоприятные условия для жизнедеятельности бактерий, усваивающих минеральные формы азота, при этом процесс нитрификации в почве проходит на 83–121 % и 126–171 % интенсивнее, активность целлюлозоразрушающих микроорганизмов увеличивается на 117–133 % и 113–127 %, продуцирование углекислоты почвой – на 59–96 % и 59–129 % соответственно дозам табачной пыли и датам отбора проб.

Внесение препарата «Пробиокс Агро» также существенно улучшает деструкцию табачной пыли в дозах 5 и 8 т/га. При этом, по результатам 2020 года, отмечается повышение в почве азота в аммиачной форме на 180–207 % (на 30-е сутки согласно дозам табачной пыли) и на 167–180 % (на 60-е учетные сутки), в нитратной форме на 83–90 % и 201–220 %, фосфора – на 31–84 % и 72–104 %, калия – на 84–97 % и 81–120 %. Установлено увеличение нитрифицирующей способности почвы на 167–194 % и 80–125 %, интенсивности процесса разложения клетчатки – на 40–59 % и 29–49 %, продуцирования углекислого газа – на 73–120 % и 91–123 % соответственно дозам и датам отбора проб.

За учетный период в 2021 году на фоне применения препарата «Пробиокс Агро» отмечается увеличение в почве аммиачного азота через 30 суток после внесения табачной пыли и деструктора на 135–161 %, через 60 суток – на 108–154 %, нитратного азота – на 213–225 % и 156–181 %, доступного фосфора – на 50–107 % и 38–61 %, обменного калия – на 76–85 % и 106–120 % соответственно. Нитрифицирующая способность почвы, в период первых 30 суток после внесения отходов, превысила значения контроля на 93–133 % соответственно дозам табачной пыли. В период вторых 30 суток опыта (на 60-е сутки учета) нитрифицирующая активность почвы повышается относительно контроля на 150 % и 183 % соответственно дозам пыли. Микробиологическая целлюлозоразрушающая активность при совместном применении табачной

пыли и биопрепарата «Пробиокс Агро» значительно увеличивается на протяжении опыта. В первый учет она повышается на фоне табачной пыли в дозе 5–8 т/га на 101–192 %, во второй учет – на 114–133 % соответственно. Продукция углекислоты, или «дыхание» почвы, при применении препарата «Пробиокс Агро» и табачной пыли в испытанных дозах повышается через 30 суток на 59–98 %, через 60 суток – на 88–135 %. Необходимо отметить, что лучшие агрохимические показатели почвы установлены на фоне применения табачной пыли в дозе 8 т/га совместно с биодеструкторами.

В опыте также изучено влияние микробных смесей в чистом виде на показатели плодородия почвы. Агрохимические параметры в этом случае ниже в сравнении с вариантами опыта, где применяли табачную пыль в чистом виде.

За период проведения опыта (2020–2021 гг.) на фоне деструктора «Геостим» отмечено увеличение в почве аммиачного азота на 13–20 % на 30-е сутки учета и на 33–77 % на 60-е сутки, на фоне препарата

«Стимикс Компост» – на 22–33 % и 33–85 %, «Пробиокс Агро» – на 30–33 % и 43–77 % соответственно. Показатели нитратного азота повысились при применении препарата «Геостим» на 15–82 % на 30-е сутки учета и 82–96 % на 60-е учетные сутки, при применении препарата «Стимикс Компост» – на 8–78 % и 21–41 %, препарата «Пробиокс Агро» – на 17–39 % и 77–80 %. Установлено по годам увеличение в почве доступного фосфора на фоне препарата «Геостим» – на 4–30 % и на 30-е и на 60-е сутки, на фоне микробиологического препарата «Стимикс Компост» – на 4–42 % и 4–37 %, на фоне препарата «Пробиокс Агро» – на 5–55 % и 5–45 %. Данные по показателям обменного калия с применением табачной пыли совместно с препаратом «Геостим» в опыте за два года исследований увеличились на 18–76 % через 30 суток и на 16–79 % через 60 учетных суток; в варианте, где применяли «Стимикс Компост», – на 14–63 % и 11–72 %; «Пробиокс Агро» – на 6–53 % и 6–64 % соответственно годам и суткам учета.

Таблица 1
Изменение биологической активности почвы на различных фонах через 30 суток (1)
и через 60 суток (2) после внесения табачной пыли (ТП)

Вариант опыта	Нитрифицирующая способность, мг NO ₃ / 100 г почвы		Активность целлюлозоразрушающих бактерий, %		Интенсивность дыхания, мг CO ₂ /кг почвы в сутки	
	1	2	1	2	1	2
2020 год						
Контроль	3,6	6,0	28,0	30,8	23,3	20,4
ТП 5 т/га	8,2	9,0	35,1	36,6	37,2	37,1
ТП 8 т/га	8,5	9,7	30,5	36,6	41,2	39,3
Пробиокс Агро	5,5	6,7	31,0	33,1	25,1	23,4
Стимикс Компост	5,0	6,4	28,8	32,1	24,6	22,4
Геостим	5,4	6,5	30,9	32,5	25,1	22,8
ТП 5 т/га + Пробиокс Агро	9,6	10,8	39,3	39,8	40,4	39,0
ТП 8 т/га + Пробиокс Агро	10,6	13,5	44,6	45,8	51,4	45,5
ТП 5 т/га + Стимикс Компост	8,4	10,3	35,5	39,6	40,0	37,5
ТП 8 т/га + Стимикс Компост	9,8	12,6	44,4	45,3	49,0	40,5
ТП 5 т/га + Геостим	8,3	10,2	39,3	39,9	43,0	39,3
ТП 8 т/га + Геостим	9,7	13,4	40,5	41,3	50,0	44,2
НСР ₀₅	1,03	1,41	2,05	3,12	3,30	2,91
2021 год						
Контроль	5,8	4,2	8,9	18,6	24,6	19,4
ТП 5 т/га	8,7	7,5	16,4	34,7	36,7	22,0
ТП 8 т/га	10,4	8,4	20,0	39,4	40,5	22,6
Пробиокс Агро	8,0	7,8	11,5	29,7	30,1	28,8
Стимикс Компост	7,7	6,7	10,9	28,4	27,4	26,8
Геостим	7,8	7,3	9,6	28,3	28,5	28,0
ТП 5 т/га + Пробиокс Агро	11,2	10,5	17,9	39,8	39,0	36,4
ТП 8 т/га + Пробиокс Агро	13,5	11,9	26,0	43,4	48,6	45,5
ТП 5 т/га + Стимикс Компост	10,8	10,1	18,3	39,6	39,6	37,5
ТП 8 т/га + Стимикс Компост	12,5	11,2	20,4	42,0	44,5	40,0
ТП 5 т/га + Геостим	10,6	9,5	19,3	39,6	39,3	30,8
ТП 8 т/га + Геостим	12,8	11,4	20,7	42,3	48,2	44,5
НСР ₀₅	1,06	0,88	2,04	3,24	3,48	2,26

Table 1
Changing biological activity of the soil for different backgrounds 30 and 60 days after tobacco dust addition (TD)

Experiment variant	Nitrifying capacity, mg NO ₃ /100 g of soil		Activity of cellulose-degrading bacteria, %		Respiration intensity, mg CO ₂ /kg of soil per day	
	1	2	1	2	1	2
2020						
Control	3.6	6.0	28.0	30.8	23.3	20.4
TD 5 t/ha	8.2	9.0	35.1	36.6	37.2	37.1
TD 8 t/ha	8.5	9.7	30.5	36.6	41.2	39.3
Probioks Agro	5.5	6.7	31.0	33.1	25.1	23.4
Stimiks Kompost	5.0	6.4	28.8	32.1	24.6	22.4
Geostim	5.4	6.5	30.9	32.5	25.1	22.8
TD 5 t/ha + Probioks Agro	9.6	10.8	39.3	39.8	40.4	39.0
TD 8 t/ha + Probioks Agro	10.6	13.5	44.6	45.8	51.4	45.5
TD 5 t/ha + Stimiks Kompost	8.4	10.3	35.5	39.6	40.0	37.5
TD 8 t/ha + Stimiks Kompost	9.8	12.6	44.4	45.3	49.0	40.5
TD 5 t/ha + Geostim	8.3	10.2	39.3	39.9	43.0	39.3
TD 8 t/ha + Geostim	9.7	13.4	40.5	41.3	50.0	44.2
LSD ₀₅	1.03	1.41	2.05	3.12	3.30	2.91
2021						
Control	5.8	4.2	8.9	18.6	24.6	19.4
TD 5 t/ha	8.7	7.5	16.4	34.7	36.7	22.0
TD 8 t/ha	10.4	8.4	20.0	39.4	40.5	22.6
Probioks Agro	8.0	7.8	11.5	29.7	30.1	28.8
Stimiks Kompost	7.7	6.7	10.9	28.4	27.4	26.8
Geostim	7.8	7.3	9.6	28.3	28.5	28.0
TD 5 t/ha + Probioks Agro	11.2	10.5	17.9	39.8	39.0	36.4
TD 8 t/ha + Probioks Agro	13.5	11.9	26.0	43.4	48.6	45.5
TD 5 t/ha + Stimiks Kompost	10.8	10.1	18.3	39.6	39.6	37.5
TD 8 t/ha + Stimiks Kompost	12.5	11.2	20.4	42.0	44.5	40.0
TD 5 t/ha + Geostim	10.6	9.5	19.3	39.6	39.3	30.8
TD 8 t/ha + Geostim	12.8	11.4	20.7	42.3	48.2	44.5
LSD ₀₅	1.06	0.88	2.04	3.24	3.48	2.26

Нитрифицирующая способность почвы на фоне применения микробиологических препаратов за годы исследований повысилась на фоне «Геостима» на 34–50 % через 30 суток и на 8–74 % через 60 суток, на фоне препарата «Стимикс Компост» – на 33–39 % и 7–60 %, «Пробиокс Агро» – на 38–53 % и 12–86 %. Процесс разложения клетчатки стал интенсивнее при добавлении деструкторов. Так, «Геостим» увеличил активность целлюлозоразрушающих бактерий на 30-е сутки после внесения на 38–53 %, на 60-е сутки – на 12–86 %, «Стимикс Компост» – на 3–22 % и 4–53 %, «Пробиокс Агро» – на 11–28 % и 7–60 % соответственно датам отбора проб. Показатели выделения CO₂ почвой также улучшились за годы исследований соответственно датам отбора проб при внесении «Геостима» на 8–16 % и 12–44 %, препарата «Стимикс Компост» – 6–11 % и 10–38 %, «Пробиокс Агро» – на 8–22 % и 15–48 %.

При внесении в почву табачного отхода и микробных коктейлей отмечено повышение степени гумусированности почвы до 4,2–5,3 % в 2020 г., при этом на контроле содержание органического вещества (гумуса) составило 4,0 % и до 5,0–5,5% в 2021 г., на контроле при этом значения находилось на уровне 4,7 % (таблица 2). Существенное увеличение содержания органического вещества наблюдается при совместном применении пыли и деструкторов.

Деструкция растительных отходов невозможна без наличия влаги в почве, поэтому в опыте определена абсолютная влажность почвосмесей, полученных в результате поверхностного компостирования табачной пыли совместно с микробиологическими препаратами, т. е. процентное содержание в ней воды по отношению к массе (весу) сухой почвы. Стоит отметить, что внесение в почву органических составляющих и микробных смесей повышает влагоудерживающую способность почвы.

Так, в первый год исследований в первый учет, т. е. через 30 суток после закладки опыта, на фоне небольшого количества выпавших осадков влажность почвы в вариантах опыта находилась в пределах 10,4–16,5 % (на контроле – 9,9 %), во второй учет, т. е. через 60 суток, – 13,2–20,9% (на контроле – 12,6 %) (таблица 2). В 2021 году на фоне большего количества выпавших осадков влажность почвы в вариантах опыта достигла значений к первому учету 20,7–24,2 % (на контроле при этом значение влажности составило 17,1 %), ко второму учету – 19,2–25,5 % (на контроле – 18,7 %).

В опыте установлено изменение уровня pH почвы на всех вариантах в сторону защелачивания. На контроле кислотность почвы составила к концу учетного периода за годы исследований 6,0–6,1 (слабокислая), в вариантах опыта показатели находились в пределах от 6,3 до 7,0, что свидетельствует об улучшении агрономически благоприят-

ной среды для роста растений (от слабокислой до нейтральной).

Применение табачной пыли совместно с микробными препаратами, содержащими в своем составе микроорганизмы-антагонисты, способствовало оздоровлению почвы, т. е. снижению ее микопатогенной составляющей. Так, при микологическом анализе почвы наибольшее количество и разнообразие видового состава микромицетов обнаружено в контрольном варианте опыта за 2 года исследований. В микробном блоке данного образца отмечены представители сапротрофной группы – микромицеты родов *Mucor* spp. (2,5–3,0 тыс. КОЕ на 1 г абсолютно сухой почвы), *Rhizopus* spp. (2,5–3,0 тыс. КОЕ/1 г), условно-супрессивной группы – микромицет *Penicillium* spp. (1,0–4,0 тыс. КОЕ), и условно патогенной и патогенной группы грибы родов *Alternaria* spp. (1,5–2,5 тыс. КОЕ), *Verticillium* spp. (0,5 тыс. КОЕ) и *Helminthosporium* spp. (единичные колонии).

Таблица 2
Изменение влажности, кислотности и содержания органического вещества в почве под влиянием табачной пыли и микробных смесей, внесенных в качестве почвоудобрительного средства

Вариант опыта	Относительная влажность почвы, %		pH _{водн}	Гумус, %
	1-й отбор	2-й отбор		
2020 год				
Контроль	9,9	12,6	6,0	4,0
ТП 5 т/га	14,6	16,7	6,7	4,8
ТП 8 т/га	11,3	14,0	6,8	4,9
Пробиокс Агро	10,7	13,5	6,3	4,2
Стимикс Компост	10,4	13,2	6,4	4,4
Геостим	10,8	13,8	6,3	4,2
ТП 5 т/га + Пробиокс Агро	13,6	18,3	6,5	5,1
ТП 8 т/га + Пробиокс Агро	13,9	19,9	6,6	5,3
ТП 5 т/га + Стимикс Компост	12,5	17,6	6,9	5,1
ТП 8 т/га + Стимикс Компост	12,9	18,1	6,5	5,2
ТП 5 т/га + Геостим	15,1	19,6	6,8	5,1
ТП 8 т/га + Геостим	16,5	20,9	6,5	5,2
НСР ₀₅	0,61	0,78	0,26	0,23
2021 год				
Контроль	17,1	18,7	6,1	4,7
ТП 5 т/га	22,9	23,5	6,7	5,2
ТП 8 т/га	21,1	22,4	6,8	5,5
Пробиокс Агро	19,2	21,2	6,3	5,0
Стимикс Компост	18,4	19,2	6,4	5,1
Геостим	20,7	22,0	6,3	5,1
ТП 5 т/га + Пробиокс Агро	22,9	23,3	6,8	5,4
ТП 8 т/га + Пробиокс Агро	24,2	25,5	6,9	5,5
ТП 5 т/га + Стимикс Компост	21,4	22,1	6,9	5,2
ТП 8 т/га + Стимикс Компост	23,2	24,4	7,0	5,3
ТП 5 т/га + Геостим	18,8	19,8	6,8	5,3
ТП 8 т/га + Геостим	19,8	20,7	6,9	5,5
НСР ₀₅	1,08	1,16	0,22	0,34

Table 2

Changing of soil's moisture content, its acidity and content of organic matter after utilizing tobacco dust and microbial mixtures added as fertilizers

Experiment variant	Relative soil moisture, %		pH aqueous	Humus, %
	1 selection	2 selection		
2020				
Control	9.9	12.6	6.0	4.0
TD 5 t/ha	14.6	16.7	6.7	4.8
TD 8 t/ha	11.3	14.0	6.8	4.9
Probioks Agro	10.7	13.5	6.3	4.2
Stimiks Kompost	10.4	13.2	6.4	4.4
Geostim	10.8	13.8	6.3	4.2
TD 5 t/ha + Probioks Agro	13.6	18.3	6.5	5.1
TD 8 t/ha + Probioks Agro	13.9	19.9	6.6	5.3
TD 5 t/ha + Stimiks Kompost	12.5	17.6	6.9	5.1
TD 8 t/ha + Stimiks Kompost	12.9	18.1	6.5	5.2
TD 5 t/ha + Geostim	15.1	19.6	6.8	5.1
TD 8 t/ha + Geostim	16.5	20.9	6.5	5.2
LSD ₀₅	0.61	0.78	0.26	0.23
2021				
Control	17.1	18.7	6.1	4.7
TD 5 t/ha	22.9	23.5	6.7	5.2
TD 8 t/ha	21.1	22.4	6.8	5.5
Probioks Agro	19.2	21.2	6.3	5.0
Stimiks Kompost	18.4	19.2	6.4	5.1
Geostim	20.7	22.0	6.3	5.1
TD 5 t/ha + Probioks Agro	22.9	23.3	6.8	5.4
TD 8 t/ha + Probioks Agro	24.2	25.5	6.9	5.5
TD 5 t/ha + Stimiks Kompost	21.4	22.1	6.9	5.2
TD 8 t/ha + Stimiks Kompost	23.2	24.4	7.0	5.3
TD 5 t/ha + Geostim	18.8	19.8	6.8	5.3
TD 8 t/ha + Geostim	19.8	20.7	6.9	5.5
LSD ₀₅	1.08	1.16	0.22	0.34

В образцах почвы, где вносили табачную пыль в дозах 5 и 8 т/га, выявлено минимальное количество микромицетов. В 2020 г. обнаружены грибы родов *Humicola* spp. (2,5 тыс. КОЕ) и *Alternaria* spp. (единичные колонии), в 2021 г. грибы не обнаружены.

При совместном применении табачной пыли и микробных биодеструкторов по результатам 2020–2021 гг. отмечается снижение видового разнообразия грибов и количества их колоний, также выделен микромицет, который оказывает положительное влияние на оздоровление почвы, – *Humicola* spp. относящийся к облигатным сапротрофам. Данный гриб постоянно присутствует в почве и играет важную роль в утилизации послеуборочных остатков предшествующих культур в севообороте, являющихся резерваторами различной фитопатогенной инфекции, и считается одним из лучших деструкторов растительных остатков. Также при совместном применении табачной пыли (5 т/га) и препарата «Стимикс Компост» и табачной пыли (8 т/га) совместно с препаратом «Геостим» отмечается появление колоний условно патогенных грибов (гемибиотрофы) *Trichothecium* spp., *Cladosporium* spp.,

выполняющих в почве двоякую функцию. С одной стороны, попадая в почву, вместе с послеуборочными остатками они формируют стартовую популяцию, участвующую в трансформации органического вещества, а с другой стороны, накапливают огромный запас почвенной инфекции. Также отмечается появление грибов рода *Trichoderma* spp., положительно влияющих на оздоровление почвы.

Для изучения влияния табачной пыли, примененной в качестве органического удобрения, способом поверхностного компостирования на урожайность сельскохозяйственных культур в 2020 г. на участки опыта были высажены растения перца горького сорта Бараний рог. На фоне табачной пыли, примененной в чистом виде (5 и 8 т/га), прибавка к урожайности составила 10,0–13,9 % (рис. 1). В вариантах, где в почву вносили табачную пыль совместно с микробными деструкторами, прибавка к урожайности достигла 12,4–31,8 % (НСР₀₅ = 1,62). В вариантах опыта, где вносили биопрепараты в чистом виде при невысокой влажности почвы, прибавка оказалась несущественной, кроме варианта с «Пробиоксом Агро», и составила 3,9–6,6 %.

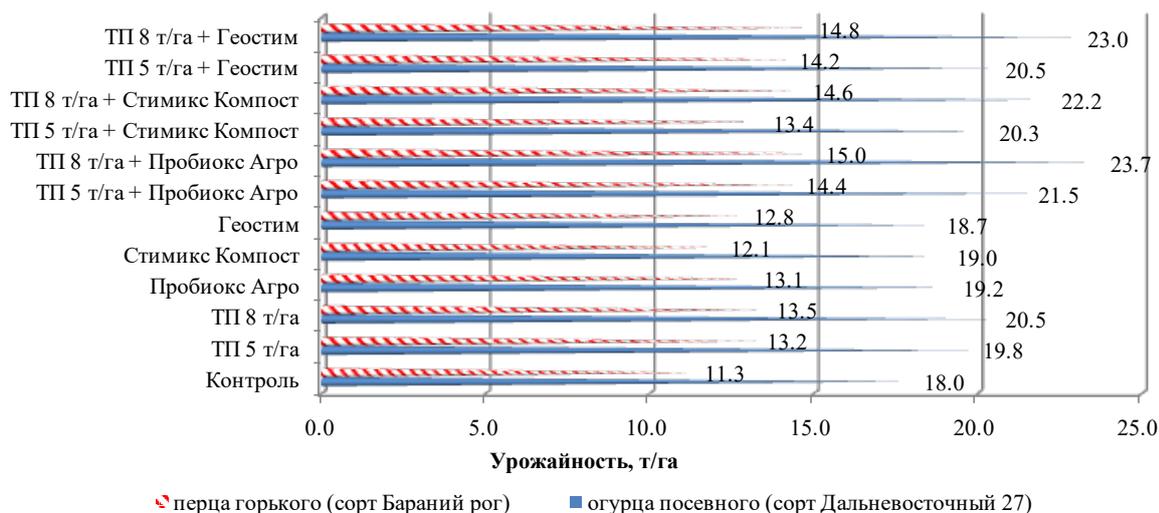


Рис. 1. Влияние табачной пыли (ТП), примененной в качестве почвоудобрительного средства, на урожайность перца горького (сорт Бараний рог, 2020 г.) и огурца посевогого (сорт Дальневосточный 27, 2021 г.).

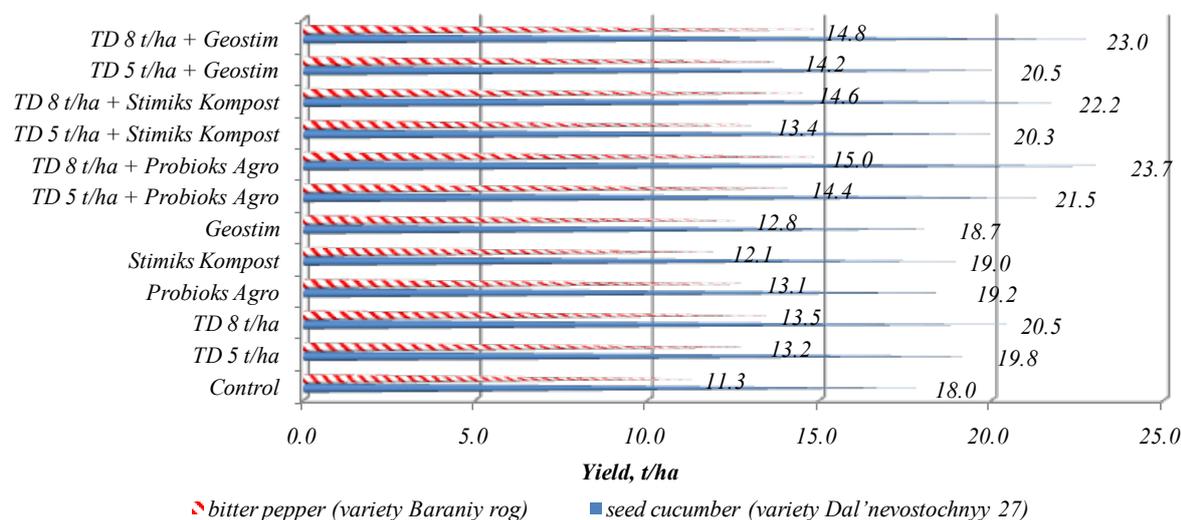


Fig. 1. Effect of tobacco dust (TD), added as soil fertilizer on productivity of bitter pepper (variety Baraniy rog) and seed cucumber (variety Dal'nevostochnyy 27)

В 2021 году в опыте были высеяны растения огурца посевогого сорта Дальневосточный 27. В результате установлена существенная прибавка к урожайности на всех вариантах опыта ($HC_{P_{05}} = 0,78$). Внесение табачной пыли в чистом виде (5 и 8 т/га) позволило получить прибавку к урожайности 17–20 %. В вариантах, где в почву вносили табачную пыль совместно с микробными деструкторами, прибавка к урожайности составила 20–33 %. Микробные смеси, внесенные в почву, способствуют увеличению урожайности огурца на 7–16 %. Лучшие результаты в опыте по всем показателям получены при использовании табачной пыли в качестве почвоудобрительного средства в дозе 8 т/га совместно с микробными смесями.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

В результате проведенных исследований в период 2020–2021 гг. установлено, что способ поверхностного компостирования отхода табачного производства – табачной пыли совместно с микро-

биологическими смесями – является доступным и экологичным направлением по восстановлению плодородия почвы.

Внесение в почву табачной пыли в дозах 5–8 т/га совместно с деструкторами «Стимикс Компост», «Пробиокс Агро» и «Геостим» способствует улучшению агрохимических процессов в почве на фоне как достаточного (2021 год), так и недостаточного увлажнения (2020 год). При этом наблюдается повышение в почве аммиачного азота на 65–207 %, нитратного – на 83–225 %, доступного фосфора – на 21–107 %, обменного калия – на 80–194 %, нитрифицирующей способности почвы – на 70–194 %, интенсивности процесса разложения целлюлозы – на 27–133 %, дыхания почвы – на 61–129 %. Лучшие результаты по поверхностному компостированию табачной пыли получены на фоне более высокой влагообеспеченности почвы в 2021 г. (ГТК = 1,38), в 2020 году ГТК = 0,87.

Установлено повышение влагоудерживающей способности почвы в вариантах опыта с табачной пылью и деструкторами (влажность за период исследований составила 18,4–25,5 %, в контрольном варианте – 17,1–18,7 %).

Определено повышение содержания в почве органического вещества (гумуса) до 4,2–5,5 % за 2 года исследований, на контроле – 4,0–4,7%.

Установлен оздоравливающий эффект способа поверхностного компостирования табачной пыли совместно с микробиологическими препаратами для почвы. Микологический анализ выявил снижение

заселения почвы патогенными микромицетами в вариантах опыта с табачным отходом и появление гриба-супрессора *Trichoderma* spp.

В результате проведенных опытов установлена существенная прибавка к урожайности на фоне применения отходов табачного производства. Прибавка к урожайности перца горького (сорт Бараний рог), высаженного на фоне смеси табачной пыли и био-деструкторов, составила 12–32 % (2020 год), огурца посевого (сорт Дальневосточный 27) – 20–33 %.

В дальнейшем планируется изучить процесс компостирования отходов табачного производства в буртах для получения органического удобрения.

Библиографический список

1. Sifola M. I., et al. Potential of pre-harvest wastes of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) crops, grown for smoke products, as source of bioactive compounds (phenols and flavonoids) // Sustainability. 2021. Vol. 13, No. 4. Article number 2087. DOI: 10.3390/su13042087.
2. Banožić M., et al. Optimization of MAE for the separation of nicotine and phenolics from tobacco waste by using the response surface methodology approach // Molecules. 2021. Vol. 26, No. 14. Article number 4363. DOI: 10.3390/molecules26144363.
3. Dovorogwa H., Harding K. Exploring the Use of Tobacco Waste as a Metal Ion Adsorbent and Substrate for Sulphate-Reducing Bacteria during the Treatment of Acid Mine Drainage // Sustainability. 2022. Vol. 14, No. 21. Article number 14333. DOI: 10.3390/su142114333.
4. Ahmed H. E., et al. Cultivation of Canola (*Brassica napus* L.) using composted agro-industrial waste // Egyptian Journal of Chemistry. 2019. Vol. 62, No. 9. Pp. 1637–1647. DOI: 10.21608/EJCHEM.2019.7256.1592.
5. Ayilara M. S., et al. Waste management through composting: Challenges and potentials // Sustainability. 2020. Vol. 12, No. 11. Article number 4456. DOI: 10.3390/su12114456.
6. Delibacak S., Ongun A. R. Influence of composted tobacco waste and farmyard manure applications on the yield and nutrient composition of lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata) // Eurasian Journal of Soil Science. 2016. Vol. 5, No. 2. Pp. 132–138. DOI: 10.18393/ejss.2016.2.132-138.
7. Cercioglu M. The Impact of Soil Conditioners on Some Chemical Properties of Soil and Grain Yield of Corn (*Zea Mays* L.) // Journal of Agricultural Sciences. 2019. No. 25 (2). Pp. 224–231. DOI: 10.15832/ankutbd.399164.
8. Abu T. The cigarette factory waste vermicompost effect of Cucumis melo // International Journal of Advances in Engineering & Technology. 2013. Vol. 6, Iss. 5. Pp. 1942–1947.
9. Binh T. N., Duyen H. D., Nam B. H., Thang T. D., Paul M., Dung T. H., Son T. C. Composted tobacco waste increases the yield and organoleptic quality of leaf mustard // Agrosystems, Geosciences & Environment. 2022. Vol. 5, No. 3. DOI: 10.1002/agg2.20283.
10. Bangxi Z., Rongxiu Y., Yi T., Beibei F., et al. Evaluation of Maturity and Greenhouse Gas Emission in Co-Composting of Chicken Manure with Tobacco Powder and Vinasse/Mushroom Bran // Processes. 2021. Vol. 9, Iss. 12, Pp. 2105–2115.
11. Bangxi Z., Tianhong F., Chung-Yu G., Shihao C., Beibei F., Yi T., Wenhai L., Quanquan W., Guoxue L., Yutao P. Environmental Life Cycle Assessments of Chicken Manure Compost Using Tobacco Residue, Mushroom Bran, and Biochar as Additives // Sustainability. 2022. Vol. 14 (9). Pp. 49–76. DOI: 10.3390/su14094976.
12. Tzavara S., Darras A. I., Assimakopoulou A. Tobacco dust waste as an alternative medium to grow geranium (*Pelargonium × hortorum*) plants // Advances in Horticultura Science. 2019. No. 33 (2). Pp. 295–298. DOI: 10.13128/ahs-23986.
13. Szwed A., Bohacz J. Enzymatic activity and certain chemical properties of grey-brown podzolic soil (haplic luvisol) amended with compost of tobacco wastes // Archives of Environmental Protection. 2014. Vol. 40, No. 3. Pp. 61–73.
14. Marino J. T., Márcio H. L., Clesio G., Leandro B., Claudio H. K. Land disposal potential of tobacco processing residues // Ciência Rural. 2011. Vol. 41, No. 2. Pp. 236–241.
15. Hossain M. M. Tobacco dust combined with fertilizers improves the soil health and profit of rice cultivation in silty loam soil of Bangladesh // Journal of Agriculture, Food and Environment (JAFE). 2021. Vol. 2, №. 1. Pp. 45–49. DOI: 10.47440/JAFE.2021.2108.

16. Sifola M. I., Carrino L., Cozzolino E., del Piano L., Graziani G., Ritieni A. Potential of pre-harvest wastes of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) crops, grown for smoke products, as source of bioactive compounds (phenols and flavonoids) // *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No. 4. Article number 2087. DOI: 10.3390/su13042087.

17. Hüseyin H. K., Nur O. Effects of Tobacco Waste and Its Compost on The Health of a Typic Xerofluvent Soil and The Yield of Paprika (*Capsicum annuum* L.) // *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*. 2020. Vol. 4, No. 2. Pp. 319–345. DOI: 10.46291/ISPECJASvol4iss2pp184-210.

18. Плотникова Т. В., Сидорова Н. В. Возможность использования отходов табачного производства в качестве органического удобрения // Сборник научных трудов Кубанского государственного аграрного университета. Краснодар, 2013. С. 167–173.

19. Плотникова Т. В., Саломатин В. А., Егорова Е. В. Использование отходов табачной промышленности в качестве органического удобрения // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2017. № 4. С. 54–56.

20. Патент № 2710727 Российская Федерация. Способ повышения плодородия почвы с использованием смеси табачной пыли и птичьего помета / Т. В. Плотникова, В. А. Саломатин, Е. В. Егорова, Н. В. Сидорова. № 2019107451; заявл. 15.03.2019; опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1.

21. Патент № 2646053 Российская Федерация. Способ повышения плодородия почв с использованием табачной пыли / Т. В. Плотникова, В. А. Саломатин, И. И. Мурзинова, Е. В. Егорова. № 2017114682; заявл. 26.04.2017; опубл. 01.03.2018, Бюл. №7.

22. Сидорова Н. В., Егорова Е. В., Плотникова Т. В. Влияние совместного применения табачной пыли и дефекационной грязи на плодородие чернозема выщелоченного и продуктивность перца горького в условиях Краснодарского края // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2022. № 1 (94). С. 143–151. DOI: 10.21515/1999-1703-94-143-151.

Об авторах:

Татьяна Викторовна Плотникова, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующая лабораторией агротехнологии, Всероссийский научно-исследовательский институт табака, махорки и табачных изделий, Краснодар, Россия; ORCID 0000-0003-2543-3497, AuthorID 636531. *E-mail: agrotobacco@mail.ru*

Вадим Александрович Саломатин, доктор экономических наук, директор, Всероссийский научно-исследовательский институт табака, махорки и табачных изделий, Краснодар, Россия; ORCID 0000-0001-7197-2964, AuthorID 673422. *E-mail: vniitti123@mail.ru*

Наталья Владимировна Сидорова, старший научный сотрудник лаборатории агротехнологии, Всероссийский научно-исследовательский институт табака, махорки и табачных изделий, Краснодар, Россия; ORCID 0000-0002-5918-5180, AuthorID 700274. *E-mail: agrotobacco@mail.ru*

References

1. Sifola M. I., et al. Potential of pre-harvest wastes of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) crops, grown for smoke products, as source of bioactive compounds (phenols and flavonoids). *Sustainability*. 2021; 13 (4): 2087. DOI: 10.3390/su13042087.

2. Banožić M., et al. Optimization of MAE for the separation of nicotine and phenolics from tobacco waste by using the response surface methodology approach. *Molecules*. 2021; 26 (14): 4363. DOI: 10.3390/molecules26144363.

3. Dovorogwa H., Harding K. Exploring the Use of Tobacco Waste as a Metal Ion Adsorbent and Substrate for Sulphate-Reducing Bacteria during the Treatment of Acid Mine Drainage. *Sustainability*. 2022; 14 (21): 14333. DOI: 10.3390/su142114333.

4. Ahmed H. E., et al. Cultivation of Canola (*Brassica napus* L.) using composted agro-industrial waste. *Egyptian Journal of Chemistry*. 2019; 62 (9): 1637–1647. DOI: 10.21608/EJCHEM.2019.7256.1592.

5. Ayilara M. S., Olanrewaju O. S., Babalola O. O., Odeyemi O. Waste management through composting: Challenges and potentials. *Sustainability*. 2020; 12 (11): 4456. DOI: 10.3390/su12114456.

6. Delibacac S., Ongun A. R. Influence of composted tobacco waste and farmyard manure applications on the yield and nutrient composition of lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Eurasian Journal of Soil Science*. 2016; 5 (2): 132–138. DOI: 10.18393/ejss.2016.2.132-138.

7. Cercioglu M. The Impact of Soil Conditioners on Some Chemical Properties of Soil and Grain Yield of Corn (*Zea Mays* L.). *Journal of Agricultural Sciences*. 2019; 25 (2): 224–231. DOI: 10.15832/ankutbd.399164.

8. Abu T. The cigarette factory waste vermicompost effect of Cucumis melol. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. 2013; 6 (5): 1942–1947.

9. Binh T. N., Duyen H. D., Nam B. H., Thang T. D., Paul M., Dung T. H., Son T. C. Composted tobacco waste increases the yield and organoleptic quality of leaf mustard. *Agrosystems, Geosciences & Environment*. 2022; 5 (3). DOI: 10.1002/agg2.20283.
10. Bangxi Z., Rongxiu Y., Yi T., Beibei F. et al. Evaluation of Maturity and Greenhouse Gas Emission in Co-Composting of Chicken Manure with Tobacco Powder and Vinasse/Mushroom Bran. *Processes*. 2021; 9 (12): 2105–2115. DOI: 10.3390/pr9122105.
11. Bangxi Z., Tianhong F., Chung-Yu G., Shihao C., Beibei F., Yi T., Wenhai L., Quanquan W., Guoxue L., Yutao P. Environmental Life Cycle Assessments of Chicken Manure Compost Using Tobacco Residue, Mushroom Bran, and Biochar as Additives. *Sustainability*. 2022; 14 (9): 49–76. DOI: 10.3390/su14094976.
12. Tzavara S., Darras A.I., Assimakopoulou A. Tobacco dust waste as an alternative medium to grow geranium (*Pelargonium × hortorum*) plants. *Advances in Horticultural Science*. 2019; 33 (2): 295–298. DOI: 10.13128/ahs-23986.
13. Szwed A., Bohacz J. Enzymatic activity and certain chemical properties of grey-brown podzolic soil (haplic luvisol) amended with compost of tobacco wastes. *Archives of environmental protection*. 2014; 40 (3): 61–73.
14. Marino J. T., Márcio H. L., Clesio G., Leandro B., Claudio H. K. Land disposal potential of tobacco processing residues. *Ciência Rural*. 2011; 41 (2): 236–241.
15. Hossain M. M. Tobacco dust combined with fertilizers improves the soil health and profit of rice cultivation in silty loam soil of Bangladesh. *Journal of Agriculture, Food and Environment (JAFE)*. 2021; 2 (1): 45–49. DOI: 10.47440/JAFE.2021.2108.
16. Sifola M. I., Carrino L., Cozzolino E., del Piano L., Graziani G., Ritieni A. Potential of pre-harvest wastes of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) crops, grown for smoke products, as source of bioactive compounds (phenols and flavonoids). *Sustainability*. 2021; 13 (4): 2087. DOI: 10.3390/su13042087.
17. Hüseyin H. K., Nur O. Effects of Tobacco Waste and Its Compost on The Health of a Typic Xerofluvent Soil and The Yield of Paprika (*Capsicum annuum* L.). *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*. 2020; 4 (2): 319–345. DOI: 10.46291/ISPECJASvol4iss2pp184-210.
18. Plotnikova T. V., Sidorova N. V. Possibility of using tobacco production waste as an organic fertilizer. *Collection of scientific papers of Kuban State Agrarian University*. Krasnodar, 2013. Pp. 167–173.
19. Plotnikova T. V., Salomatina V. A., Egorova E. V. Use of tobacco industry waste as an organic fertilizer. *International Agricultural Journal*. 2017; 4: 54–56.
20. Patent No. 2710727 Russian Federation. Method of increasing soil fertility using a mixture of tobacco dust and poultry manure / T. V. Plotnikova, V. A. Salomatina, E. V. Egorova, N. V. Sidorova. No. 2019107451; stated 15.03.2019; published 10.01.2020, Bulletin No. 1. (In Russ.)
21. Patent No. 2646053 Russian Federation. Method of increasing soil fertility using tobacco dust / T. V. Plotnikova, V. A. Salomatina, I. I. Murzinova, E. V. Egorova. № 2017114682; stated. 26.04.2017; published. 01.03.2018, Bulletin № 7. (In Russ.)
22. Sidorova N. V., Egorova E. V., Plotnikova T. V. Effect of joint application of tobacco dust and defecation mud on fertility of chernozem leached chernozem and productivity of bitter pepper in the conditions of the Krasnodar region. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2022; 1 (94): 143–151. DOI: 10.21515/1999-1703-94-143-151. (In Russ.)

Authors' information:

Tatyana V. Plotnikova, candidate of agricultural sciences, head of agrotechnology laboratory, All-Russian scientific research institute of tobacco, makhorka and tobacco products, Krasnodar, Russia; ORCID 0000-0003-2543-3497, AuthorID 636531. *E-mail: agrotobacco@mail.ru*

Vadim A. Salomatina, doctor of economic sciences, director, All-Russian scientific research institute of tobacco, makhorka and tobacco products, Krasnodar, Russia; ORCID 0000-0001-7197-2964, AuthorID 673422. *E-mail: vniitti123@mail.ru*

Natalya V. Sidorova, senior researcher, laboratory of agrotechnology, All-Russian scientific research institute of tobacco, makhorka and tobacco products, Krasnodar, Russia; ORCID 0000-0002-5918-5180, AuthorID 700274. *E-mail: agrotobacco@mail.ru*

Выявление патогенов картофеля с использованием различных методов диагностики

А. Р. Пухаев, И. О. Газданова✉

Федеральный научный центр «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Владикавказ, Россия

✉E-mail: gazdanovaira2020@gmail.com

Аннотация. Болезни картофеля имеют далеко идущие последствия для сельскохозяйственной отрасли, поскольку они не только снижают продуктивность и качество урожая картофеля, но и негативно влияют на средства к существованию фермеров. **Цель** исследований – обнаружение и идентификация фитопатогенов картофеля методами визуальной оценки, полимеразной цепной реакции (ПЦР) в реальном времени и молекулярно-генетического скрининга на гены устойчивости к фитопатогенам. **Методы.** Визуальную оценку каждого сортообразца картофеля на основные грибные, вирусные и бактериальные болезни проводили в период полных всходов, при высоте растений 15–20 см и в фазу полного цветения. Рассчитывали процент растений, пораженных болезнями, по отношению к общему количеству осмотренных растений. Диагностика устойчивости образцов картофеля к болезням проведена на основе ПЦР. Для молекулярного скрининга картофеля использовались ДНК-маркеры генов устойчивости к фитопатогенам *YES3-3A*, *RYSC3*, *Ry186*, *TG 689*, *Gro1-4-1*, *Gpa2-2*, *PVX*. Зараженность образцов методом ПЦР-РВ (в реальном времени) определяли с использованием наборов реагентов компании ООО «Синтол» Potato Virus X и Potato Virus Y-РВ, Potato spindle tuber viroid-РВ, *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus*-РВ, *Dickeya* spp.-РВ. **Результаты.** По результатам визуальной оценки отмечено отсутствие симптомов морщинистой мозаики у 20 % гибридов, крапчатой мозаики – у 40 %, мозаичного закручивания листьев – у 96 %, скручивания листьев – у 72 % гибридов, черной ножки – у 100 %, фитофтороза – у 88 %, альтернариоза – у 84 %, ризоктониоза – у 96 % гибридов. По результатам анализа ПЦР-РВ в 21 образце обнаружен вирус Y. **Научная новизна** состоит в диагностике вирусов картофеля с использованием традиционной визуальной оценки с применением молекулярных маркеров, которые позволяют выявить корреляционную связь между данными методами.

Ключевые слова: картофель, гибрид, болезни, вирус, анализ, ген, нематода, вирус X, Y, фитофтороз, черная ножка

Для цитирования: Пухаев А. Р., Газданова И. О. Выявление патогенов картофеля с использованием различных методов диагностики // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 08. С. 1007–1017. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1007-1017>.

Дата поступления статьи: 02.04.2024, **дата рецензирования:** 21.05.2024, **дата принятия:** 17.06.2024.

Identification of potato pathogens using different diagnostic methods

A. R. Pukhaev, I. O. Gazdanova✉

Federal Scientific Center “Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Vladikavkaz, Russia

✉E-mail: gazdanovaira2020@gmail.com

Abstract. Potato diseases have far reaching implications for the agricultural industry as they not only reduce productivity and quality of potato crop but also negatively affect the livelihood of farmers. **The purpose** of the studies detection and identification of potato phytopathogens by visual assessment, real time polymerase chain reaction (PCR) and molecular genetic screening for phytopathogen resistance genes. **Methods.** Visual evaluation of each

potato variety for major fungal, viral and bacterial diseases was carried out during the period of full sprouting, at plant height of 15–20 cm and in the phase of full flowering. The percentage of plants affected by diseases in relation to the total number of inspected plants was calculated. Diagnosis of resistance of potato samples to diseases was carried out on the basis of PCR. DNA markers of phytopathogen resistance genes YES3-3A, RYSC3, Ry186, TG 689, Gro1-4-1, Gpa2-2, PVX were used for molecular screening of potato. Infection of samples by PCR-RV (real-time) was determined using reagent kits of Syntol LLC Potato Virus X and Potato Virus Y, Potato spindle tuber viroid-PB, *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus*-PB, *Dickeya* spp-PB. **Results.** According to the results of visual evaluation, the absence of symptoms of wrinkle mosaic in 20 % of hybrids, mottle mosaic in 40 %, mosaic leaf curl in 96 %, leaf curl in 72 hybrids, black leg in 100 %, phytophthorosis in 88 % of hybrids, alternaria in 84 %, rhizoctoniosis in 96 % of hybrids were observed. According to the results of PCR-RV analysis in 21 samples detected virus Y. **The scientific novelty** consists in the diagnosis of potato viruses using traditional visual assessment with the use of molecular markers that allow to identify correlation relationship between trhis methods.

Keywords: potato, hybrid, diseases, virus, analysis, gene, nematode, virus X, Y, phytophthorosis, black leg

For citation: Pukhaev A. R., Gazdanova I. O. Identification of potato pathogens using different diagnostic methods. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (08): 1007–1017. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1007-1017>. (In Russ.)

Date of paper submission: 02.04.2024, **date of review:** 21.05.2024, **date of acceptance:** 17.06.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

Картофель (*Solanum tuberosum* L.) – важная основная культура во всем мире, играющая решающую роль в удовлетворении пищевых потребностей миллионов людей и вносящая существенный вклад в мировую экономику [1]. [2]. Несмотря на важность выращивания картофеля, существует ряд проблем – в первую очередь из-за различных болезней, которые могут привести к значительному снижению урожая и его качества. Раннее и точное выявление этих болезней имеет жизненно важное значение для реализации эффективных стратегий управления и обеспечения устойчивого производства этой культуры [3; 4]. Нехватка продовольствия становится все более острой проблемой в развивающихся странах, где картофель служит основным продуктом питания в течение всего года. Снижение производства картофеля в первую очередь связано с воздействием различных заболеваний, таких как фитофтороз, вирусные болезни, кольцевая гниль, черная ножка, нематодозы, которые приводят к значительным потерям урожая и имеют существенные экономические последствия. Раннее и точное обнаружение проявления болезней в сельскохозяйственных культурах является ключом к снижению как качественных, так и количественных потерь урожая [5; 6].

Картофель является гетеротетраплоидным растением, и вывести сорта с высокой вирусостойчивостью с помощью традиционных методов селекции довольно сложно. Традиционные методы визуальной диагностики болезней картофеля трудоемки, требуют много времени и часто сопряжены с риском ошибок [7]. Быстрая диагностика и точная идентификация этих заболеваний имеют решающее значение для эффективного контроля и профилак-

тики болезней. Молекулярные методы быстрого обнаружения и идентификации возбудителей являются мощными инструментами диагностики заболеваний [8].

Эра разработки и применения молекулярных маркеров началась в 1980-х годах. За этой вехой в геномных исследованиях растений десять лет спустя последовало создание ДНК-маркеров на основе ПЦР. С тех пор сообщалось о применении многих молекулярных маркеров в различных аспектах молекулярной селекции и геномики растений. Маркер-опосредованная селекция (МОС) (англ. MAS – marker assisted selection или marker aided selection) – это метод молекулярной селекции, основной принцип которого заключается в идентификации тесного сцепления между маркером и геном, контролирующим признак, и использовании ассоциаций «маркер – признак» в практических целях для создания новых сортов и селекционных линий. МОС в основном используется в селекционном процессе для идентификации подходящих доминантных или рецессивных аллелей при выявлении и подборе родительских форм, обладающих наилучшими характеристиками, и при идентификации наиболее благоприятных особей в сегрегирующемся гибридном потомстве [11]. Применение метода МОС в сочетании с методами классической селекции существенно сокращает размер выборки, количество этапов и время, необходимое для создания новых генотипов/сортов растений [12; 13].

Методология и методы исследования (Methods)

Полевой эксперимент проводился на опытном поле ООО «ФАТ АГРО» пригородного района РСО-Алания. Почва опытного поля представлена выщелоченным черноземом, подстилаемый галечником. Содержание гумуса – от 4,2 до 5,5 %. Реак-

ция почвенного раствора – слабкокислая или близкая к нейтральной (5,7–6,4). Средняя многолетняя норма осадков, выпадающих за год, составляет 748 мм. Сезонная их динамика постепенно нарастает от зимы к лету, достигая максимума в июне (143 мм). В дальнейшем выпадение осадков снижается, достигая минимума в декабре – феврале (20–27 мм). Относительная влажность воздуха в зоне за вегетационный период составляет около 74 %.

Агрометеорологические условия вегетационного периода 2023 года были неоптимальными для роста и развития растений картофеля.

Пораженность растений картофеля основными грибными, вирусными и бактериальными болезнями оценивали путем визуального обследования каждого сортообразца. Исследования проводили в период полных всходов, при высоте растений 15–20 см и фазу полного цветения. Рассчитывали процент растений, пораженных болезнями, по отношению к общему количеству осмотренных растений.

Исследования с применением техник молекулярной биологии выполнялись на базе Лаборатории молекулярно-генетических исследований сельскохозяйственных растений ВНИЦ РАН с использованием приборно-аппаратной линии для проведения ПЦР-анализа. Для выделения растительной ДНК использовали листья образцов картофеля, собранные в период цветения.

Оценка содержания патогенов в образцах картофеля осуществлялась на основе выявления РНК методом ПЦР-анализа в реальном времени. Выделение вирусной РНК из собранных листьев картофеля проводили с использованием набора «Фитосорб-П» на магнитных частицах компании ООО «Синтол». Зараженность образцов определяли с использованием наборов реагентов Potato Virus X и Potato Virus Y-PV, Potato spindle tuber viroid-PV, *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus*-PV, *Dickeya* spp.-PV. Интерпретация результатов ОТ-ПЦР-PV была проведена в программе АНК-48 по инструкции ООО «Синтол».

Молекулярно-генетический анализ селекционного питомника на устойчивость к фитопатогенам проводили с использованием молекулярных маркеров генов устойчивости картофеля к золотистой (*Globodera rostochiensis*) и бледной (*Globodera pallida*) нематодам, вирусам X и Y. Геномную ДНК выделяли набором реагентов «ДНК-Экстра-3» (компания «Синтол», Россия) для выделения ДНК из тканей растений согласно инструкции, прилагаемой к набору.

Аmplификацию ДНК проводили в термоциклере MiniAmp Plus (Thermo FS). Стандартная реакционная смесь объемом 25 мкл содержала 10X буфер для Taq ДНК-полимеразы (ООО «Синтол»), 2,5 мМ смесь dNTP (компания ООО «Диаэм»), 25 мМ водный раствор хлорида магния (Fermentas LLC),

5–10 пкмоль каждого праймера (ООО «Синтол»), 20 нг пробы ДНК и 13–10 мкл автоклавированной бидистиллированной воды. Присутствие специфического фрагмента детектировали электрофоретическим разделением продуктов амплификации в 1,5-процентном агарозном геле, окрашенном бромистым этидием. Маркеры основных доминантных генов устойчивости к фитопатогенам картофеля для молекулярного скрининга были отобраны на основе анализа литературных данных [14–16].

Цель работы – выявление заболеваний картофеля с использованием различных методов диагностики фитопатогенов.

Результаты (Results)

Создание новых сортов картофеля, сочетающих высокий потенциал урожайности, устойчивости к фитопатогенам и высокой пластичности, является существенным резервом увеличения производства продукции картофелеводства в данном регионе. Важной задачей для селекционеров является выделение сортов картофеля с комплексной устойчивостью к биотическим и абиотическим факторам среды, что связано с большими трудностями в связи с большим разнообразием возбудителей грибных и вирусных заболеваний, а также их рас и штаммов [17]. В период вегетации при высоте растений картофеля 15–25 см и в фазу цветения проведены две визуальных оценки и фито- и сортопрочистки. Данные по результатам оценки гибридов приведены в таблице 1. Развитие растений в период вегетации оценивали по стартовому росту, типу и мощности куста (в баллах), степени устойчивости к вирусным, грибным и бактериальным болезням. Особое внимание уделяли фитофтороустойчивости.

Часть гибридов выбракована из-за сильного отставания в развитии или проявления симптомов поражения ботвы вирусами. В целом же развитие гибридов отмечено как хорошее. В течение вегетации проводились фитопатологический мониторинг устойчивости сортов картофеля к наиболее распространенным заболеваниям и исследования особенностей развития основных болезней в погодных условиях 2023 года в Северо-Кавказском регионе. Оценку осуществляли визуальным методом, оценивая каждое растение в периоды полных всходов, при высоте растений 15–20 см и в период цветения. Рассчитывали процент растений, пораженных болезнями, по отношению к общему количеству.

При визуальной оценке растений в фазу цветения по ботве было отмечено отсутствие симптомов морщинистой мозаики у 20 % гибридов, крапчатой мозаики – у 40 %, мозаичного закручивания листьев – у 96 %, скручивания листьев – у 72 % гибридов, черной ножки – у 100 %, фитофтороза – у 88 % гибридов, альтернариоза – у 84 %, ризоктониоза – у 96 % гибридов (таблица 1).

В процессе оценки по развитию и по степени комплексной устойчивости к основным болезням визуально были отмечены следующие гибриды: 3155-16 (Роко × 88.34/14), 3158-3 (Агрива × 88.34/14), 3155-10 (Роко × 88.34/14), 3155-12 (Роко × 88.34/14), 3155-3 (Роко × 88.34/14), 3158-1 (Агрива × 88.34/14). Все эти гибриды объединяла одна общая

отцовская форма – гибрид 88.34/14, характеризующийся высокой устойчивостью к вирусам и хорошей устойчивостью к фитофторе. Все исследуемые сорта проявили высокую и среднюю устойчивость к фитофторе. Возможно, это связано со сложившимися погодными условиями сезона 2023 года в Северной Осетии.

Таблица 1
Визуальная оценка питомника гибридов II года испытания в фазе цветения 2023 г.

№ полевой 2023 г.	Селекционный номер гибрида	Происхождение	Общая оценка по ботве, балл	Вирусные болезни				Черная ножка, шт.	Фитофтороз, балл	Альтернативный балл	Ризоктониоз, балл
				Морщинистая мозаика, балл	Крапчатость, балл	Мозаичное закручивание, балл	Скручивание, балл				
II-1	3054-1	4546-1 × Фрителла	5–7	9	9	9	9	9	9	7	9
II-2	3055-1	1610-41 × Фрителла	3–5	7	7	9	9	9	9	9	9
II-3	3150-1	Реал × Акжар	1	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
II-4	3064-10	4582-2 × Вымпел	5	9	7–9	9	9	9	9	9	9
II-5	3064-2	4582-2 × Вымпел	3–5	5	5	5	9	9	9	9	9
II-6	3155-10	Роко × 88.34/14	5–7	7–9	7–9	9	9	9	9	9	9
II-7	3155-14	Роко × 88.34/14	5–7	7	7–9	9	9	9	9	9	9
II-8	3155-9	Роко × 88.34/14	1–3	5–7	7–9	9	9	9	9	9	5
II-9	3155-16	Роко × 88.34/14	5–7	9	9	9	9	9	9	9	9
II-10	3155-12	Роко × 88.34/14	5–7	7–9	9	9	9	9	9	9	9
II-11	3155-3	Роко × 88.34/14	5–7	7–9	9	9	9	9	9	9	9
II-12	3155-1	Роко × 88.34/14	5–7	7	7	9	9	9	9	9	9
II-13	3155-2	Роко × 88.34/14	5	7	7–9	9	9	9	9	9	9
II-14	3150-2	Реал × Акжар	3	7	7	9	7	9	9	9	9
II-15	3150-5	Реал × Акжар	1	7	9	9	7	9	9	9	9
II-16	3064-8	4582-2 × Вымпел	5–7	7	7–9	9	9	9	7	7	9
II-17	3158-3	Агрива × 88.34/14	5–7	9	9	9	9	9	9	9	9
II-18	3054-8	4546-1 × Фрителла	3–5	7–9	9	9	7	9	9	7	9
II-19	3054-7	4546-1 × Фрителла	1	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
II-20	3158-1	Агрива × 88.34/14	5–7	9	9	9	9	9	7	9	9
II-21	3064-1	4582-2 × Вымпел	3	7	9	9	7-9	9	9	9	9
II-22	3102-2	Белая ночь × 92.7-26	5	7–9	7–9	9	7	9	9	9	9
II-23	3155-6	Роко × 88.34/14	1	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
II-24	3054-9	4546-1 × Фрителла	5–7	7–9	9	9	7-9	9	9	7	9
II-25	3054-10	4546-1 × Фрителла	5	7–9	5–	9	9	9	9	9	9
II-26	3054-6	4546-1 × Фрителла	5	7–9	7	9	9	9	7	9	9
II-27	3054-5	4546-1 × Фрителла	3–5	5–7	5	9	9	9	9	9	9
II-28	3046-2	Инноватор × 4560-2	1	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
II-29	3046-5	Инноватор × 4560-2	3	7	7–9	9	5–7	9	9	9	9
II-30	3046-6	Инноватор × 4560-2	1	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
II-31	3054-4	4546-1 × Фрителла	1	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о

Table 1

Visual assessment of the nursery of hybrids of the II year of the trial in the flowering phase 2023

No. field 2023	Hybrid selection number	Origin	Total score for haulm, score	Viral diseases				Black foot pcs.	Phytophthora score	Alternariasis, score	Rhizoctoniosis, score
				Wrinkled mosaic, score	Mottling, score	Mosaic twist, score	Torsion, score				
II-1	3054-1	4546-1 × Fritella	5–7	9	9	9	9	9	9	7	9
II-2	3055-1	1610-41 × Fritella	3–5	7	7	9	9	9	9	9	9
II-3	3150-1	Real × Akzhar	1	not found	not found	not found	not found	not found	not found	not found	not found
II-4	3064-10	4582-2 × Vympel	5	9	7–9	9	9	9	9	9	9
II-5	3064-2	4582-2 × Vympel	3–5	5	5	5	9	9	9	9	9
II-6	3155-10	Roko × 88.34/14	5–7	7–9	7–9	9	9	9	9	9	9
II-7	3155-14	Roko × 88.34/14	5–7	7	7–9	9	9	9	9	9	9
II-8	3155-9	Roko × 88.34/14	1–3	5–7	7–9	9	9	9	9	9	5
II-9	3155-16	Roko × 88.34/14	5–7	9	9	9	9	9	9	9	9
II-10	3155-12	Roko × 88.34/14	5–7	7–9	9	9	9	9	9	9	9
II-11	3155-3	Roko × 88.34/14	5–7	7–9	9	9	9	9	9	9	9
II-12	3155-1	Roko × 88.34/14	5–7	7	7	9	9	9	9	9	9
II-13	3155-2	Roko × 88.34/14	5	7	7–9	9	9	9	9	9	9
II-14	3150-2	Real × Akzhar	3	7	7	9	7	9	9	9	9
II-15	3150-5	Real × Akzhar	1	7	9	9	7	9	9	9	9
II-16	3064-8	4582-2 × Vympel	5–7	7	7–9	9	9	9	7	7	9
II-17	3158-3	Agriya × 88.34/14	5–7	9	9	9	9	9	9	9	9
II-18	3054-8	4546 × Fritella	3–5	7–9	9	9	7	9	9	7	9
II-19	3054-7	4546-1 × Fritella	1	not found	not found	not found	not found	not found	not found	not found	not found
II-20	3158-1	Agriya × 88.34/14	5–7	9	9	9	9	9	7	9	9
II-21	3064-1	4582-2 × Vympel	3	7	9	9	7–9	9	9	9	9
II-22	3102-2	Belaya Noch' × 92.7-26	5	7–9	7–9	9	7	9	9	9	9
II-23	3155-6	Roko × 88.34/14	1	not found	not found	not found	not found	not found	not found	not found	not found
II-24	3054-9	4546-1 × Fritella	5–7	7–9	9	9	7–9	9	9	7	9
II-25	3054-10	4546-1 × Fritella	5	7–9	5–7	9	9	9	9	9	9
II-26	3054-6	4546-1 × Fritella	5	7–9	7	9	9	9	7	9	9
II-27	3054-5	4546-1 × Fritella	3–5	5–7	5	9	9	9	9	9	9
II-28	3046-2	Innovator × 4560-2	1	not found	not found	not found	not found	not found	not found	not found	not found
II-29	3046-5	Innovator × 4560-2	3	7	7–9	9	5–7	9	9	9	9
II-30	3046-6	Innovator × 4560-2	1	not found	not found	not found	not found	not found	not found	not found	not found
II-31	3054-4	4546-1 × Fritella	1	not found	not found	not found	not found	not found	not found	not found	not found

Образцы картофеля питомника II года, собранные в фазу цветения во время визуальной оценки гибридов, были продиагностированы на наличие X- и Y-вирусов картофеля и других заболеваний с помощью метода диагностики ПЦР-РВ. По резуль-

татам ПЦР-анализа в исследуемых гибридах не обнаружены нуклеиновые кислоты вируса картофеля X (PVX), вирида веретеновидности клубней картофеля (Potato Spindle Tuber Viroid (PSTVd)), черной ножки (*Dickea spp.*) и кольцевой гнили картофеля (*Clavibacter michiganensis ssp*) (таблица 2).

Таблица 2

ПЦР-диагностика фитопатогенов картофеля II года испытания (2023 год)

Агротехнологии

№ п/п	Селекционный номер гибрида	Происхождение	PVX, цикл	PVY, цикл	PSTVd (вирион веретенивидности клубней картофеля), цикл	Clavibacter michiganensis ssp. (кольцевая гниль), цикл	Dickeya spp. (черная ножка), цикл
1	3054-1	4546-1 × Фрителла	–	–	–	–	–
2	3055-1	1610-41 × Фрителла	–	–	–	–	–
3	3150-1	Реал × Акжар	–	–	–	–	–
4	3064-10	4582-2 × Вымпел	–	36,65	–	–	–
5	3064-2	4582-2 × Вымпел	–	21,1	–	–	–
6	3155-10	Роко × 88.34/14	–	34,39	–	–	–
7	3155-14	Роко × 88.34/14	–	–	–	–	–
8	3155-9	Роко × 88.34/14	–	36,23	–	–	–
9	3155-16	Роко × 88.34/14	–	–	–	–	–
10	3155-12	Роко × 88.34/14	–	36,48	–	–	–
11	3155-3	Роко × 88.34/14	–	36,53	–	–	–
12	3155-1	Роко × 88.34/14	–	–	–	–	–
13	3155-2	Роко × 88.34/14	–	37,27	–	–	–
14	3150-2	Реал × Акжар	–	35,66	–	–	–
15	3150-5	Реал × Акжар	–	–	–	–	–
16	3064-8	4582-2 × Вымпел	–	37,75	–	–	–
17	3158-3	Агрива × 88.34/14	–	36,01	–	–	–
18	3054-8	4546 × Фрителла	–	36,73	–	–	–
19	3054-7	4546-1 × Фрителла	–	36,47	–	–	–
20	3158-1	Агрива × 88.34/14	–	37,86	–	–	–
21	3064-1	4582-2 × Вымпел	–	36,1	–	–	–
22	3102-2	Белая ночь × 92.7-26	–	–	–	–	–
23	3155-6	Роко × 88.34/14	–	23,62	–	–	–
24	3054-9	4546-1 × Фрителла	–	35,28	–	–	–
25	3054-10	4546-1 × Фрителла	–	20,07	–	–	–
26	3054-6	4546-1 × Фрителла	–	–	–	–	–
27	3054-5	4546-1 × Фрителла	–	21,22	–	–	–
28	3046-2	Инноватор × 4560-2	–	23,57	–	–	–
29	3046-5	Инноватор × 4560-2	–	–	–	–	–
30	3046-6	Инноватор × 4560-2	–	34,94	–	–	–
31	3054-4	4546-1 × Фрителла	–	35,37	–	–	–
32	ПКО1	–	31,51	33,42	29,24	33,24	30,10
33	ОКО1	–	–	–	–	–	–

Table 2

PCR diagnosis of potato phytopathogens year of the trial (2023)

No.	Selection number of hybrid	Origin	PVX, cycle	PVY, cycle	PSTVd, cycle	Clavibacter michiganensis ssp., cycle	Dickeya spp., cycle
1	3054-1	4546-1 × Fritella	–	–	–	–	–
2	3055-1	1610-41 × Fritella	–	–	–	–	–
3	3150-1	Real × Akzhar	–	–	–	–	–
4	3064-10	4582-2 × Vympel	–	36.65	–	–	–
5	3064-2	4582-2 × Vympel	–	21.1	–	–	–
6	3155-10	Roko × 88.34/14	–	34.39	–	–	–
7	3155-14	Roko × 88.34/14	–	–	–	–	–
8	3155-9	Roko × 88.34/14	–	36.23	–	–	–

9	3155-16	Roko × 88.34/14	–	–	–	–	–
10	3155-12	Roko × 88.34/14	–	36.48	–	–	–
11	3155-3	Roko × 88.34/14	–	36.53	–	–	–
12	3155-1	Roko × 88.34/14	–	–	–	–	–
13	3155-2	Roko × 88.34/14	–	37.27	–	–	–
14	3150-2	Real × Akzhar	–	35.66	–	–	–
15	3150-5	Real × Akzhar	–	–	–	–	–
16	3064-8	4582-2 × Vympel	–	37.75	–	–	–
17	3158-3	Agriya × 88.34/14	–	36.01	–	–	–
18	3054-8	4546 × Fritella	–	36.73	–	–	–
19	3054-7	4546-1 × Fritella	–	36.47	–	–	–
20	3158-1	Agriya × 88.34/14	–	37.86	–	–	–
21	3064-1	4582-2 × Vympel	–	36.1	–	–	–
22	3102-2	Belaya Noch' × 92.7-26	–	–	–	–	–
23	3155-6	Roko × 88.34/14	–	23.62	–	–	–
24	3054-9	4546-1 × Fritella	–	35.28	–	–	–
25	3054-10	4546-1 × Fritella	–	20.07	–	–	–
26	3054-6	4546-1 × Fritella	–	–	–	–	–
27	3054-5	4546-1 × Fritella	–	21.22	–	–	–
28	3046-2	Innovator × 4560-2	–	23.57	–	–	–
29	3046-5	Innovator × 4560-2	–	–	–	–	–
30	3046-6	Innovator × 4560-2	–	34.94	–	–	–
31	3054-4	4546-1 × Fritella	–	35.37	–	–	–
32	PKO 1	–	31.51	33.42	29.24	33.24	30.10
33	OKO 1	–	–	–	–	–	–

Однако в ходе анализа Y-вирус картофеля (PVY) обнаружен в 21 пробе картофеля. Прослеживается корреляция между высоким содержанием вирусных частиц Y-вируса, проявившихся до 30 цикла при реакции ПРЦ-РТ, в тканях образцов и визуальным проявлением вирусного начала в виде отставания в развитии растений или проявлением симптомов на ботве.

В целом факт наличия вирусной инфекции уже на второй год испытаний гибридов картофеля в поле, а также результаты ранее проведенных исследований свидетельствуют о высоком инфекционном фоне вируса PVY и широком распространении насекомых-переносчиков в условиях агроценозов лесостепной зоны РСО-Алания.

Молекулярно-генетических анализ на наличие генов устойчивости среди гибридов картофеля может существенно повысить эффективность и точность отбора при использовании ДНК-маркеров. С этой целью среди 31 гибрида картофеля из питомника испытания II года был проведен молекулярный скрининг на наличие маркеров генов устойчивости к патогенам.

Для оценки устойчивости к золотистой и бледной картофельной нематод наиболее эффективным считается применение маркеров генов *H1*, *Gro1-4* и *Gpa2*. В результате молекулярно-генети-

ческого анализа установлено, что ген устойчивости к *G. rostochiensis* (*H1*) – маркер *TG 689* – выявлен у 15 генотипов картофеля (таблица 3).

Идентификация в селекционном материале картофеля доминантного аллеля гена *Gro 1-4*, контролирующего устойчивость к пяти патогенам (*Rol-Ro5*) *G. rostochiensis*, выявила, что носителями являются 2 гибрида картофеля – 3155-9 и 3155-12 (Роко × 88.34/14), в родословной которого указан *S. spegazzinii* Bitter, являющийся источником гена *Gro1-4*.

Маркер доминантного гена *Gpa 2*, контролирующей устойчивость к *G. pallida*, идентифицирован в трех гибридах: 3055-1 (1610-41 × Фрителла); 3064 (4582-2 × Вымпел); 3150-5 (Реал × Акжар).

Среди исследуемых образцов картофеля STS-маркер YES3-3A гена *Ry_{sto}*, контролирующей устойчивость к вирусу Y, обнаружен в 6 гибридных образцах картофеля 3055-1 (1610-41 × Фрителла), 3155-16 (Роко × 88.34/14), 3064-8 (4582-2 × Вымпел), 3054-7 (4546-1 × Фрителла), 3064-1 (4582-2 × Вымпел), 3046-2 (Иноватор × 4560-2). Маркер RYSC3 гена *Ry_{adg}* не обнаружен ни в одном образце. Маркер гена устойчивости к PVX – *Rx1* – выявлен у одного генотипа картофеля 3064-10 (4582-2 × Вымпел).

Таблица 3

Скрининг генетических маркеров генов устойчивости в генотипах питомника гибридов II года испытания (2023 год)

Агротехнологии

№ п/п	Селекционный номер гибрида	Происхождение	Наличие ДНК маркеров (маркер/ген)						Общее количество генов, шт.
			TG 689 / ген HI	Gro1-4-1 / ген Gro1-4	Gpa 2-2 / ген Gpa 2	YES3-3A / ген Ry _{so}	RYSC3 / ген Ry _{adg}	PVX / ген Rx1	
			G. <i>rostochiensis</i>	G. <i>pallida</i>	PVY		PVX		
1	3054-1	4546-1 × Фрителла	1	0	0	0	0	0	1
2	3055-1	1610-41 × Фрителла	1	0	1	1	0	0	3
3	3150-1	Реал × Акжар	0	0	0	0	0	0	0
4	3064-10	4582-2 × Вымпел	0	0	1	0	0	1	1
5	3064-2	4582-2 × Вымпел	1	0	0	0	0	0	1
6	3155-10	Роко × 88.34/14	0	0	0	0	0	0	0
7	3155-14	Роко × 88.34/14	1	0	0	0	0	0	1
8	3155-9	Роко × 88.34/14	1	1	0	0	0	0	2
9	3155-16	Роко × 88.34/14	1	0	0	1	0	0	2
10	3155-12	Роко × 88.34/14	1	1	0	0	0	0	2
11	3155-3	Роко × 88.34/14	1	0	0	0	0	0	1
12	3155-1	Роко × 88.34/14	0	0	0	0	0	0	0
13	3155-2	Роко × 88.34/14	0	0	0	0	0	0	0
14	3150-2	Реал × Акжар	0	0	0	0	0	0	0
15	3150-5	Реал × Акжар	0	0	1	0	0	0	1
16	3064-8	4582-2 × Вымпел	1	0	0	1	0	0	2
17	3158-3	Агрива × 88.34/14	1	0	0	0	0	0	1
18	3054-8	4546 × Фрителла	0	0	0	0	0	0	0
19	3054-7	4546-1 × Фрителла	0	0	0	1	0	0	1
20	3158-1	Агрива × 88.34/14	0	0	0	0	0	0	0
21	3064-1	4582-2 × Вымпел	1	0	0	1	0	0	2
22	3102-2	Белая ночь × 92.7-26	0	0	0	0	0	0	0
23	3155-6	Роко × 88.34/14	0	0	0	0	0	0	0
24	3054-9	4546-1 × Фрителла	0	0	0	0	0	0	0
25	3054-10	4546-1 × Фрителла	0	0	0	0	0	0	0
26	3054-6	4546-1 × Фрителла	1	0	0	0	0	0	1
27	3054-5	4546-1 × Фрителла	1	0	0	0	0	0	1
28	3046-2	Инноватор × 4560-2	1	0	0	1	0	0	2
29	3046-5	Инноватор × 4560-2	0	0	0	0	0	0	0
30	3046-6	Инноватор × 4560-2	1	0	0	0	0	0	1
31	3054-4	4546-1 × Фрителла	0	0	0	0	0	0	0

Примечание. 1 – маркер присутствует; 0 – маркер отсутствует.

Table 3

Screening of genetic markers of resistance genes in genotypes of nursery hybrids of year II of the trial (2023)

No.	Selection number of hybrid	Origin	Presence of DNA markers (marker/gene)						Total number of genes, pcs.
			TG 689 / gene HI	Gro1-4-1 / gene Gro1-4	Gpa 2-2 / gene Gpa 2	YES3-3A / gene Ry _{so}	RYSC3 / gene Ry _{adg}	PVX / gene Rx1	
			G. <i>rostochiensis</i>	G. <i>pallida</i>	PVY		PVX		
1	3054-1	4546-1 × Fritella	1	0	0	0	0	0	1
2	3055-1	1610-41 × Fritella	1	0	1	1	0	0	3

3	3150-1	Real × Akzhar	0	0	0	0	0	0	0
4	3064-10	4582-2 × Vympel	0	0	1	0	0	1	1
5	3064-2	4582-2 × Vympel	1	0	0	0	0	0	1
6	3155-10	Roko × 88.34/14	0	0	0	0	0	0	0
7	3155-14	Roko × 88.34/14	1	0	0	0	0	0	1
8	3155-9	Roko × 88.34/14	1	1	0	0	0	0	2
9	3155-16	Roko × 88.34/14	1	0	0	1	0	0	2
10	3155-12	Roko × 88.34/14	1	1	0	0	0	0	2
11	3155-3	Roko × 88.34/14	1	0	0	0	0	0	1
12	3155-1	Roko × 88.34/14	0	0	0	0	0	0	0
13	3155-2	Roko × 88.34/14	0	0	0	0	0	0	0
14	3150-2	Real × Akzhar	0	0	0	0	0	0	0
15	3150-5	Real × Akzhar	0	0	1	0	0	0	1
16	3064-8	4582-2 × Vympel	1	0	0	1	0	0	2
17	3158-3	Agria × 88.34/14	1	0	0	0	0	0	1
18	3054-8	4546 × Fritella	0	0	0	0	0	0	0
19	3054-7	4546-1 × Fritella	0	0	0	1	0	0	1
20	3158-1	Agria × 88.34/14	0	0	0	0	0	0	0
21	3064-1	4582-2 × Vympel	1	0	0	1	0	0	2
22	3102-2	Belaya Noch' × 92.7-26	0	0	0	0	0	0	0
23	3155-6	Roko × 88.34/14	0	0	0	0	0	0	0
24	3054-9	4546-1 × Fritella	0	0	0	0	0	0	0
25	3054-10	4546-1 × Fritella	0	0	0	0	0	0	0
26	3054-6	4546-1 × Fritella	1	0	0	0	0	0	1
27	3054-5	4546-1 × Fritella	1	0	0	0	0	0	1
28	3046-2	Innovator × 4560-2	1	0	0	1	0	0	2
29	3046-5	Innovator × 4560-2	0	0	0	0	0	0	0
30	3046-6	Innovator × 4560-2	1	0	0	0	0	0	1
31	3054-4	4546-1 × Fritella	0	0	0	0	0	0	0

Note. 1 – marker present; 0 – marker absent.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Таким образом, выявление фитопатогенов картофеля с использованием различных методов является важным этапом борьбы с заболеваниями растений. Благодаря современным технологиям и методам молекулярной диагностики возможно достичь высокой точности и эффективности в определении патогенов, что способствует сохранению качественного картофельного урожая. Результаты молекулярного анализа на наличие маркеров генов устойчивости к патогенам можно рассматривать в качестве одного из основных критериев при состав-

лении программ по гибридизации картофеля. Таким образом, использование молекулярных маркеров позволяет определить наличие генов устойчивости и оценить перспективность образца за короткий промежуток времени для дальнейшей гибридизации. В процессе ДНК-маркирования выделены перспективные гибриды картофеля, обладающие устойчивостью к золотистой цистообразующей картофельной нематоде, – 15 гибридов; к бледной картофельной нематоде – 3 генотипа; к PVY-вирусу картофеля – 6 гибридов; к PVX-вирусу картофеля – 1 гибрид.

Библиографический список

1. Анисимов Б. В., Симаков Е. А., Жевора С. В. [и др.] Диагностика и профилактика вирусных, бактериальных и грибных болезней, контролируемых в семеноводстве картофеля. Методические рекомендации. Владикавказ: ИР, 2021. 62 с.
2. Barkov V. A., Belov D. A., Zeiruk V. N., et al. Strategy of potato chemical protection from diseases. // BIO Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference “Innovative Technologies in Agriculture” (ITIA 2022). Oryol, 2022. DOI: 10.1051/bioconf/20224705001.

3. Carillo P., Colla G., El-Nakhel C., et al. Biostimulant Application with a Tropical Plant Extract Enhances *Corchorus olitorius* Adaptation to SubOptimal Nutrient Regimens by Improving Physiological Parameters // *Agronomy*. 2019. No. 9. Pp. 249–258. DOI: 10.3390/agronomy9050249.
4. Сердеров В. К., Караев М. К., Атамов Б. К. Возделывание сортов картофеля для промышленной переработки // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2020. № 3. С. 59–61. DOI: 10.30850/vrnsn/2020/3/59-61
5. Половникова В. В. Биологические особенности возбудителей болезней картофеля и меры борьбы с ними в условиях Курганской области // *Вестник Курганской ГСХА*. 2019. № 2 (30). С. 23–29.
6. Gupta P., Salava H., Sreelakshmi Y., Sharma R. A low-cost high-throughput method for plant genomic DNA isolation // *Cereal Genomics. Methods in Molecular Biology*. Humana, New York, 2020. Vol. 2072. Pp. 1–7. DOI: 10.1007/978-1-4939-9865-4_1.
7. Калашников А. Е., Кабицкая Я. А. ПЦР-диагностика возбудителей болезней сортов картофеля (*Solanum tuberosum*) // *Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова*. 2022. № 2 (36). С. 5–14. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-2-36-5-14.
8. Zlobin I. E., Pashkovskiy P. P., Kartashov A. V., et al. The relationship between cellular Zn status and regulation of Zn homeostasis genes in plant cells // *Environmental and Experimental Botany*. 2020. Vol. 176. Article number 104104. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2020.1041049.
9. De Keyser E., Desmet L., Losschaert M., De Riek J. A General protocol for accurate gene expression analysis in plants // *Quantitative Real-Time PCR. Methods in Molecular Biology*, 2020. Vol. 2065. DOI: 10.1007/978-1-4939-9833-3_9.
10. Рыбаков Д. А., Антонова О. Ю., Чухина И. Г. [и др.] Номенклатурные стандарты и генетические паспорта сортов картофеля селекции Всероссийского научно-исследовательского института картофеля им. А. Г. Лорха // *Биотехнология и селекция растений*. 2020. Т. 3, № 4. DOI: 10.30901/2658-6266-2020-4-01.
11. Зотеева Н. М., Антонова О. Ю., Клименко Н. С., Гавриленко Т. А. Маркеры генов устойчивости к фитофторозу, Y вирусу картофеля и золотистой картофельной нематоде у перспективных клонов межвидовых гибридов картофеля // *Биотехнология и селекция растений*. 2022. Т. 5, № 1. С. 5–16. DOI: 10.30901/2658-6266-2022-1-01.
12. Бирюкова В. А., Шмыгля И. В., Жарова В. А. [и др.] Молекулярные маркеры генов экстремальной устойчивости к Y вирусу картофеля в сортах и гибридах *Solanum tuberosum* L. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2019. Т. 5. С. 17–22. DOI: 10.31857/S2500-26272019517-22.
13. Шестеперов А. А., Грибоедова О. Г. Создание нематодоустойчивых сортов и гибридов сельскохозяйственных культур // *Аграрная наука*. 2019. Т. S2. С. 130–134. DOI: 10.32634/0869-8155-2019-326-2-130-134.
14. Prodhomme C., Vos P., Paulo M. J., et al. Distribution of P1(D1) wart disease resistance in potato germplasm and GWAS identification of haplotype-specific SNP markers // *Theoretical and Applied Genetics*. 2020. Vol. 133. Pp. 1859–1871. DOI: 10.1007/s00122-020-03559-3.
15. Bhardwaj V., Sood S., Kumar A., et al. Efficiency and reliability of marker assisted selection for resistance to major biotic stresses in potato // *Potato Journal*. 2019. Vol. 46, No. 1. Pp. 56–66.
16. Trayanov K., Samaliev H., Kostova M., et al. Morphological and molecular identification of potato cyst nematodes *Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida* in Bulgaria // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2020. Vol. 26, No. 2. Pp. 416–422.
17. Клименко Н. С. Поиск источников устойчивости к *Globodera pallida* и к PVX в коллекции отечественных сортов картофеля с использованием молекулярных маркеров // *Биотехнология и селекция растений*. 2019. Т. 2, № 1. С. 42–48. DOI: 10.30901/2658-6266-2019-1-42-48.

Об авторах:

Андрей Робертович Пухаев, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований сельскохозяйственных растений, Федеральный научный центр «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Владикавказ, Россия; ORCID 0009-0008-3040-0589, AuthorID 1045945. *E-mail: puhaev80@yandex.ru*

Ирина Олеговна Газданова, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований сельскохозяйственных растений, Федеральный научный центр «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Владикавказ, Россия; ORCID 0000-0002-3000-8615, AuthorID 1036581. *E-mail: Gazdanovaira2020@gmail.com*

References

1. Anisimov B. V., Simakov E. A., Zhevora S. V., et al. Diagnosis and prevention of viral, bacterial and fungal diseases controlled in potato seed production: methodical recommendations. Vladikavkaz: IR, 2021. 62 p. (In Russ.)

2. Barkov V. A., Belov D. A., Zeyruk V. N., et al. Strategy of potato chemical protection from diseases. *BIO Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference "Innovative Technologies in Agriculture (ITIA 2022)*. Oryol, 2022: 05001. DOI: 10.1051/bioconf/20224705001.
3. Carillo P., Colla G., El-Nakhel C., et al. Biostimulant Application with a Tropical Plant Extract Enhances *Corchorus olitorius* Adaptation to SubOptimal Nutrient Regimens by Improving Physiological Parameters. *Agronomy*. 2019; 9: 249–258. DOI: 10.3390/agronomy9050249.
4. Serderov V. K., Karaev M. K., Atamov B. K. Potatoes varieties cultivation for industrial processing. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2020; 3: 59–61. DOI: 10.30850/vrsn/2020/3/59-61. (In Russ.)
5. Polovnikova V. V. Biological features of potato disease pathogens and measures to combat them in the conditions of the Kurgan region. *Bulletin of Kurgan State Agricultural Academy*. 2019. 2 (30). 23–29. (In Russ.)
6. Gupta P., Salava H., Sreelakshmi Y., Sharma R. A low-cost high-throughput method for plant genomic DNA isolation. *Cereal Genomics. Methods in Molecular Biology*. Humana, New York, 2020. Vol. 2072. PP. 1–7. DOI: 10.1007/978-1-4939-9865-4_1
7. Kalashnikov A. E., Kabitskaya Ya. A. PCR diagnostics of pathogens of potato varieties (*Solanum tuberosum*). *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. V. M. Kokova*. 2022; 2 (36): 5–14. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-2-36-5-14. (In Russ.)
8. Zlobin I. E., Pashkovskiy P. P., Kartashov A. V., et al. The relationship between cellular Zn status and regulation of Zn homeostasis genes in plant cells. *Environmental and Experimental Botany*. 2020; 176: 104104. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2020.1041049.
9. De Keyser E., Desmet L., Losschaert M., De Riek J. A General protocol for accurate gene expression analysis in plants Quantitative Real-Time PCR. *Methods in Molecular Biology*. 2020; 2065. DOI: 10.1007/978-1-4939-9833-3_9.
10. Rybakov D. A., Antonova O. Yu., Chukhina I. G., et al. Nomenclatural standards and genetic passports of potato cultivars bred in the A. G. Lorkh All-Russian Potato Research Institute of Potato Farming. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2020; 3 (4). DOI: 10.30901/2658-6266-2020-4-o1. (In Russ.)
11. Zoteeva N. M., Antonova O. Yu., Klimenko N. S., Gavrilenko T. A. Markers of genes of resistance to phytophthorosis, potato virus Y and golden potato nematode in promising clones of interspecific potato hybrids. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2022; 5 (1): 5–16. DOI: 10.30901/2658-6266-2022-1-o1. (In Russ.)
12. Biryukova V. A., Shmyglya I. V., Zharova V. A., et al. Molecular markers of genes for extreme resistance to potato virus Y in *Solanum tuberosum* L. cultivars and hybrids. *Russian Agricultural Sciences*. 2019; 5: 17–22. (In Russ.)
13. Shesteporov A. A., Griboedova O. G. The creation of nematode resistant varieties and hybrids of agricultural crops. *Agrarian Science*. 2019; S2: 130–134. DOI: 10.32634/0869-8155-2019-326-2-130-134. (In Russ.)
14. Prodhomme C., Vos P., Paulo M. J., et al. Distribution of P1(D1) wart disease resistance in potato germplasm and GWAS identification of haplotype-specific SNP markers. *Theoretical and Applied Genetics*. 2020; 133: 1859–1871. DOI: 10.1007/s00122-020-03559-3.
15. Bhardwaj V., Sood S., Kumar A., et al. Efficiency and reliability of marker assisted selection for resistance to major biotic stresses in potato. *Potato Journal*. 2019; 46 (1): 56–66.
16. Trayanov K., Samaliev H., Kostova M., et al. Morphological and molecular identification of potato cyst nematodes *Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida* in Bulgaria. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2020; 26 (2): 416–422.
17. Klimenko N. S. Search for resistance sources to *Globodera pallida* and potato virus X in the collection of potato varieties using molecular markers. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2019; 2 (1): 42–48. DOI: 10.30901/2658-6266-2019-1-42-48. (In Russ.)

Authors' information:

Andrey R. Pukhaev, candidate of biological sciences, researcher at the laboratory of molecular genetic research of agricultural plants, Federal Scientific Center "Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Vladikavkaz, Russia; ORCID 0009-0008-3040-0589, AuthorID 1045945. *E-mail: puhaev80@yandex.ru*

Irina O. Gazdanova, candidate of agricultural sciences, researcher at the laboratory of molecular genetic research of agricultural plants, Federal Scientific Center "Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Vladikavkaz, Russia; ORCID 0000-0002-3000-8615, AuthorID 1036581. *E-mail: Gazdanovaira2020@gmail.com*

Урожайность гибридов смородины черной в Центральной Якутии

Н. С. Габышева[✉]

Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени М. Г. Сафронова – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, Россия

[✉]E-mail: nataligabysheva@mail.ru

Аннотация. В условиях Центральной Якутии в селекционном питомнике проведено изучение урожайности и крупноплодности исходного материала смородины черной. **Цель** – выделить источники высокой урожайности и крупноплодности гибридов смородины черной для использования в селекции. В **задачи** изучения входило провести учет урожая и выделить урожайные гибриды смородины черной; определить массу ягод у гибридов и отобрать источники крупноплодности. **Методы.** Исследования проведены согласно общепринятой методике «Программа и методика селекции плодовых, ягодных и орехоплодных культур» (Орел, 1995). **Научная новизна.** Впервые выделены новые источники продуктивности смородины черной для селекции в условиях Якутии. **Результаты.** В селекционном питомнике отобрано 10 источников высокой урожайности (более 10 т/га) и 4 – крупноплодности гибридов смородины черной из различных генетических групп. Среди них по признакам скороплодности, высокой и стабильной урожайности отличается гибрид 3-7-18 (Подарок Кузиору × Хара Кыталык), производный трех подвидов смородины черной и смородины малоцветковой с урожайностью 18,9 т/га. Крупноплодность была характерна 4 гибридам смородины черной – 3-19-18 (Подарок Кузиору × Мюрючана), 3-2-18 (Подарок Кузиору × Хара Кыталык), 2-18-18 (Подарок Кузиору × Якутская) и 1-17-18 (Ксюша × Якутская). Масса 1 ягоды у них составила от 1,53 до 1,70 г. В результате математической обработки экспериментальных данных выявлена отрицательная связь между показателями урожайности и крупноплодности смородины черной ($r = -0,47$). Выделенные источники высокой урожайности и крупноплодности будут использованы в селекции смородины черной в Центральной Якутии для создания нового исходного материала и дальнейшего изучения их по комплексу признаков.

Ключевые слова: смородина черная, селекция, исходный материал, гибриды, гибридная семья, урожайность, крупноплодность, Центральная Якутия

Для цитирования: Габышева Н. С. Урожайность гибридов смородины черной в Центральной Якутии // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 08. С. 1018–1025. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1018-1025>.

Дата поступления статьи: 12.01.2024, **дата рецензирования:** 25.04.2024, **дата принятия:** 05.05.2024.

Productivity of black currant hybrids in Central Yakutia

N. S. Gabysheva[✉]

Yakutsk Research Institute of Agriculture named after M. G. Safronova – a separate subdivision of the Federal Research Center “Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia

[✉]E-mail: nataligabysheva@mail.ru

Abstract. A study was carried out of the yield and large-fruited original material of black currant in a breeding nursery in the conditions of Central Yakutia. **The purpose** is to identify sources of high yield and large-fruited black currant hybrids for use in breeding. **The objectives** of the study included high-yielding hybrids of black

currant to carry out crop accounting and identify; determine the mass of berries in hybrids and select sources of large fruit. **Methods.** The research was carried out according to the generally accepted methodology “Program and methodology for the selection of fruit, berry and nut crops” (Oryol, 1995). Scientific novelty. For the first time, new sources of black currant productivity have been identified for breeding in Yakutia. **Results.** In the breeding nursery, 10 sources of high yield (more than 10 t/ha) and 4 sources of large-fruited black currant hybrids from various genetic groups were selected. Among them, the hybrid 3-7-18 (Podarok Kuzioru × Khara Kytalyk), a derivative of three subspecies of black currant and low-flowering currant with a yield of 18.9 t/ha, is distinguished by the characteristics of early fruiting, high and stable yield. Of 4 black currant hybrids – 3-19-18 (Podarok Kuzioru × Myuryuchana), 3-2-18 (Podarok Kuzioru × Khara Kytalyk), 2-18-18 (Podarok Kuzioru × Yakutskaya) and 1-17-18 (Ksyusha × Yakutskaya) was characteristic large fruiting. The weight of 1 berry ranged from 1.53 to 1.70 g. A negative relationship was revealed between the indicators of yield and large-fruited black currant ($r = -0.47$), as a result of mathematical processing of experimental data. The identified sources of high yield and large fruit will be used in the selection of black currants in Central Yakutia to create new source material and further study them according to a set of traits.

Keywords: black currant, selection, source material, hybrids, hybrid family, productivity, large fruit, Central Yakutia

For citation: Gabysheva N. S. Productivity of black currant hybrids in Central Yakutia. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (08): 1018–1025. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1018-1025>. (In Russ.)

Date of paper submission: 12.01.2024, **date of review:** 25.04.2024, **date of acceptance:** 05.05.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

Черная смородина традиционно является одной из ведущих ягодных культур в России. Пластичность и относительная неприхотливость при возделывании обеспечивают возможности ее выращивания практически повсеместно [1].

В списке ягодных растений эта культура занимает одно из лидирующих положений по содержанию питательных и биологически активных веществ, необходимых для сбалансированного питания человека [2].

Фрукты и ягоды – важнейшие источники широкого спектра биологически активных веществ (БАВ), включая витамин С, каротиноиды, флавоноиды, антоцианины [3]. Ценность ягод смородины черной как диетического и лекарственного сырья определяется количеством витамина С, Р-активных полифенолов, макро- и микроэлементов, пектиновых веществ [4]. Витамины С и Р, содержащиеся в них в большом количестве, взаимно усиливают полезные для здоровья эффекты витаминов и минералов [5].

К настоящему времени мировой сортимент смородины черной насчитывает около 1200 сортов и продолжает совершенствоваться [6]. Селекционный процесс бесконечен, и на смену старым сортам приходят новые, так как большинство сортов, созданных ранее, не соответствует современным требованиям покупателей и технологиям возделывания [7].

Основными признаками сортов смородины черной, определяющими эффективность культуры в целом, являются урожайность, качество ягод, иммунитет к болезням, вредителям, высокая адапта-

ция к экстремальным условиям среды и технологичность [8].

Высокая урожайность – одно из основных требований, предъявляемых к современным сортам черной смородины. Она зависит от многих факторов, в том числе от стабильности плодоношения и степени самоплодности сорта. Именно эти показатели свидетельствуют о высокой адаптивности сорта в конкретном регионе возделывания [9].

Важным направлением по стабилизации продуктивности культуры выступает внедрение сортов, обеспечивающих высокую урожайность, способных полноценно использовать факторы внешней среды, переносить стрессовые нагрузки, как абиотические, так и связанные с деятельностью патогенов и фитофагов [10]. Величина урожайности ягод может характеризовать устойчивость сортов к биотическим и абиотическим факторам среды [11].

Максимально возможная урожайность в значительной степени зависит от потенциальных возможностей сорта. Фактическая урожайность зависит от складывающихся погодных условий и условий агротехники. Урожайность смородины черной также находится в прямой корреляционной зависимости и от глубины снежного покрова в начале зимы и весной.

На потенциальную урожайность влияют наследственные качества, определяющие биологические особенности сортов смородины (самоплодность, скороплодность). Реализация потенциала продуктивности находится в прямой зависимости от погодных условий вегетационного периода, теплообеспечения, периодов цветения и закладки генеративных почек будущего урожая, периода перезимовки [12].

В условиях Якутии имеются местные высокозимостойкие, адаптированные сорта смородины черной. Некоторые из них имеют высокую, но нестабильную урожайность. Вопрос повышения продуктивности культуры всегда является одним из основных и значимых в селекции. В условиях изменяющегося климата необходимы новые сорта смородины черной, которые способны противостоять воздействию стрессовых факторов, таких как малоснежные и суровые зимы, резкие перепады температур весной, заморозки рано весной и осенью, подверженность болезням и вредителям, недостаточное количество осадков, низкая жаростойкость и др. Все эти факторы значительно влияют на формирование урожайности и адаптационного потенциала ягодной культуры.

В связи с этим изучение урожайности исходного материала смородины черной является актуальным в суровых природно-климатических условиях Центральной Якутии, что позволит выделить высокоадаптированные гибриды для использования в селекционной работе, так как одним из ключевых аспектов для дальнейшего селекционного поиска является подбор исходных форм [10].

Цель исследования – выделить урожайные и крупноплодные гибриды смородины черной для селекции в условиях Якутии.

Задачи:

- 1) оценить и выделить урожайные гибриды смородины черной со стабильным плодоношением;
- 2) определить массу ягод у гибридов и отобрать источники крупноплодности.

Методология и методы исследования (Methods)

Исследования велись в Центральной Якутии (г. Покровск, плодово-ягодный сад им. М. А. Чертковой Якутского НИИСХ – обособленного подразделения ФИЦ ЯНЦ СО РАН) в 2021–2023 гг. Объекты исследований – гибриды смородины черной из 7 семей. Селекционный участок заложен весной 22 мая 2018 года двухлетними саженцами, схема размещения растений 1,0 × 2,2 м.

Почва опытного участка мерзлотно-таежная палевая, содержание плодородного слоя низкое. Реакция среды щелочная, механический состав почвы суглинистый, содержание подвижных форм азота, фосфора и калия не высокое.

Исследования проведены согласно общепринятой методике селекции плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Степень цветения и степень плодоношения определяли в баллах: 0 – нет цветения (плодоношения); 1 – единичные цветки (ягоды); 2 – цветение (ягоды) на верхушках побегов; 3 – цветение (плодоношение) на 1/2 длины побега; 4 – цветение (плодоношение) на 3/4 длины побега; 5 – цветение (плодоношение) по всей длине и на всех побегах [13]. Урожай с куста учитывали в полевых условиях, для этого собранные с куста

ягоды взвешивали на весах. Среднюю массу ягоды определяли взвешиванием 100 ягод со средней пробы и делили на 100. Статистическую обработку данных проводили с помощью пакета прикладных программ Snedecor и Excel.

Климат местности, где проводились исследования, характеризуется как резко континентальный. Зима продолжительная (более 6 месяцев) и суровая. Температура зимой опускается до $-50 \dots -60$ °С. Снега за зиму выпадает примерно 20–40 см. Среднегодовая температура воздуха равна $-10,8$ °С [14]. По сравнению с 70-ми гг. XX века среднегодовая температура воздуха повысилась на $2,5-3$ °С [15].

Лето характеризуется как жаркое, солнечное и засушливое. Большая прозрачность атмосферы обеспечивает высокую интенсивность солнечной радиации. Средняя температура июля $+18,7$ °С. Абсолютный максимум температуры воздуха летом $+38,0$ °С. За лето выпадает 120 мм осадков. Высокие температуры и малое количество осадков в некоторые годы вызывают засуху. Заморозки возможны почти все лето. Сумма активных температур выше $+10$ °С равна $1400-1500$ °С, продолжительность периода с температурой выше 10 °С составляет 90–97 дней. Годовое количество осадков – примерно 250–300 мм, что близко к степным и полустепным зонам [14].

Погодные условия вегетационного периода в годы исследований были сухими (2021 год) и засушливыми (2022 и 2023 гг.) (таблица 1). Так, в 2021 году гидротермический коэффициент (ГТК) составил всего 0,38, в 2022–2023 гг. $-0,89-0,94$ при среднем многолетнем значении 1,2.

Вегетационные периоды во время исследований были теплее по сравнению со среднемноголетними данными, суммы активных температур выше 10 °С превышали на $235,1-377,0$ °С. Особенно жарко было в 2021 году.

Погодные условия зимой 2020/2021 и 2022/2023 гг. были наиболее холодными и малоснежными. Среднемесячная температура в январе составляла соответственно $-46,3$ и $-45,9$ °С, а абсолютные минимумы опускались до $-56,4$ и $-57,7$ °С. Глубина снежного покрова в январе была в среднем $27,0-30,5$ см. Зима 2021/2022 гг. характеризовалась как сравнительно теплая со среднемесячной температурой января $-35,9$ °С.

Результаты (Results)

Новые создаваемые сорта черной смородины должны обладать высокой ($10-15$ т/га), стабильной урожайностью, быть крупноплодными (масса ягоды в Сибири – $2-3$ г), скороплодными (урожай на второй год после посадки – 2 т/га) и другими хозяйственно ценными признаками. Только адаптированные, адекватно реагирующие на комплекс экстремальных факторов среды сорта обеспечат ежегодную высокую продуктивность [13].

Таблица 1

Погодно-климатические условия в период исследований

Показатели	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее многолетнее значение
Сумма активных температур, °С	1809,4	1724,5	1667,1	1432
Осадки, мм	69,2	162,6	148,7	168
Гидротермический коэффициент	0,38	0,94	0,89	1,2
Минимальная температура зимой, °С	-56,4	-55,2	-57,7	
Максимальная температура летом, °С	+35,3	+34,6	+35,9	

Table 1

Weather and climatic conditions during the research period

Indicators	2021	2022	2023	Average long-term
Sum of active temperatures, °C	1809.4	1724.5	1667.1	1432
Precipitation, mm	69.2	162.6	148.7	168
Hydrothermal coefficient	0.38	0.94	0.89	1.2
Minimum temperature in winter, °C	-56.4	-55.2	-57.7	
Maximum temperature in summer, °C	+35.3	+34.6	+35.9	

Таблица 2

Урожайность гибридных сеянцев смородины черной по семьям (2021–2023 гг.)

Генетическая группа	Гибридная семья	С урожаем, %				Средняя урожайность по семье, т/га
		до 3 т/га	от 3 до 7 т/га	от 7 до 10 т/га	10 т/га и более	
1	2	3	4	5	6	7
I	Подарок Кузиору × Мюрючана	9,1	36,3	27,3	27,3	8,1
	Подарок Кузиору × Якутская	–	40,0	40,0	20,0	8,0
II	Подарок Кузиору × Хара Кыталык	30,0	20,0	20,0	30,0	7,5
III	Ксюша × Люция	60,0	20,0	–	20,0	4,3
	Алтайская поздняя × Хара Кыталык	62,5	12,5	25,0	–	4,2
	Ксюша × Хара Кыталык	80,0	10,0	10,0	–	2,2
IV	Ксюша × Якутская	58,3	25,0	–	16,7	3,5
	Всего	44,3	23,0	16,4	16,4	

Примечание. Генетические группы: I – ESDSkPr, II – ESDSkP, III – ESDP, IV – ESDPr, где E – *R. nigrum ssp. europaeum* Jancz., S – *R. nigrum ssp. sibiricum* (Egb. Wolf) Pavl.), Sk – *R. nigrum ssp. scandicum* Hedl.), D – *R. dikuscha* Fisch. ex Turcz., P – *R. pausiflorum* Turcz. ex Pojark., Pr – *R. procumbens* Pall.

Table 2

Productivity of hybrid black currant seedlings by family (2021–2023)

Genetic group	Hybrid family	With harvest, %				Average productivity per family, t/ha
		up to 3 t/ha	from 3 to 7 t/ha	from 7 to 10 t/ha	10 t/ha or more	
1	2	3	4	5	6	7
I	Podarok Kuzioru × Myuryuchana	9.1	36.3	27.3	27.3	8.1
	Podarok Kuzioru × Yakutskaya	–	40.0	40.0	20.0	8.0
II	Podarok Kuzioru × Khara Kytalyk	30.0	20.0	20.0	30.0	7.5
III	Ksyusha × Lyutsiya	60.0	20.0	–	20.0	4.3
	Altayskaya pozdnyaya × Khara Kytalyk	62.5	12.5	25.0	–	4.2
	Ksyusha × Khara Kytalyk	80.0	10.0	10.0	–	2.2
IV	Ksyusha × Yakutskaya	58.3	25.0	–	16.7	3.5
	Total	44.3	23.0	16.4	16.4	

Note. Genetic groups: I – ESDSkPr, II – ESDSkP, III – ESDP, IV – ESDPr, where E – *R. nigrum ssp. europaeum* Jancz., S – *R. nigrum ssp. sibiricum* (Egb. Wolf) Pavl.), Sk – *R. nigrum ssp. scandicum* Hedl.), D – *R. dikuscha* Fisch. ex Turcz., P – *R. pausiflorum* Turcz. ex Pojark., Pr – *R. procumbens* Pall.

Начало плодоношения у гибридных сеянцев смородины черной наблюдалось в 2019 году – на второй год после посадки. Впервые в фазу плодоношения вступили 81,2 % растений, из них к скороплодным с хозяйственной урожайностью (2 т/га, или 500 г/куст и более) можно отнести 13,0 % ги-

бридов – по 3 растения из разных генетических групп (I, III и IV) (таблица 2). На третий год после посадки доля плодоносящих растений увеличилась до 88,1 %, в том числе с хозяйственной урожайностью возросла до 79,1 %. С урожаем более 2,3 кг ягод с куста выделилось 8 растений, из них 2 ги-

брида (3-7-18 и 3-8-18) из семьи Подарок Кузиору × Хара Кыталык имели высокий урожай – 4,1 кг с куста. Эти гибриды относятся ко II генетической группе и представлены четырехгеномными производными европейского, сибирского подвидов, скандинавским экотипом смородины черной, дикорастущими видами смородины дикуши (*R. dikuscha* Fisch. ex Turcz.) и смородины моховки (*R. pausiflorum* Turcz. ex Pojark.).

В селекции черной смородины на высокую продуктивность проходят отбор гибриды, имеющие урожайность 10 т/га и выше. Период наблюдений за растениями пришелся на 4–6-й годы после посадки, которые считаются наиболее продуктивным возрастом для черной смородины. Со средней урожайностью ягод более 10 т/га при схеме посадки 2,2 × 1 м было выделено 1–3 % растений. Отмечено, что наиболее урожайными были гибридные семьи, где в качестве материнской формы был использован урожайный скороплодный крупноплодный сорт алтайской селекции Подарок Кузиору [16], а в качестве отцовской формы – сорта местной селекции Мюрючана, Якутская и Хара Кыталык. Эти семьи относятся к I и II генетическим группам и содержат в своем геноме 5 таксонов (таблица 2).

Средняя урожайность в вышеупомянутых гибридных семьях составила 7,5–8,0 т/га. При этом в потомстве Подарок Кузиору × Хара Кыталык выход продуктивных гибридов с урожаем ягод 10 и более т/га был наиболее высоким – 30 %. Эти комбинации скрещивания можно использовать в селекционной практике для создания нового исходного материала смородины черной с целью получения урожайного потомства. В остальных изучаемых гибридных семьях средняя урожайность ягод была ниже в 1,7–3,6 раза и варьировала в пределах 2,2–4,3 т/га.

В семьях Алтайская поздняя × Хара Кыталык и Ксюша × Хара Кыталык, относящихся к III генетической группе, в происхождении которых участвуют 2 подвида смородины черной, а также смородина дикуша и моховка, не имелось урожайных (более 10 т/га) гибридных сеянцев. А доля растений с низкой урожайностью до 3 т/га в этих генотипах была очень высокой и составила от 62,5 до 80 %.

Таким образом, при изучении гибридов смородины черной из 7 различных семей были выделены 10 высокоурожайных, адаптированных к местным экстремальным условиям среды, которые представлены в таблице 3.

Таблица 3
Гибриды черной смородины с урожайностью более 10 т/га

Генетическая группа	Гибридная семья	Гибрид	Урожайность, $M \pm m$, т/га	V, %	Масса 1 ягоды, $M \pm m$, г	V, %
II	Подарок Кузиору × Хара Кыталык	3-7-18	18,9 ± 1,8	13,0	1,27 ± 0,11	11,8
I	Подарок Кузиору × Мюрючана	3-14-18	16,3 ± 4,0	34,4	1,13 ± 0,11	13,3
II	Подарок Кузиору × Хара Кыталык	3-5-18	15,6 ± 4,2	42,4	0,83 ± 0,04	7,0
I	Подарок Кузиору × Мюрючана	3-16-18	13,8 ± 5,8	58,7	1,00 ± 0,07	10,0
III	Ксюша × Люция	2-17-18	13,1 ± 4,3	45,5	0,95 ± 0,07	4,5
IV	Ксюша × Якутская	1-16-18	12,5 ± 5,8	64,7	0,90 ± 0,00	0,0
II	Подарок Кузиору × Хара Кыталык	3-2-18	12,2 ± 2,4	27,4	1,60 ± 0,14	12,5
I	Подарок Кузиору × Якутская	2-18-18	12,1 ± 5,1	59,0	1,57 ± 0,13	11,3
IV	Ксюша × Якутская	1-17-18	11,4 ± 4,3	52,6	1,53 ± 0,11	10,0
I	Подарок Кузиору × Мюрючана	3-19-18	10,4 ± 3,1	41,4	1,70 ± 0,02	11,8
	HCP ₀₅		3,84		0,08	

Table 3
Black currant hybrids with a yield of more than 10 t/ha

Genetic group	Hybrid family	Hybrid	Productivity, $M \pm m$, t/ha	V, %	Weight of 1 berry, $M \pm m$, g	V, %
I	2	3	4	5	6	7
II	Podarok Kuzioru × Khara Kytalyk	3-7-18	18.9 ± 1.8	13.0	1.27 ± 0.11	11.8
I	Podarok Kuzioru × Myuryuchana	3-14-18	16.3 ± 4.0	34.4	1.13 ± 0.11	13.3
II	Podarok Kuzioru × Khara Kytalyk	3-5-18	15.6 ± 4.2	42.4	0.83 ± 0.04	7.0
I	Podarok Kuzioru × Myuryuchana	3-16-18	13.8 ± 5.8	58.7	1.00 ± 0.07	10.0
III	Ksyusha × Lyutsiya	2-17-18	13.1 ± 4.3	45.5	0.95 ± 0.07	4.5
IV	Ksyusha × Yakutskaya	1-16-18	12.5 ± 5.8	64.7	0.90 ± 0.00	0.0
II	Podarok Kuzioru × Khara Kytalyk	3-2-18	12.2 ± 2.4	27.4	1.60 ± 0.14	12.5
I	Ksyusha × Yakutskaya	2-18-18	12.1 ± 5.1	59.0	1.57 ± 0.13	11.3
IV	Ksyusha × Yakutskaya	1-17-18	11.4 ± 4.3	52.6	1.53 ± 0.11	10.0
I	Podarok Kuzioru × Myuryuchana	3-19-18	10.4 ± 3.1	41.4	1.70 ± 0.02	11.8
	LSD ₀₅		3.84		0.08	

Большинство отборных урожайных гибридов относятся к I и II генетическим группам, производным европейского и сибирского подвидов, скандинавскому экотипу смородины черной, а также дикорастущим видам смородины моховки и малочетковой. В создании этих гибридов в качестве материнской формы был использован урожайный сорт алтайской селекции Подарок Кузиору.

Благоприятные условия для формирования урожая черной смородины сложились в 2022 году, чему предшествовала более теплая зима 2021/2022 гг. Среднемесячная температура холодного месяца января составила всего $-35,9$ °С, а высота снежного покрова – 19 см. Лето было теплое, дождливое. В самом жарком месяце июле выпало 88,1 мм осадков, что больше среднемноголетней нормы на 50,5 мм. Все эти факторы благоприятно повлияли на состояние и урожайность растений.

Так, максимальная урожайность за годы изучения отмечена в этом году у гибридов 3-14-18 (Подарок Кузиору × Мюрючана) – 22,7 т/га, 3-7-18 и 3-5-18 (Подарок Кузиору × Хара Кыталык) – 21,5 т/га.

В 2023 году гибриды 2-18-18 (Подарок Кузиору × Якутская) и 1-17-18 (Ксюша × Якутская) превзошли по показателю урожайности (20,5 т/га) все изучаемые гибриды черной смородины.

В среднем за 3 года с урожайностью более 15 т/га отличились гибриды 3-7-18 (Подарок Кузиору × Хара Кыталык), 3-14-17 (Подарок Кузиору × Мюрючана) и 3-5-18 (Подарок Кузиору × Хара Кыталык). Максимальная и стабильная урожайность (18,9 т/га) получена у гибрида 3-7-18. Коэффициент вариации (стандартное отклонение) при этом составил 13 %, что говорит о средней степени изменчивости. Данные урожайности остальных гибридных образцов по годам имели значительную изменчивость от 27,4 до 64,7 %. Оценка значимости разности между средними показателями урожайности была существенной и значимой.

Степень цветения и степень плодоношения позволяют в общем оценить потенциальную продуктивность куста [13]. Все изученные гибриды оценивались нами по степени цветения и плодоношения. По полученным данным проведен анализ взаимосвязи, который показал, что между показателями степени цветения и плодоношения у выделенных гибридов смородины черной есть наличие средней положительной корреляции ($r = 0,53$), а между степенью плодоношения и фактической урожайностью существует сильная положительная связь ($r = 0,82$).

Создание крупноплодных сортов – одно из направлений в селекции смородины черной, которое позволяет повысить продуктивность культуры. Крупноплодность – важное достоинство современных сортов [13]. Поскольку крупноплодность является не только важным компонентом продуктивности, но и критерием товарности, при селекции и подборе сортов для товарного производства этому показателю уделяется особое внимание [6].

Масса ягод – величина непостоянная и в значительной мере зависит от водообеспечения, почвенных условий, технологии выращивания, расположения на стебле, количества сборов, возраста насаждений и т. д. Однако в относительно одинаковых условиях произрастания различия сортов по крупноплодности обусловлены прежде всего генотипическими особенностями [17].

Средняя масса ягоды у местных сортов смородины черной (Хара Кыталык, Якутская, Мюрючана, Люция) в местных условиях в среднем составляет около 1 г. Крупными ягодами характеризуются сорта Эркээни и Памяти Кындыла – 1,6–1,8 г.

Нами проведено взвешивание средней пробы ягод с каждого куста для определения средней массы ягоды.

В результате оценки полученных данных более крупными ягодами со средней массой 1 ягоды более 1,5 г характеризуются следующие гибриды смородины черной: 3-19-18 (Подарок Кузиору × Мюрючана), 2-18-18 (Подарок Кузиору × Якутская), в генотипе которых включены 3 подвида смородины черной и дикорастущие виды – смородина дикуша и моховка (I генетическая группа), а также гибриды 3-2-18 (Подарок Кузиору × Хара Кыталык) (II группа) и 1-17-18 (Ксюша × Якутская) (IV группа). Из них у гибрида 3-19-18 максимальная средняя масса 1 ягоды в 2022 году составила 1,9 г.

При анализе потомства по комбинациям скрещивания отмечено, что средняя масса ягоды по гибридным семьям варьировала от 0,7 (Алтайская поздняя × Хара Кыталык) до 1,1 г в потомствах семей (Подарок Кузиору × Мюрючана и Подарок Кузиору × Якутская).

Было замечено, что крупноплодные гибриды по урожайности уступали менее крупноплодным. Признак крупноплодности по результатам математической обработки полученных данных более стабилен. Изменчивость этого показателя у выделенных гибридов смородины черной не превышала 4,5–13,3 % (от незначительной до средней). Средняя масса 1 ягоды была постоянной в течение трех лет у гибрида 1-16-18 и составила 0,9 г. Мелкие ягоды были характерны для гибрида 3-5-18 (Подарок Кузиору × Хара Кыталык) – 0,83 г.

Кроме этого, нами была проведена оценка степени корреляции между урожайностью и массой ягод черной смородины. Данные анализа показали, что между этими показателями существует слабая отрицательная связь ($r = -0,47$) (коэффициент корреляции Пирсона), хотя, по результатам исследований других авторов, между массой ягод и урожайностью с куста у черной смородины существует сильная положительная корреляция ($r = 0,81$) [12].

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

1. В результате изучения исходного материала смородины черной выделены 10 перспективных источников высокой урожайности различного ге-

нетического происхождения из семей: Подарок Кузиору × Хара Кыталык – 3-7-18, 3-5-18, 3-2-18; Подарок Кузиору × Мюрючана – 3-14-18, 3-16-18, 3-19-18; Ксюша × Якутская – 1-16-18, 1-17-18; Ксюша × Люция – 2-17-18; Подарок Кузиору × Якутская – 2-18-18. Они будут использованы в дальнейшей селекционной работе с целью создания новых высокоурожайных и адаптивных сортов в условиях Центральной Якутии.

2. Для селекции смородины черной на крупноплодность рекомендуется использовать в качестве

перспективных источников гибриды 3-19-18 (Подарок Кузиору × Мюрючана), 3-2-18 (Подарок Кузиору × Хара Кыталык), 2-18-18 (Подарок Кузиору × Якутская) и 1-17-18 (Ксюша × Якутская) со средней массой 1 ягоды от 1,53 до 1,70 г.

3. По комплексу признаков – скороплодности, высокой и стабильной урожайности (18,9 т/га) – отличился гибрид 3-7-18 (Подарок Кузиору × Хара Кыталык).

Библиографический список

1. Тихонова О. А. Сорты черной смородины селекции ВНИИСПК на Северо-Западе России // Современное садоводство – Contemporary horticulture. 2019. № 4. С. 76–91. DOI: 10.24411/2312-6701-2019-10408.
2. Тихонова О. А., Шеленга Т. В. Биологически активные вещества ягод черной смородины в условиях Северо-Запада России // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции, 2019. Т. 180, № 3. С. 50–58. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-3-50-58.
3. Акимов М. Ю., Бессонов В. В., Коденцова В. М. [и др.] Биологическая ценность плодов и ягод российского производства // Вопросы питания. 2020. Т. 89, № 4. С. 220–232. DOI: 10.24411/0042-8833-2020-10055.
4. Кирина И. Б., Белосохов Ф. Г., Титова Л. В., Вдовина В. С. Сравнительная оценка качества плодов смородины и жимолости // Приоритетные направления развития садоводства (I Потаповские чтения): материалы национальной научно-практической конференции. Мичуринск, 2019. С. 173–176.
5. Воронина М. С., Макарова Н. В., Игнатова Д. Ф., Гуляева А. Н., Голубева Т. С., Каткасова В. Г., Бабенкова А. А. Исследование химических характеристик ягод черной смородины в ходе обработки жидким азотом // Химия растительного сырья. 2022. № 3. С. 301–308. DOI: 10.14258/jcrpm.20220310572.
6. Сазонов Ф. Ф. Оценка интродуцированных сортов смородины черной для использования в производстве и селекции // Садоводство и виноградарство. 2022. № 4. С. 16–26. DOI: 10.31676/0235-2591-2022-4-16-26.
7. Куликов И. М., Евдокименко С. Н., Тумаева Т. А. [и др.] Научное обеспечение ягодоводства России и перспективы его развития // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021. Т. 25, № 4. С. 414–419. DOI: 10.18699/VJ21.046.
8. Сазонов Ф. Ф. Формирование отечественного сортимента смородины черной в условиях Нечерноземного региона России // Садоводство и виноградарство. 2021. № 1. С. 23–31. DOI: 10.31676/0235-2591-2021-1-23-31.
9. Тихонова О. А. Оценка самоплодности сортов черной смородины в условиях Северо-Запада России // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции, 2019. Т. 180, № 2. С. 60–72. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-2-60-72.
10. Сазонов Ф. Ф. Роль генотипа и погодных условий в формировании хозяйственно-ценных признаков интродуцированных сортов черной смородины // Вестник КрасГАУ. 2021. № 11. С. 61–70. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-11-61-70.
11. Морковина В. А., Порсев И. Н., Половникова В. В., Карпова М. В. Роль устойчивых к болезням сортов в повышении урожайности смородины черной в Зауралье // Вестник Курганской ГСХА. 2021. № 2. С. 16–21. DOI: 10.52463/22274227_2021_38_28.
12. Коробкова Т. С. Реализация потенциальной продуктивности смородины черной в условиях криолитозоны // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т. 24, № 2. С. 74–82. DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-2-7.
13. Программа и методика селекции плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Орел: ВНИИСПК, 1995. 502 с.
14. Гаврилова М. К. Климат Центральной Якутии: монография. Якутск: Книжное издательство, 1973. 120 с.
15. Лоскин М. И., Готовцев С. П., Павлова С. А. Процессы, связанные с изменением климата, влияющие на устойчивость геосистем (на примере Центральной Якутии) // Природообустройство. 2021. № 1. С. 22–28. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-22-26.
16. Сорокопудов В. Н., Назарюк Н. И., Макаренко С. А., Сорокопудова О. А. Сибирский сад академика И. П. Калининой длиною в жизнь. Выпускница МСХА имени К. А. Тимирязева на службе сибирского садоводства // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2021. № 1. С. 98–107.
17. Евдокименко С. Н. Селекционные возможности увеличения массы плодов ремонтантной малины // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2022. № 4. С. 61–70. DOI: 10.26897/0021-342X-2022-4-61-70.

Об авторе:

Наталья Сергеевна Габышева, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени М. Г. Сафронова – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, Россия; ORCID 0000-0003-3307-4156, AuthorID 764454.

E-mail: nataligabysheva@mail.ru

References

1. Tikhonova O. A. Black currant varieties of VNIISPK breeding in the North-West of Russia. *Sovremennoe Sadovodstvo – Contemporary Horticulture*. 2019; 4: 76–91. DOI: 10.24411/2312-6701-2019-10408. (In Russ.)
2. Tikhonova O. A., Shelenga T. V. Bioactive substances of black currant berries in the conditions of Northwest-ern Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019; 180 (3): 50–58. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-3-50-58. (In Russ.)
3. Akimov M. Yu., Bessonov V. V., Kodentsova V. M., et al. Biological value of fruits and berries of Russian production. *Problems of Nutrition*. 2020; 89 (4): 220–232. DOI: 10.24411/0042-8833-2020-10055. (In Russ.)
4. Kirina I. B., Belosokhov F. G., Titova L. V., Vdovina V. S. Comparative assessment of the quality of currant and honeysuckle fruits. *Priority Directions of Horticulture Development (I Potapov readings): materials of the national scientific and practical conference*. Michurinsk, 2019: 173–176. (In Russ.)
5. Voronina M. S., Makarova N. V., Ignatova D. F., Gulyaeva A. N., Golubeva T. S., Katkasova V. G., Babenkova A. A. Study of chemical characteristics of blackcurrant berries during treatment with liquid nitrogen. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2022; 3: 301–308. DOI: 10.14258/jcprm.20220310572. (In Russ.)
6. Sazonov F. F. Evaluation of introduced blackcurrant varieties for production and breeding. *Horticulture and Viticulture*. 2022; (4): 16–26. DOI: 10.31676/0235-2591-2022-4-16-26/. (In Russ.)
7. Kulikov I. M., Evdokimenko S. N., Tumaeva T. A., et al. Scientific support of small berry growing in Russia and prospects for its development. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021; 25 (4): 414–419. DOI: 10.18699/VJ21.046. (In Russ.)
8. Sazonov F. F. Formation of domestic blackcurrants stock in Non-Chernozem Region of Russia. *Horticulture and Viticulture*. 2021. (1): 23–31. DOI: 10.31676/0235-2591-2021-1-23-31. (In Russ.)
9. Tikhonova O. A. Evaluation of self-fertility in black currant cultivars in the conditions of Northwest of Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019; 180 (2): 60–72. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-2-60-72. (In Russ.)
10. Sazonov F. F. The genotype and weather conditions role in shaping economically features of black currant varieties. *The Bulletin of KrasGAU*. 2021; (11): 61–70. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-11-61-70. (In Russ.)
11. Morkovina V. A., Porsev I. N., Polovnikova V. V., Karpova M. V. The role of disease-resistant varieties in increasing the yield of black currants in the Trans-Urals. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*. 2021; (2): 16–21. DOI: 10.52463/22274227_2021_38_28. (In Russ.)
12. Korobkova T. S. Realization of the potential productivity of black-currant under the conditions of cryolithozone. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2019; 24 (2): 74–82. DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-2-7. (In Russ.)
13. *Program and methodology for breeding fruit, berry and nut crops*. Oryol: VNIISPK, 1995. 502 p. (In Russ.)
14. Gavrilova M. K. *Climate of Central Yakutia*: monograph. Yakutsk, 1973. 120 p. (In Russ.)
15. Loskin M. I., Gotovtsev S. P., Pavlova S. A. Climate change processes that affecting the sustainability of geosystems (in the example of Central Yakutia). *Environmental Engineering*. 2021; (1): 22-28. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-22-26. (In Russ.)
16. Sorokopudov V. N., Nazaryuk N. I., Makarenko S. A., Sorokopudova O. A. Life-long siberian garden of academician I. P. Kalinina. Graduate of Timiryazev academy serves Siberian horticulture. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy (TAA)*. 2021; (1): 98–107. (In Russ.)
17. Evdokimenko S. N. Breeding possibilities of increasing the mass of primocane raspberry fruits. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy (TAA)*. 2022; (4): 61–70. DOI: 10.26897/0021-342X-2022-4-61-70. (In Russ.)

Author's information:

Natalya S. Gabysheva, candidate of agricultural sciences, leading researcher, Yakutsk Research Institute of Agriculture named after M. G. Safronova – a separate subdivision of the Federal Research Center “Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia; ORCID 0000-0003-3307-4156, AuthorID 764454. *E-mail: nataligabysheva@mail.ru*

Анализ эффективности применения биоактивного покрытия для обеспечения качества и биобезопасности мяса птицы при хранении

О. В. Зинина^{1, 2✉}, С. П. Меренкова¹, Е. А. Вишнякова¹, О. П. Неверова²

¹ Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия

² Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

✉ E-mail: zininaov@susu.ru

Аннотация. Мясо птицы является наиболее распространенным видом мясного сырья, востребованным у потребителей, но в то же время скоропортящимся продуктом. Качество и безопасность мяса птицы при хранении можно обеспечить, применяя биоактивные пленочные покрытия. **Научная новизна** работы заключается в получении новых научных данных о влиянии биоактивного альгинатного покрытия с белковым гидролизатом на показатели филе грудки цыпленка-бройлера в процессе хранения. **Целью** исследования является установление эффективности биоактивного покрытия на основе альгината натрия с белковым гидролизатом в качестве активного компонента при хранении мяса птицы. **Методы.** У образцов филе грудки цыпленка-бройлера, покрытого биоактивными альгинатными пленками, и у контрольного образца без покрытия определяли цветовые характеристики, рН, массовую долю влаги и потери массы при хранении, а также микробиологические показатели (общее микробное число и бактерии группы кишечной палочки). Исследования проводили по стандартным общепринятым методикам. **Результаты.** Установлено, что в покрытии мясо лучше сохраняет внешний вид и цвет, содержание влаги остается на достаточно высоком уровне по сравнению с начальным значением и снижается усушка, а также что альгинатное покрытие обеспечивает микробиологическую стабильность филе грудки более длительное время по сравнению с контрольным образцом: через 7 суток хранения общее микробное число в контрольном образце составило $1,4 \cdot 10^6$ КОЕ/г, что выше допустимого уровня, согласно требованиям ТР ЕАЭС 051/2021, в то время как в образцах в альгинатных покрытиях данный показатель оставался в пределах допустимых значений. Таким образом, пленочные покрытия на основе альгината натрия с добавлением в качестве активного компонента белкового гидролизата обладают потенциалом для обеспечения сохранности и биобезопасности мяса птицы при хранении.

Ключевые слова: мясо птицы, биоактивное покрытие, гидролизат белка, альгинат натрия, срок хранения, потери массы, цветовые характеристики

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, номер проекта 23-26-00153.

Для цитирования: Зинина О. В., Меренкова С. П., Вишнякова Е. А., Неверова О. П. Анализ эффективности применения биоактивного покрытия для обеспечения качества и биобезопасности мяса птицы при хранении // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 08. С. 1026–1036. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1026-1036>.

Дата поступления статьи: 20.06.2024, **дата рецензирования:** 26.06.2024, **дата принятия:** 15.07.2024.

Analysis of the effectiveness of using a bioactive coating to ensure the quality and biosafety of poultry meat during storage

O. V. Zinina^{1, 2✉}, S. P. Merenkova¹, E. A. Vishnyakova¹, O. P. Neverova²

¹ South Ural State University (Scientific Research University), Chelyabinsk, Russia

² Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia

✉E-mail: zininaov@susu.ru

Abstract. Poultry meat is the most common type of raw meat, in demand among consumers, but at the same time a perishable product. The quality and safety of poultry meat during storage can be ensured by using bioactive film coatings. **The scientific novelty** of the work lies in the receipt of new scientific data on the effect of a bioactive alginate coating with protein hydrolysate on the performance of broiler chicken breast fillet during storage. **The purpose** of the research is to establish the effectiveness of a bioactive coating based on sodium alginate with protein hydrolysate as an active component during the storage of poultry meat. **Methods.** For samples of broiler chicken breast fillet coated with bioactive alginate films and for a control sample without coating, color characteristics, pH, mass fraction of moisture and weight loss during storage, as well as microbiological indicators (total microbial count, and coliforms) were determined. The studies were carried out using standard generally accepted methods. **Results.** It has been established that coated meat better retains its appearance and color, the moisture content remains at a fairly high level compared to the initial value, and shrinkage is reduced. It was also found that the alginate coating provides microbiological stability of breast fillet for a longer time compared to the control sample: after 7 days of storage, the total microbial number in the control sample was $1.4 \cdot 10^6$ CFU/g, which is higher than the permissible level according to the requirements of EAEU TR 051/2021, while in alginate coating samples this indicator remained within acceptable values. Thus, film coatings based on sodium alginate with the addition of protein hydrolysate as an active component have the potential to ensure the safety and biosafety of poultry meat during storage.

Keywords: bioactive coating, protein hydrolysate, sodium alginate, shelf life, weight loss, color characteristics

Acknowledgements. The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation, project number 23-26-00153.

For citation: Zinina O. V., Merenkova S. P., Vishnyakova E. A., Neverova O. P. Analysis of the effectiveness of using a bioactive coating to ensure the quality and biosafety of poultry meat during storage. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (08): 1026–1036. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1026-1036>. (In Russ.)

Date of paper submission: 20.06.2024, **date of review:** 26.06.2024, **date of acceptance:** 15.07.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

Производство мяса птицы в России, по прогнозам экспертов, продолжит умеренно повышаться, что вызвано ростом потребительского спроса и высокой рентабельностью благодаря короткому производственному циклу. Доступность мяса птицы объясняется быстрым наращиванием объемов производства, возможным благодаря современным достижениям науки, способствующим повышению эффективности и увеличению объемов производства. Также эксперты отмечают положительную динамику мирового производства мяса птицы, предвещая рост потребления на 20 % [1].

Мясо птицы является наиболее распространенным видом мясного сырья, востребованным у потребителей, но в то же время скоропортящимся продуктом. Высокая влажность и содержание пита-

тельных веществ [2] обеспечивают благоприятную среду для роста патогенных микроорганизмов и ускорения порчи. Микроорганизмы могут вызывать не только негативные изменения органолептических показателей и пищевой ценности мяса, но и серьезные риски для здоровья потребителей.

При хранении мяса происходит как микробиологическая, так и окислительная порча, затрагивающая изменение липидов, пигментов, белков и витаминов. Для этого вида порчи характерны потеря незаменимых жирных кислот и витаминов, изменение цвета и консистенции, а также появление прогорклого запаха и вкуса, которые ухудшают потребительские свойства мяса [3].

Отмечено, что микробиологическая порча продуктов питания – значимая экономическая и социальная проблема в мире. Ежегодно регистрируется

несколько миллионов случаев пищевых инфекций, в том числе со смертельным исходом [4]. Соответственно, снижение микробиологических рисков при потреблении продуктов питания, обеспечение их безопасности – важные задачи пищевой промышленности во всем мире.

Для производителей актуальной задачей является увеличение сроков хранения охлажденного мяса и мясных продуктов с целью расширения зоны поставки продукции и увеличения времени реализации [5; 6], особенно через крупные торговые сети. Для увеличения срока хранения мясного сырья производители используют различные подходы и методы, помогающие контролировать микробиологическую порчу и окисление жиров. Причем основная стратегия в этом направлении – добавление антиоксидантов и противомикробных препаратов. Однако современные потребители больше предпочитают натуральные продукты, что ограничивает производителей в использовании пищевых добавок в пищевых продуктах. Поэтому в последние годы многие исследователи находятся в поиске новых подходов и методов сохранения мясных продуктов, в том числе исследуют возможности применения пленок и покрытий из натуральных биополимеров [7]. Отмечено, что холодильное хранение мяса в защитных пленочных покрытиях является наиболее эффективным и экологичным способом увеличения его сроков хранения при сохранении товарного вида и качественных показателей, а также снижения потерь влаги сырья [8].

Съедобные покрытия определяются как слой биополимерных композиций, плотно прилегающих к поверхности пищевых продуктов. При покрытии поверхности продукта создается своего рода защитная активная оболочка, обладающая регулирующими биохимическими и микробиологическими процес-

сы свойствами в системе «продукт – окружающая среда». Выбор основы такой композиции – важный фактор для правильной реализации хранения продукта в покрытии и зависит от типа продукта, его свойств, в первую очередь влажности. Биополимерная матрица действует как барьер против паров и газов, замедляя тем самым потерю влаги и окисление миоглобина и липидов, а также продлевает срок годности.

В качестве матрицы пищевого покрытия наиболее часто используют хитозан, желатин и альгинат. Альгинаты могут быть как натурального происхождения (из клеточных стенок бурых водорослей), так и синтетического (получают микробным синтезом). Альгинат является линейным водорастворимым полисахаридом, способным реагировать с катионами многовалентных металлов. Данное свойство используется для повышения механической прочности и улучшения барьерных свойств пленок на основе альгината. При повышении концентрации катионов гели из альгината имеют плотную структуру с невысокой пористостью и проницаемостью [9].

Антиоксидантный и антимикробный эффекты пищевых покрытий обеспечиваются включением в состав биокомпозита таких активных веществ, как натуральные антиоксиданты, эфирные масла, экстракты, бактериальные препараты, активные пептиды и другие вещества с соответствующими свойствами [10–12].

Большой интерес к новым разработкам биоразлагаемых биоактивных пленочных покрытий для продуктов питания связан не только с их натуральным происхождением и возможностью обходиться без синтетических материалов, несущих потенциальную опасность миграции химических элементов в состав продукции. Другим важным аспектом, привлекающим все большее внимание научного со-



Рис. 1. Технология получения опытных образцов мяса в покрытии

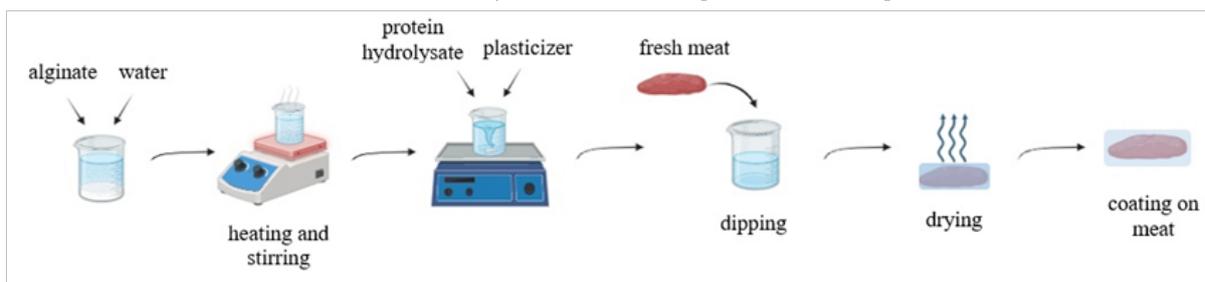


Fig. 1. Technology for obtaining prototypes of coated meat

общества к таким материалам, является экологический фактор. Способность пищевых покрытий, изготовленных на основе биополимеров, разлагаться в почве и превращаться в биогумус, имеет большое значение для снижения негативного воздействия на окружающую среду огромных объемов упаковочных материалов [13].

Целью исследований является установление эффективности биоактивного покрытия на основе альгината натрия с белковым гидролизатом в качестве активного компонента при хранении мяса птицы.

Методология и методы исследования (Methods)

Объект исследования – филе грудки цыпленка-бройлера (ООО «Нагайбакский птицеводческий комплекс», Челябинская область) свежее охлажденное, хранившееся в условиях холодильной камеры при температуре 3 ± 1 °С в упакованном виде (в альгинатном покрытии) и без упаковки (контрольный образец). Для упаковки использовали покрытие на основе альгината натрия (ООО «Ингредико», Россия) с добавлением в качестве активного компонента белкового гидролизата в количестве 1 % от массы композиции, а также покрытие без активного компонента. Технология получения и упаковывания сырья приведена на рис. 1.

Перед закладкой на холодильное хранение, а также в процессе хранения филе цыпленка-бройлера через 3 и 7 суток оценивали следующие показатели:

- потери массы при хранении определяли как разницу между массой филе с покрытием сразу после упаковывания и массой филе после хранения в течение 3 и 7 суток;

- массовую долю влаги высушиванием при 105 °С до постоянной массы;

- микробиологические показатели (общее микробное число, колиформные бактерии) с помощью тестов «Петритест» (НПО «Альтернатива», Россия). Для приготовления исходных разведений образцов продукта отбирали по 1 г средней измельченной пробы и добавляли 10 мл стерильного физиологического раствора. Из исходного разведения готовили серию десятикратных разведений. Для определения содержания общего количества колиформных бактерий в 1 г использовали «Петритесты», содержащие индикатор для окрашивания колоний колиформных бактерий в красный цвет. После внесения 0,2 см³ разведения на поверхность субстрата «Петритесты» помещали в термостат и инкубировали при температуре (36 ± 1) °С в течение (12–24) часов. Для подсчета колоний отбирали тесты, на которых выросло от 15 до 300 колоний. Результат умножали на значение соответствующего разведения, чтобы получить общее количество колиформных бактерий в 0,2 см³ образца. Согласно рекомендациям производителя, для получения результата в 1 см³ результаты подсчета умножали на 5;

- цветовые характеристики филе определяли с помощью колориметра NR60CP (Китай). Перед измерениями проводилась калибровка прибора с использованием белой стандартной пластинки ($L^* = 96,77$, $a^* = 0,11$, $b^* = -0,71$), которую также применяли в качестве фона при измерении цветовых характеристик пленок (светлота (L^*), краснота/зеленоватость (a^*) и желтизна/голубоватость (b^*)). Суммарное цветовое различие (ΔE) и цветность (Chroma) рассчитывали по формулам (1) и (2) [14].

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L)^2 + (a^* - a)^2 + (b^* - b)^2}, \quad (1)$$

$$Chroma = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (2)$$

где L^* , a^* , b^* – стандартные значения параметров цвета белой пластины;

L , a , b – значения параметров цвета пленок.

Средние значения трех измерений приняты за достоверные при $p \leq 0,05$.

Результаты (Results)

Известно, что использование низких температур при хранении мясного сырья, в том числе охлаждения, оказывает неблагоприятное воздействие на микроорганизмы. В связи с тем, что мясо является одним из самых скоропортящихся пищевых продуктов, охлаждение как наиболее распространенный способ хранения продуктов при низких температурах с целью задержки развития бактерий и предотвращения порчи применяют для хранения мяса после убоя, переработки, а затем и в розничной торговле [15].

На порчу мясного сырья в процессе хранения влияют различные факторы:

- начальная обсемененность сырья;

- содержание влаги и рН;

- условия хранения и параметры окружающей среды (наличие упаковки и ее характеристики, температура, относительная влажность воздуха, доступность кислорода, свет).

Основные задачи покрытий при сохранении характеристик мясных продуктов, влияющих на увеличение сроков хранения, включают:

- сохранение микробиологических показателей на уровне регламентируемых значений ТР ЕАЭС 051/2021;

- сохранение питательной ценности и товарных характеристик (например, цвета, запаха, вкуса и консистенции).

Органолептические показатели являются наиболее важными при выборе продукта потребителем. Изменение свежести мясного сырья можно установить оценением органолептических показателей. И если изменения вкуса и запаха невозможно установить непосредственно в торговой сети при герметично закрытом продукте, то цвет может служить индикатором окислительных изменений при порче сырья (рис. 2). Результаты количественной оцен-

ки цветовых характеристик филе грудки цыпленка-бройлера (таблица 1) показали, что в процессе хранения поверхность образцов мяса становится более темной. Показатель красноты (a) повышается у всех образцов одновременно со снижением показателя светлоты (L), однако более выражены изменения у образцов филе без покрытия, что объясняется активным взаимодействием поверхности мяса с кислородом воздуха и интенсивным протеканием окислительных процессов пигментов мяса.

Полученные данные по изменениям цветовых характеристик мяса птицы при хранении согласуются с результатами других ученых. Так, при холодильном хранении филе индейки параметры светлоты (L) и красноты (a^*) постепенно снижались за 6 суток хранения на 16,15 % и 32,38 %, соответственно по сравнению с исходными значениями. При этом значительное снижение этих параметров отмечено на третьей сутки [16]. В проведенных исследованиях показатель светлоты (L) у образца без покрытия снизился на 41,4 % ($p \leq 0,05$) на седьмые

сутки хранения по сравнению с начальным значением, в то время как у покрытых образцов на 9,07–11,7 % ($p \leq 0,05$). Показатель красноты также у образца филе без покрытия значительно увеличился по сравнению с начальным значением – в 9 раз. У образцов филе в альгинатном покрытии с белковым гидролизатом краснота повысилась в 5,1 раза, в покрытии без гидролизата белка – в 5,6 раза. Окислительные реакции липидов приводят к образованию метмиоглобина (желтого или коричневого цвета), что оказывает влияние на снижение значения светлоты (L) и повышение красноты (a^*) при холодильном хранении. Содержащиеся в биоактивном покрытии вещества с антиоксидантными свойствами снижают реакции окисления, предотвращая быстрое снижение значений показателя светлоты (L).

Значения показателя желтизны (b^*) всех образцов филе грудки постепенно увеличивались в процессе хранения, что может быть связано с ферментативной реакцией потемнения фенольных компонентов. Повышенную желтизну также связывают

перед закладкой на холодильное хранение
before storing in cold storage



через 3 суток хранения
after 3 days of storage



через 7 суток хранения
after 7 days of storage



a

б

в

Рис. 2. Внешний вид опытных образцов филе грудки цыпленка-бройлера:

a) контрольный образец филе грудки (без покрытия), б) опытный образец филе грудки в альгинатном покрытии без гидролизата белка, в) опытный образец филе грудки в альгинатном покрытии с гидролизатом белка

Fig. 2. Appearance of broiler chicken breast fillet samples:

a) control sample of breast fillet (without coating), b) test sample of breast fillet in alginate coating without protein hydrolysate, c) test sample of breast fillet in alginate coating with protein hydrolysate

с накоплением продуктов окисления миоглобина, а также с высоким уровнем окисления липидов [17]. Мясо птицы имеет тенденцию желтеть в период хранения по мере снижения качества. Результаты исследований показали заметное повышение показателя желтизны (b^*) к седьмым суткам хранения по сравнению с начальными значениями у всех образцов филе, однако более высокие значения желтизны (b^*) имел контрольный образец без покрытия ($p < 0,05$). Экспериментальные данные подтвердили, что альгинатное покрытие эффективно снижает негативное изменение цветовых характеристик мяса птицы за счет предотвращения окислительных процессов.

Содержание влаги в мясе влияет на органолептические показатели и стабильность при хранении в связи с тем, что многие химические, ферментативные и микробиологические процессы непосредственно связаны с высоким содержанием влаги. В зависимости от условий хранения, в том числе от

свойств упаковочных материалов, содержание влаги может колебаться как в положительную, так и отрицательную сторону [18]. От содержания влаги в продукте зависит его выход после той или иной технологической операции, в том числе усушка мяса в основном происходит именно за счет потерь влаги.

Результаты исследований потери массы при хранении филе грудки и массовой доли влаги в образцах (рис. 3) показали, что образец без покрытия быстрее терял влагу и, как следствие, вес по сравнению с образцами в покрытии. Также следует отметить, что массовая доля влаги в образце с покрытием через трое суток хранения оказалась незначительно выше начального значения. Аналогичные результаты были получены при исследовании мяса птицы, хранившегося в хитозановых пленках. Авторы объясняют это явление высокими гидрофильными свойствами полимера, способностью поглощать влагу как из продукта, так и из окружающей среды [19].

Таблица 1
Цветовые характеристики филе грудки цыпленка-бройлера

Образец филе грудки цыпленка-бройлера	L	a^*	b^*	ΔE	Интенсивность цвета
Без покрытия: перед закладкой на хранение	48,14 ± 2,05	0,77 ± 0,02	1,73 ± 0,09	48,69	1,89
через 3 суток хранения	37,13 ± 1,63	3,86 ± 0,08	5,88 ± 0,17	60,12	7,03
через 7 суток хранения	28,23 ± 0,94	6,86 ± 0,17	6,60 ± 0,14	69,26	9,52
В альгинатном покрытии без гидролизата белка: перед закладкой на хранение	48,21 ± 1,60	0,84 ± 0,02	1,88 ± 0,08	48,63	2,06
через 3 суток хранения	48,43 ± 1,27	2,64 ± 0,03	3,44 ± 0,06	48,58	4,34
через 7 суток хранения	43,85 ± 1,14	4,71 ± 0,09	6,22 ± 0,16	59,74	7,80
В альгинатном покрытии с гидролизатом белка: перед закладкой на хранение	48,09 ± 1,21	0,81 ± 0,03	1,89 ± 0,10	48,75	2,06
через 3 суток хранения	44,63 ± 1,08	2,85 ± 0,04	3,40 ± 0,05	52,37	4,44
через 7 суток хранения	42,44 ± 0,81	4,68 ± 0,08	5,25 ± 0,14	59,33	7,03

Примечание. $P \leq 0,05$.

Table 1
Color characteristics of broiler chicken breast fillet

Breast fillet sample broiler chicken	L	a^*	b^*	ΔE	Color intensity
Uncoated: before storage	48.14 ± 2.05	0.77 ± 0.02	1.73 ± 0.09	48.69	1.89
after 3 days of storage	37.13 ± 1.63	3.86 ± 0.08	5.88 ± 0.17	60.12	7.03
after 7 days of storage	28.23 ± 0.94	6.86 ± 0.17	6.60 ± 0.14	69.26	9.52
In alginate coating without protein hydrolysate: before storage	48.21 ± 1.60	0.84 ± 0.02	1.88 ± 0.08	48.63	2.06
after 3 days of storage	48.43 ± 1.27	2.64 ± 0.03	3.44 ± 0.06	48.58	4.34
after 7 days of storage	43.85 ± 1.14	4.71 ± 0.09	6.22 ± 0.16	59.74	7.80
In alginate coating with protein hydrolysate: before storage	48.09 ± 1.21	0.81 ± 0.03	1.89 ± 0.10	48.75	2.06
after 3 days of storage	44.63 ± 1.08	2.85 ± 0.04	3.40 ± 0.05	52.37	4.44
after 7 days of storage	42.44 ± 0.81	4.68 ± 0.08	5.25 ± 0.14	59.33	7.03

Note. $P \leq 0.05$.

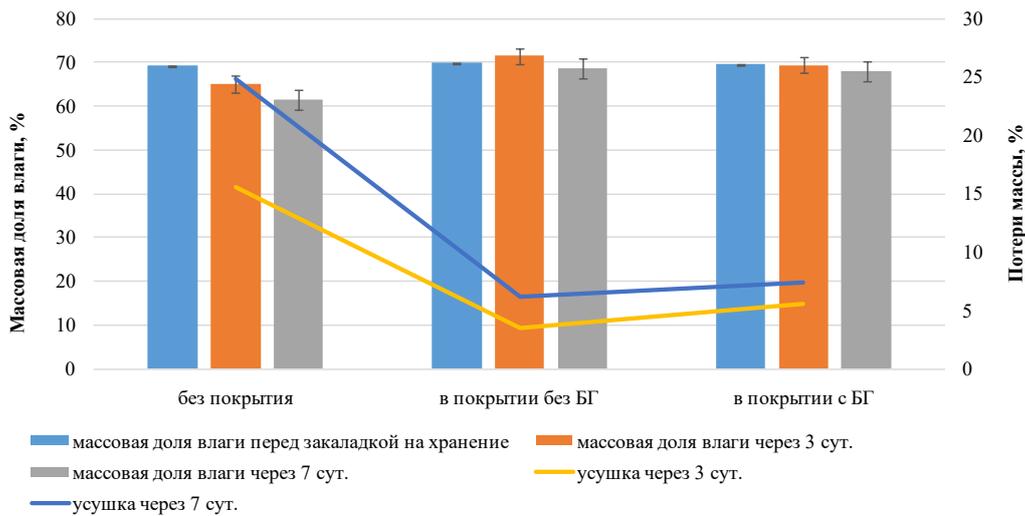


Рис. 3. Изменения массовой доли влаги и потери массы образцов филе грудки цыпленка-бройлера в процессе хранения (БГ – белковый гидролизат)

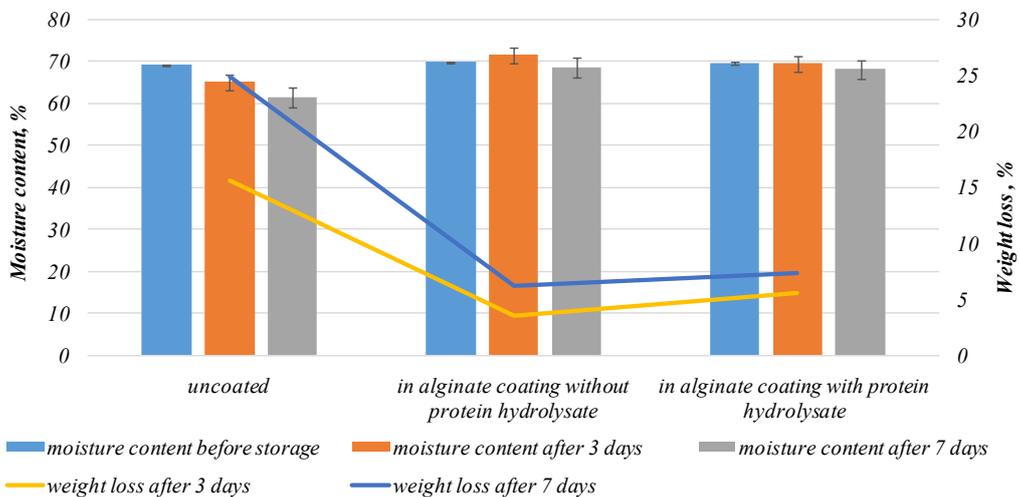


Fig. 3. Changes in the mass fraction of moisture and weight loss of broiler chicken breast fillet samples during storage

Значение pH, как и содержание влаги, имеет большое значение при хранении мяса и влияет на протекание биохимических и микробиологических процессов. Данный показатель связан с такими характеристиками мяса, как цвет, консистенция, способность удерживать влагу и жир, микробиологическая стабильность. Уровень pH в свежем мясе птицы варьирует от 5,2 до 7 [19].

Результаты определения pH показали, что в период хранения значения показателя изменялись незначительно (рис. 4) во всех образцах.

Результаты микробиологических исследований показали отсутствие во всех образцах филе грудки бактерий группы кишечной палочки. Общее микробное число увеличивалось более интенсивно в образце без покрытия и на седьмые сутки хранения превысило допустимый уровень согласно требованиям Технического регламента Евразийского экономического союза «О безопасности мяса птицы и продукции его переработки» (ТР ЕАЭС 051/2021) $1 \cdot 10^5$ КОЕ/г. В таблице 2 приведены результаты

оценки общего микробного числа в образцах филе грудки цыпленка-бройлера.

Мясо является хорошей питательной средой для бактерий, так как содержит большое количество свободной влаги, аминокислоты, пептиды и сахара. Присутствие бактерий на поверхности мяса зависит от условий окружающей среды и исходной обсемененности. Кроме того, мышечная ткань птицы содержит мононенасыщенные и полиненасыщенные жирные кислоты, которые быстро окисляются под действием кислорода. Поэтому мясо, хранящееся на воздухе, подвержено быстрой микробиологической порче, что подтверждается результатами проведенного эксперимента.

Результаты таблицы 2 также показывают, что пленки с добавлением гидролизата белка оказывают ингибирующий эффект на рост бактерий, что связано с наличием в его составе активных пептидов, оказывающих разрушающее действие на клеточную мембрану бактерий, вызывая их гибель.

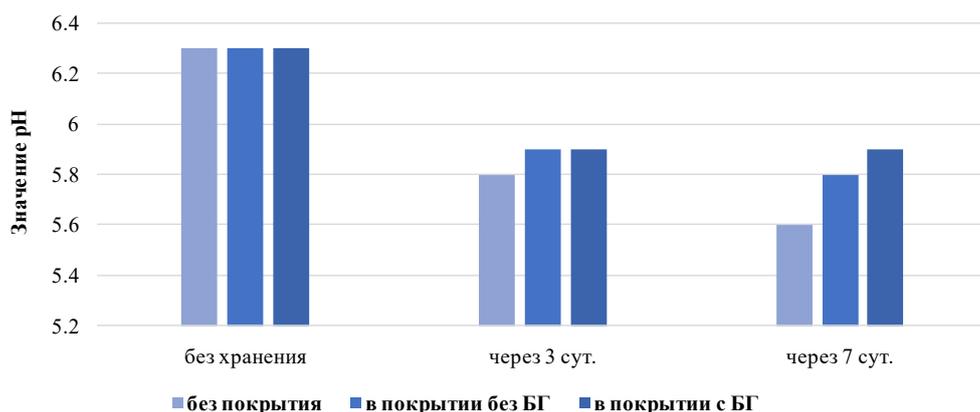


Рис. 4. Изменения pH образцов филе грудки цыпленка-бройлера в процессе хранения (БГ – белковый гидролизат)

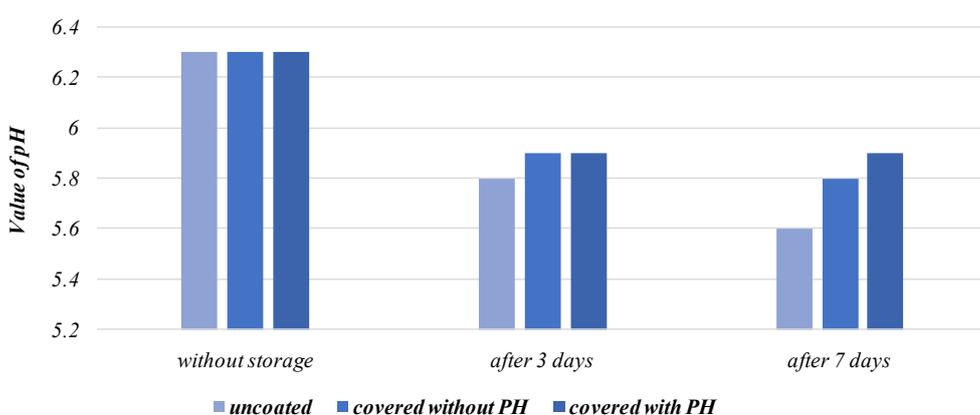


Fig. 4. Changes in pH of broiler chicken breast fillet samples during storage (PH – protein hydrolysate)

Таблица 2
Результаты микробиологических исследований филе грудки цыпленка-бройлера

Период хранения, суток	Содержание микроорганизмов в образцах филе грудки, КОЕ/г		
	В покрытии без БГ	В покрытии с 1 % БГ	Без покрытия
Общее микробное число			
0	$2,0 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^3$
3	$2,2 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^4$
7	$0,9 \cdot 10^5$	$0,7 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$

Примечание. БГ – белковый гидролизат.

Table 2
Results of microbiological studies of broiler chicken breast fillet

Storage period, days	Content of microorganisms in breast fillet samples, CFU/g		
	In a coating without PH	In a coating with 1% of PH	Uncoated
Total microbial count			
0	$2.0 \cdot 10^3$	$2.0 \cdot 10^3$	$2.3 \cdot 10^3$
3	$2.2 \cdot 10^4$	$1.8 \cdot 10^4$	$7.2 \cdot 10^4$
7	$0.9 \cdot 10^5$	$0.7 \cdot 10^5$	$1.4 \cdot 10^6$

Note. PH – protein hydrolysate.

В целом результаты изменений цветовых характеристик филе грудки в процессе хранения коррелируют с изменениями значений pH и общего микробного числа. Изменение цвета мяса происходит не только при окислении в воздушной среде, но и за счет накопления продуктов метаболизма микроорганизмов, вследствие чего происходит изменение pH [20]. Альгинатное покрытие позволило не

только снизить негативное воздействие кислорода воздуха, но и за счет присутствия активного компонента замедлить окислительные и микробиологические процессы. Покрытие действовало как барьер для проникновения кислорода и приводило к снижению окисления миоглобина. Аналогичные эффекты установлены многими учеными при исследовании упакованных продуктов питания в био-

активные пленки и покрытия с введением в состав белковых гидролизатов [21].

Таким образом, результаты исследований показали эффективность использования альгинатного покрытия с добавлением белкового гидролизата для повышения микробиологической стабильности и более длительного сохранения свежести филе грудки цыпленка-бройлера при хранении, что в совокупности с другими эффектами белкового гидролизата обеспечивает увеличение сроков хранения.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Проведены исследования филе грудки цыпленка-бройлера, подвергнутого хранению в холодильной камере в течение 7 суток в упакованном виде – на поверхность мяса нанесено покрытие на основе альгината натрия с добавлением в качестве активного компонента белкового гидролизата. В качестве контроля выступал образец филе грудки без покрытия.

Результаты исследований показали, что в покрытии мясо лучше сохраняет внешний вид и цвет, содержание влаги остается на достаточно высоком уровне по сравнению с начальным значением и снижается усушка. Также установлено, что альгинатное покрытие обеспечивает микробиологическую стабильность филе грудки более длительное время по сравнению с контрольным образцом. При этом белковый гидролизат проявил антимикробную активность, в образце с добавлением в покрытие белкового гидролизата через 7 суток хранения выявлено наименьшее количество бактерий.

Таким образом, пленочные покрытия на основе альгината натрия с добавлением в качестве активного компонента белкового гидролизата обладают потенциалом для обеспечения биологической безопасности мяса птицы при хранении.

Библиографический список

1. Маринченко Т. Е., Кузьмин В. Н., Кузьмина Т. Н., Королькова А. П., Горячева А. В., Скляр А. В., Гусев В. А., Зазыкина Л. А. Основные результаты реализации подпрограммы ФНТП для птицеводства России // Perfect Agriculture. 2024. № 2. С. 42–46.
2. Уажанова Р. У., Тютеебаева К. Е. Факторы, обуславливающие безопасность и качество мяса птицы // Вестник Алматинского технологического университета. 2022. № 2. С. 108–114. DOI: 10.48184/2304-568X-2022-1-108-114.
3. Pavelková A., Kačániová M., Horská E., Rovná K., Hleba L., Petrová J. The effect of vacuum packaging, EDTA, oregano and thyme oils on the microbiological quality of chicken's breast // Anaerobe. 2014. Vol. 29. Pp. 128–133. DOI: 10.1016/j.anaerobe.2013.09.002.
4. Ермоленко З. М., Фурсова Н. К. Микробиологическая порча пищевых продуктов и перспективные направления борьбы с этим явлением // Бактериология. 2018. № 3 (3). С. 46–57. DOI: 10.20953/2500-1027-2018-3-46-57.
5. Дегтярь А. С., Семенченко С. В. Оптимальные сроки хранения охлажденного мяса индейки, обусловленные разными способами упаковки // Молочнохозяйственный вестник. 2017. № 4 (28). С. 30–37. DOI: 10.24411/2225-4269-2017-00043.
6. Ягодка Ю. В., Федюк В. В., Федюк Е. И., Семенченко С. В. Продолжительность хранения охлажденного мяса индейки при различных способах упаковки // Вестник КрасГАУ. 2018. № 1. С. 121–127.
7. Lashkari H., Halabinejad M., Rafati A., Namdar A. Shelf life extension of veal meat by edible coating incorporated with Zataria multiflora essential oil // Journal of Food Quality. 2020. Article number 8871857. DOI: 10.1155/2020/8871857.
8. Кюрегян Г. П., Кюрегян О. Д., Комаров Н. В., Дибирасулаев М. А. Пищевые пленкообразующие покрытия для мяса и мясных продуктов // Мясные технологии. 2011. № 6. С. 44–45.
9. Chaari M., Elhadef K., Akermi S., Ben Akacha B., Fourati M., Chakchouk Mtibaa A., Ennouri M., Sarkar T., Shariati M.A., Rebezov M., Abdelkafi S., Mellouli L., Smaoui S. Novel Active Food Packaging Films Based on Gelatin-Sodium Alginate Containing Beetroot Peel Extract // Antioxidants. 2022. Vol. 11. Article number 2095. DOI: 10.3390/antiox11112095.
10. Hu X., Yuan L., Han L., Li S., Song L. Characterization of Antioxidant and Antibacterial Gelatin Films Incorporated with Ginkgo Biloba Extract // RSC Advances. 2019. Vol. 9. Pp. 27449–27454. DOI: 10.1039/C9RA05788A.
11. Jastrzębska A., Kmiecik A., Gralak Z., Brzuzy K., Nowaczyk J., Cichosz M., Krzemiński M. P., Szłyk E. Determination of Biogenic Amine Level Variations upon Storage, in Chicken Breast Coated with Edible Protective Film // Foods. 2024. Vol. 13. Article number 985. DOI: 10.3390/foods13070985.
12. Silva S. J., Samba N., Mendes J., Pires J. R. A., Rodrigues C., Curto J., Gomes A., Fernando A. L., Silva L. Sustainable Food Packaging with Chitosan Biofilm Reinforced with Nanocellulose and Essential Oils // Macromol. 2023. Vol. 3. Pp. 704–722. DOI: 10.3390/macromol3040040.
13. Díaz-Montes E., Castro-Muñoz R. Edible Films and Coatings as Food-Quality Preservers: An Overview // Foods. 2021. Vol. 10. Article number 249. DOI: 10.3390/foods10020249.

14. Zhang Y., Man J., Li J., Xing Z., Zhao B., Ji M., Xia H., Li J. Preparation of the alginate/carrageenan/shellac films reinforced with cellulose nanocrystals obtained from enteromorpha for food packaging // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022. Vol. 218. Pp. 519–532. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.07.145.
15. Ercolini D., Russo F., Nasi A., Ferranti P., Villani F. Mesophilic and psychrotrophic bacteria from meat and their spoilage potential in vitro and in beef // *Applied and Environmental Microbiology*. 2009. Vol. 75. Pp. 1990–2001. DOI: 10.1128/AEM.02762-08.
16. Orkusz A., Rampanti G., Michalczuk M., Orkusz M., Foligni R. Impact of Refrigerated Storage on Microbial Growth, Color Stability, and pH of Turkey Thigh Muscles // *Microorganisms*. 2024. Vol. 12. Article number 1114. DOI: 10.3390/microorganisms12061114.
17. Xiong Y., Li S., Warner R. D., Fang Z. Effect of oregano essential oil and resveratrol nanoemulsion loaded pectin edible coating on the preservation of pork loin in modified atmosphere packaging // *Food Control*. 2020. Vol. 114. Article number 107226. DOI: 10.1016/j.foodcont.2020.107226.
18. Souza V. G. L., Pires J. R. A., Rodrigues P. F., Lopes A. A. S., Fernandes F. M. B., Duarte M. P., Coelho I. M., Fernando A. L. Bionanocomposites of chitosan/montmorillonite incorporated with Rosmarinus officinalis essential oil: Development and physical characterization // *Food Packaging and Shelf Life*. 2018. Vol. 16. Pp. 148–156. DOI: 10.1016/j.foodpack.2018.03.009.
19. Pires J. R. A., Almeida K. M., Augusto A. S., Vieira É. T., Fernando A. L., Souza V. G. L. Application of Biocomposite Films of Chitosan/ Natural Active Compounds for Shelf Life Extension of Fresh Poultry Meat // *Journal of Composites Science*. 2022. Vol. 6. Article number 342. DOI: 10.3390/jcs6110342.
20. Denzer M. L., Kiyimba F., Mafi G. G., Ramanathan R. Metabolomics of Meat Color: Practical Implications // *Current Proteomics*. 2022. Vol. 19. Pp. 299–307. DOI: 10.2174/1570164619666211230153145.
21. Tkaczewska J. Peptides and protein hydrolysates as food preservatives and bioactive components of edible films and coatings – a review // *Trends in Food Science & Technology*. 2020. Vol. 106. Pp. 298–311. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.10.022.

Об авторах:

Оксана Владимировна Зинина, доктор технических наук, доцент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия; доцент кафедры биотехнологии и пищевых продуктов, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0003-3729-1692, AuthorID 654624. *E-mail: zinaov@susu.ru*

Светлана Павловна Меренкова, кандидат ветеринарных наук, доцент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия; ORCID 0000-0002-8795-1065, AuthorID 668876. *E-mail: merenkovasp@susu.ru*

Елена Александровна Вишнякова, лаборант-исследователь УНИД, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия; ORCID 0000-0002-8557-9239, AuthorID 1152986. *E-mail: l_vishny@mail.ru*

Ольга Петровна Неверова, кандидат биологических наук, заведующая кафедрой биотехнологии и пищевых продуктов, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-2474-2290, AuthorID 393632. *E-mail: opneverova@mail.ru*

References

1. Marinchenko T. E., Kuz'min V. N., Kuz'mina T. N., Korol'kova A. P., Goryacheva A. V., Sklyar A. V., Gusev V. A., Zazykina L. A. Main results of the implementation of the FSTP subprogram for poultry farming in Russia. *Perfect Agriculture*. 2024; 2: 42–46. (In Russ.)
2. Uazhanov R. U., Tyutebayeva K. E. Factors determining the safety and quality of poultry meat. *Bulletin of Almaty Technological University*. 2022; 2: 108–114. DOI: 10.48184/2304-568X-2022-1-108-114. (In Russ.)
3. Pavelková A., Kačániová M., Horská E., Rovná K., Hleba L., Petrová J. The effect of vacuum packaging, EDTA, oregano and thyme oils on the microbiological quality of chicken's breast. *Anaerobe*. 2014; 29: 128–133. DOI: 10.1016/j.anaerobe.2013.09.002.
4. Ermolenko Z. M., Fursova N. K. Microbiological spoilage of food and promising approaches to combat the phenomenon. *Bacteriology*. 2018; 3 (3): 46–57. DOI: 10.20953/2500-1027-2018-3-46-57. (In Russ.)
5. Degtyar' A. S., Semenchenko S. V. The optimum shelf life of chilled turkey meat using different packaging methods. *Molochnokhozyaistvenny Vestnik*. 2017; 4 (28): 30–37. DOI: 10.24411/2225-4269-2017-00043. (In Russ.)
6. Yagodka Yu. V., Fedyuk V. V., Fedyuk E. I., Semenchenko S. V. The duration of cooled turkey meat storage at different ways of packaging. *The Bulletin of KrasGAU*. 2018; 1: 121–127. (In Russ.)
7. Lashkari H., Halabinejad M., Rafati A., Namdar A. Shelf life extension of veal meat by edible coating incorporated with Zataria multiflora essential oil. *Journal of Food Quality*. 2020: 8871857. DOI: 10.1155/2020/8871857.

8. Kyuregyan G. P., Kyuregyan O. D., Komarov N. V., Dibirasulaev M. A. Food film-forming coatings for meat and meat products. *Meat Technologies*. 2011; 6: 44–45. (In Russ.)
9. Chaari M., Elhadef K., Akermi S., Ben Akacha B., Fourati M., Chakchouk Mtibaa A., Ennouri M., Sarkar T., Shariati M.A., Rebezov M., Abdelkafi S., Mellouli L., Smaoui S. Novel Active Food Packaging Films Based on Gelatin-Sodium Alginate Containing Beetroot Peel Extract. *Antioxidants*. 2022; 11: 2095. DOI: 10.3390/antiox11112095.
10. Hu X., Yuan L., Han L., Li S., Song L. Characterization of Antioxidant and Antibacterial Gelatin Films Incorporated with Ginkgo Biloba Extract. *RSC Advances*. 2019; 9: 27449–27454. DOI: 10.1039/C9RA05788A.
11. Jastrzębska A., Kmieciak A., Gralak Z., Brzuzy K., Nowaczyk J., Cichosz M., Krzemiński M. P., Szłyk E. Determination of Biogenic Amine Level Variations upon Storage, in Chicken Breast Coated with Edible Protective Film. *Foods*. 2024; 13: 985. DOI: 10.3390/foods13070985.
12. Silva S. J., Samba N., Mendes J., Pires J. R. A., Rodrigues C., Curto J., Gomes A., Fernando A. L., Silva L. Sustainable Food Packaging with Chitosan Biofilm Reinforced with Nanocellulose and Essential Oils. *Macromol*. 2023; 3: 704–722. DOI: 10.3390/macromol3040040.
13. Díaz-Montes E., Castro-Muñoz R. Edible Films and Coatings as Food-Quality Preservers: An Overview. *Foods*. 2021; 10: 249. DOI: 10.3390/foods10020249.
14. Zhang Y., Man J., Li J., Xing Z., Zhao B., Ji M., Xia H., Li J. Preparation of the alginate/carrageenan/shellac films reinforced with cellulose nanocrystals obtained from enteromorpha for food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022; 218: 519–532. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.07.145.
15. Ercolini D., Russo F., Nasi A., Ferranti P., Villani F. Mesophilic and psychrotrophic bacteria from meat and their spoilage potential in vitro and in beef. *Applied and Environmental Microbiology*. 2009; 75: 1990–2001. DOI: 10.1128/AEM.02762-08.
16. Orkusz A., Rampanti G., Michalczyk M., Orkusz M., Foligni R. Impact of Refrigerated Storage on Microbial Growth, Color Stability, and pH of Turkey Thigh Muscles. *Microorganisms*. 2024; 12: 1114. DOI: 10.3390/microorganisms12061114.
17. Xiong Y., Li S., Warner R. D., Fang Z. Effect of oregano essential oil and resveratrol nanoemulsion loaded pectin edible coating on the preservation of pork loin in modified atmosphere packaging. *Food Control*. 2020; 114: 107226. DOI: 10.1016/j.foodcont.2020.107226.
18. Souza V. G. L., Pires J. R. A., Rodrigues P. F., Lopes A. A. S., Fernandes F. M. B., Duarte M. P., Coelho I. M., Fernando A. L. Bionanocomposites of chitosan/montmorillonite incorporated with Rosmarinus officinalis essential oil: Development and physical characterization. *Food Packaging and Shelf Life*. 2018; 16: 148–156. DOI: 10.1016/j.foodpack.2018.03.009.
19. Pires J. R. A., Almeida K. M., Augusto A. S., Vieira É. T., Fernando A. L., Souza V. G. L. Application of Biocomposite Films of Chitosan/ Natural Active Compounds for Shelf Life Extension of Fresh Poultry Meat. *Journal of Composites Science*. 2022; 6: 342. DOI: 10.3390/jcs6110342.
20. Denzer M. L., Kiyimba F., Mafi G. G., Ramanathan R. Metabolomics of Meat Color: Practical Implications. *Current Proteomics*. 2022; 19: 299–307. DOI: 10.2174/1570164619666211230153145.
21. Tkaczewska J. Peptides and protein hydrolysates as food preservatives and bioactive components of edible films and coatings – A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2020; 106: 298–311. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.10.022.

Authors' information:

Oksana V. Zinina, doctor of technical sciences, associate professor of the department of food and biotechnology, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia; associate professor of the department of biotechnology and food products, Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0003-3729-1692, AuthorID 654624. *E-mail: zininaov@susu.ru*

Svetlana P. Merenkova, candidate of veterinary sciences, associate professor of the department of food and biotechnology, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia; ORCID 0000-0002-8795-1065, AuthorID 668876. *E-mail: merenkovasp@susu.ru*

Elena A. Vishnyakova, research laboratory assistant at the department of scientific and innovative activities, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia; ORCID 0000-0002-8557-9239, AuthorID 1152986. *E-mail: l_vishny@mail.ru*

Olga P. Neverova, candidate of biological sciences, head of the department of biotechnology and food products, Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0002-2474-2290, AuthorID 393632. *E-mail: opneverova@mail.ru*

Использование биологически активных веществ в кормлении сельскохозяйственной птицы (обзор)

Н. М. Казачкова[✉], К. Ш. Картеkenov, Г. К. Дускаев

Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

[✉]E-mail: yagoda-oren@mail.ru

Аннотация. Для получения максимальной выгоды от производства мяса птицы необходимо балансировать рационы биологически активными компонентами. Недостаточное же их количество в рационах способствует торможению процессов биосинтеза белка, снижает иммунологический статус и резистентность организма, происходящих в результате патологических изменений в органах и тканях дефицитного организма. **Целью работы** является систематизация литературных данных применения в кормовой базе сельскохозяйственной птицы различных биологически активных добавок для повышения ее продуктивных характеристик и улучшения жизненного благополучия. **Методы.** В работе проведен анализ исследований отечественных и зарубежных ученых применяемых кормовых средств с включением биологически активных веществ, необходимых для нормального физиологического развития сельскохозяйственной птицы, получения максимальной продуктивности и сохранности поголовья. Использованы интернет-ресурсы: РИНЦ <https://www.elibrary.ru>, Пабмед <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>, сервис <https://google.ru>. **Результаты.** В предлагаемом обзоре благодаря системному анализу полученных данных можно судить о большом интересе мирового научного сообщества к организации правильного, сбалансированного питания птицы. Следует отметить, что предоставляемые данные о новых препаратах и кормовых добавках, поступающих на отечественный рынок, являются предметом широкого круга исследований современных ученых, что свидетельствует о большом количестве публикаций в этом направлении. **Научная новизна.** Обзор представлен с учетом новых мировых разработок в области кормления сельскохозяйственной птицы, балансирования рационов по жизненно необходимым компонентам для улучшения продуктивных качеств и повышения резистентности организма к различным возбудителям.

Ключевые слова: биологически активные вещества, пробиотики, витамины, ферменты, микроэлементы, цыплята-бройлеры

Для цитирования: Казачкова Н. М., Картеkenov К. Ш., Дускаев Г. К. Использование биологически активных веществ в кормлении сельскохозяйственной птицы // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 08. С. 1037–1044. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1037-1044>.

Благодарности. Работа выполнена в соответствии с планом НИР FNWZ-2024-0002.

Дата поступления статьи: 18.12.2023, **дата рецензирования:** 08.05.2024, **дата принятия:** 15.06.2024.

The use of biologically active substances in poultry feeding (review)

N. M. Kazachkova[✉], K. Sh. Kartekenov, G. K. Duskaev

Federal Scientific Center of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

[✉]E-mail: yagoda-oren@mail.ru

Abstract. To obtain maximum benefits from poultry production, it is necessary to balance diets with biologically active components. An insufficient amount of them in diets helps to inhibit the processes of protein biosynthesis, reduces the immunological status and resistance of the body, which occur as a result of pathological changes in

the organs and tissues of the deficient organism. **The purpose** of the study is to systematize the literature data on the use of various biologically active additives in the feed base of poultry, to increase its productive characteristics and improve the well-being of life. **Methods.** The work analyzes the research of domestic and foreign scientists on the used feed products, with the inclusion of biologically active substances necessary for the normal physiological development of poultry, obtaining maximum productivity and safety of the livestock. Internet resources used: RSCI – <https://www.elibrary.ru>, PubMed – <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>, also <https://google.ru>. **Results.** In the proposed review, thanks to a systematic analysis of the data obtained, one can judge the great interest of the world scientific community in organizing proper, balanced nutrition for poultry. It should be noted that the data provided on new drugs and feed additives entering the domestic market are the subject of a wide range of studies by modern scientists. This indicates a large number of publications in this direction. **Scientific novelty.** The review is presented taking into account new world developments in the field of feeding poultry, balancing diets with vital components to improve productive qualities and increase the body's resistance to various pathogens.

Keywords: biologically active substances, probiotics, vitamins, enzymes, trace elements, broiler chickens.

Acknowledgments. The study was carried out in accordance with the research plan FNWZ-2024-0002.

For citation: Kazachkova N. M., Kartekenov K. Sh., Duskaev G. K. The use of biologically active substances in feeding poultry. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (08): 1037–1044. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1037-1044>. (In Russ.)

Date of paper submission: 18.12.2023, **date of review:** 08.05.2024, **date of acceptance:** 15.06.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

В постоянно развивающемся современном мире перед наукой и производством стоят определенные задачи, такие как получение продуктивности с наибольшей производительностью и минимальной стоимостью производства. Решение этих задач возможно осуществить с помощью использования современных пород и кроссов с высоким генетическим потенциалом, а также путем скармливания сбалансированных комбикормов по различным биологически активным компонентам.

Одно из первых мест в структуре рационов занимают БМВД, БВД и премиксы, в основе которых стоят витамины, микроэлементы, аминокислоты, пробиотики и другие биологически активные вещества [1].

Дефицит веществ, указанных выше, способствует развитию нарушений процесса обмена веществ на органном и тканевом уровне, происходит спад в течении химических реакций образования белка, заметно снижаются иммунологический статус организма птицы и его резистентность. В результате у всех видов животных и птиц обнаруживаются патологии органов желудочно-кишечного тракта и воспроизводительной системы, наблюдается падеж, особенно молодняка [2].

Одно из ключевых мест в рационе сельскохозяйственной птицы принадлежит премиксам, которые в своей основе содержат различные питательные вещества и другие важные элементы [3]. Недостаток вышеописанных веществ, имеющийся в кормовой базе, приводит к необходимости расчета новых балансирующих добавок с использованием кормов местного происхождения [4].

Методология и методы исследования (Methods)

Поиск и сравнительный анализ литературы отечественных и зарубежных ученых о применении различных кормовых средств с включением биологически активных веществ в рационы сельскохозяйственной птицы проводили с использованием различных интернет-ресурсов: <https://www.elibrary.ru>, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>, сервиса <https://google.ru>.

Результаты (Results)

В исследовании Н. А. Дюжевой было доказано, что использование премикса, приготовленного из горчичного белоксодержащего концентрата «Гор-линка», является эффективным. Исследования проводились на ремонтном молодняке кур, и результаты показали увеличение живой массы на 3,3 %, среднесуточный привес на 11,6 %. Кроме того, затраты корма на 1 кг прироста живой массы были на 150 г ниже по сравнению с показателями цыплят контрольной группы [5].

Все это в совокупности привело к повышению яйценоскости и улучшению морфологических качеств яиц [5].

Включение в стартовый комбикорм комплексной добавки «Тенториум плюс» для цыплят-бройлеров в дозе 1 кг/т снижает затраты кормовых средств, увеличивает сохранность поголовья за счет усиления защитных функций организма [6].

Пробиотики – препараты, в составе которых имеются живые непатогенные микроорганизмы, которые способны восстанавливать нормальную микрофлору, а также губительно воздействовать на патогенные бактерии кишечника и оказывать положительное влияние на организм хозяина [4]. Пробиотики и их производные применяются для

улучшения роста, развития, увеличения продуктивности, а также для лечения и предотвращения заболеваний желудочно-кишечного тракта [2]. Вышеописанные вещества встраиваются в микробное сообщество кишечника и за счет этого повышают переваримость и усвояемость питательных веществ и нейтрализуют токсины [7].

Благодаря проведенным экспериментам Л. Ю. Топурия с соавторами [4] отмечено, что при включении пробиотика «Олин» ведущие факторы дегенерации тимуса цыплят-бройлеров снижаются, что влияет на иммунную систему организма. Г. М. Топурия с коллегами в другом эксперименте установили, что при скармливании этого же препарата перепелам отмечалось заметное улучшение состава крови и нормализация обмена веществ, что, скорее всего, привело к увеличению их сохранности на 4,0–5,1 %.

Исследования других ученых показали эффективность применения Целобактерина на бройлерах, так как введение данного препарата птице способствовало снижению дозы введения антибиотиков и пребиотиков [3].

Исследование показало, что использование пробиотика «Ветоспорин-актив» в рационе цыплят-бройлеров в дозировках 0,5; 1 и 1,5 кг на тонну корма приводит к увеличению живой массы птицы на 42-е сутки на 9,0–12,9 %, а также к повышению сохранности поголовья. Это подтверждается улучшением переваримости питательных веществ рациона, баланса энергии и азота [8].

Зачастую совместно с пробиотиками в комбикормах для бройлеров используют пребиотики. Данные включения позволяют увеличить массу здоровой микробиоты у птицы [9]. Это обусловлено особенностью механизма действия пребиотиков в организме, в частности, в снижении способности к росту болезнетворной микрофлоры, происходящем в результате борьбы за места соединения к поверхности слизистой оболочки и субстратов; повышению уровня кислотности кишечной среды; культивировании эпителиальных клеток кишечника и пробуждение его местной иммунной системы [9; 10].

Так, при скармливании цыплятам-бройлерам пребиотика, в составе которого содержался инулин, отмечается увеличение уровня рентабельности производства мяса на 3,1 % [11].

В кормлении также используют комбинации пробиотиков совместно с пребиотическими препаратами – синбиотики. Вследствие их одновременного использования обеспечивается синергический эффект [6].

И. И. Кочиш с соавторами определили, что применение пребиотического препарата Velakt и пробиотика «Профорт» привело к увеличению численности целлюлозолитических и бифидобактерий в кишечнике кур кросса Ломанн в результате снижения патогенных микроорганизмов [2].

Огромную роль в кормлении молодняка сельскохозяйственных птиц играют витамины. Эти биологически активные вещества, участвующие в сложных процессах обмена веществ, синтеза, воздействуют на главные функционалы организма, действуют в формировании иммунного статуса [12].

В соответствии со статистикой сельскохозяйственной отрасли недостаток одного или нескольких витаминов у животных и птиц – один из поводов развития у них различных болезней. Витаминная недостаточность может сформироваться как при ошибочном кормлении, так и при фактической проблеме со здоровьем, например при расстройстве процессов пищеварения. Принципиально важно возмещать нехватку витаминов у животных и птиц дабы сохранить и приумножить поголовье [13].

Более того, витамины способны влиять на течение различных биохимических процессов в организме. Рациональное поступление веществ дает возможность полноценному развитию сердечно-сосудистой, нервной систем, воспроизводительной функции. Сбалансированный по витаминам рацион позволяет получать высокие показатели качества молока и мяса, повышает яйценоскость у сельскохозяйственной птицы [10].

Достаточное количество витаминов в организме птицы не всегда можно восполнить путем корректировки их в кормах. Кроме скармливания натуральных кормов, включающих витаминные препараты, целесообразно использование в смесях синтетических витаминов. Проблема заключается в том, что для птицеводческих предприятий покупка данных препаратов экономически невыгодна по причине высокой стоимости, поэтому данный вопрос очень актуален в настоящее время и требует рационального решения.

Одним из альтернативных вариантов является применение якобы нестандартных кормовых добавок, растительного происхождения. Например, плоды шиповника, которые являются богатейшим источников витамина С [13].

Анализируя данные многочисленных исследований, I. C. S. Aгаújo с соавторами [12] определил, что при введении *in ovo* витамина Е увеличивалась скорость вывода ($P < 0,05$) и наблюдалось самое короткое окно вывода ($P < 0,05$). Также были получены лучшие результаты в отношении физических качеств цыплят, которые были отмечены в группах, получавших витамин Е (масса тела, длина тела, показатель качества новорожденных цыплят), и более высокие соотношения массы цыплят к массе яиц ($P < 0,05$). Был сделан вывод, что добавление витамина Е *in ovo* стимулирует окислительные процессы в организме цыплят, что приводит к улучшению результатов инкубации, качества цыплят и показателей продуктивности.

Результаты исследования Y. F. Zhu и его соавторов [11] показали, что введение витамина С методом *in ovo* в дозе 3 мг бройлерам может в некоторой степени улучшать антиоксидантную активность и иммунную функцию в организме, что обуславливает более низкую экспрессию противовоспалительных цитокинов в селезенке.

Значительную роль в рационах сельскохозяйственной птицы играют добавки с включением микроэлементов, аминокислот, витаминов и других биологически активных веществ [10; 12; 14].

Если в рационе сельскохозяйственной птицы есть дефицит биологически активных веществ, то происходит нарушение обмена веществ в их организме. В частности, конверсия протеина корма в мышечный белок снижается в разы, при этом энергия корма расходуется не на продуктивность, а на поддержание жизни [8]. Помимо вышеперечисленного, в организме птицы идут необратимые процессы со стороны желудочно-кишечного и дыхательного трактов, а также воспроизводительной системы – все это в совокупности приводит к летальному исходу [3; 10; 15].

Поэтому дефицит этих веществ в кормовой базе хозяйств требует создания новейших добавок, позволяющих удовлетворить все потребности с применением кормов местного происхождения [16; 17].

Определенный интерес имеет кормовая добавка «Бутофан ОР» в дозе 1,0 мл на 1 л воды цыплятам и 3,0 мл на 1 л воды курам-несушкам. Полученные результаты являются показателями нормализации уровня метаболизма, характеризуют повышение жизнеспособности молодняка птицы, улучшения его роста и развития, увеличения продуктивности и потребительского качества яиц. Продукцию от сельскохозяйственной птицы после применения «Бутофана ОР» можно использовать в пищевых целях без ограничений. В рационе ремонтного молодняка кур данный препарат позволил стимулировать рост живой массы на 2,9 %, среднесуточный прирост – на 10,9 % и при этом позволил снизить затраты корма на 1 кг прироста живой массы на 150 г относительно указанных показателей у сверстников контрольной группы [2].

Использование в кормлении кур-несушек биологически активной добавки с содержанием в нем кукурузного глютенa и пробиотического препарата способствует улучшению обменных процессов в организме. Подведенные результаты говорят о том, что у опытной птицы увеличилось переваримость сухого вещества корма на 1,42–2,54 %, сырого протеина – на 1,65–2,53 % и усвоения кальция на 1,75–4,03 %, фосфора – на 1,87–2,13 %. В итоге повышались яйценоскость и качество получаемых яиц [3].

Внедрение в стартовый комбикорм цыплятам-бройлерам добавки «Тенториум плюс» в дозе 1 кг/т корма увеличивает сохранность птицы, сокращает

затраты корма на прирост, улучшает показатели кроветворения, стимулирует иммунный статус организма птицы [18].

Микроэлементы медь, марганец, цинк и железо играют основную роль в организме. Так, медь является одной из составляющих частей большинства ферментов, участвующая в процессах обмена веществ железа, имеет большое значение в нормальном течении процессов развития эмбриона и в образовании подскорлупных органических соединений, которые обуславливают качество скорлупы яйца. При недостатке меди в организме птицы тормозятся процессы формирования нормальной пигментации, нарушаются функции репродуктивности, вызывается высокая ломкость костей, нарушение кератизации пера. Медь необходима для формирования нервной ткани, для репродуктивных функций организма и развития скелета. У взрослой птицы недостаток меди выражается в нарушении эмбрионального развития, снижении яйценоскости. При дополнительном введении органического источника меди в рацион отмечается ростовой эффект. Увеличивается процент выбраковки. Медь имеет связь с цинком, и процесс абсорбции у этих двух элементов происходит по одному механизму, поэтому недостаток одного приводит к избытку другого [14].

Цинк является необходимым элементом для птиц – он входит в состав сложных органических соединений, обладающих высокой биологической активностью, участвует в обмене нуклеиновых кислот и формировании белков, тем самым оказывает немаловажное воздействие на рост, продуктивность и развитие организма. Данный микроэлемент тесно связан с витамином D3 и A, которые отвечают за отложение его в костной ткани. Известны натуральные источники цинка, которые в большом количестве содержатся в клевере, люцерне и злаковых культурах, скармливаемых животным в форме травяной муки [11].

Значительные нарушения в работе организма сельскохозяйственной птицы происходят при недостатке марганца. Нехватка марганца вызывает дегенерацию семенников, нарушение эстрального цикла, развитие остеодистрофии. У птиц марганец активизирует много ферментных процессов, оказывает содействие кровообразованию и сохранению репродуктивной функции, проявляет антиоксидантные свойства, принимает участие в утилизации жиров, противодействует дегенерации печени, повышает качество скорлупы яиц, улучшает состояние эмбрионов, влияет на действие витаминов группы B, E, C и минеральных веществ (железа, кальция, фосфора), улучшает функционирование желез внутренней секреции. У цыплят недостаток вызывает анемию и перозис, а у взрослой птицы – снижение яйценоскости и выводимости цыплят [7].

Молибден является антагонистом марганца, высокая необходимость у птиц обуславливается его недостаточной всасываемостью в кишечнике, которая по сравнению с млекопитающими должна быть в 100 раз выше [9].

По данным российских ученых, этот элемент значительно влияет на качество скорлупы у птиц. При недостаточном содержании марганца в яйце яичная скорлупа приобретает тонкость и хрупкость [12; 13].

Первостепенное значение имеют факторы нормирования и балансирования рационов по микроэлементам, потому что ошибка в этом плане может привести к финансовому ущербу [3].

Введение ферментов с кормом приводит к улучшению переваривания компонентов корма птицей. Кроме ферментов, которые находятся в теле, используют дополнительно и те, которые позволяют расщеплять вещества желудочно-кишечного тракта птицы, в виде ферментосодержащих добавок [10; 11].

Например, некрахмалистые полисахариды, содержащиеся в зерновых, не перевариваются птицей, что приводит к снижению переваримости питательных веществ корма и увеличивают вязкость химуса. Для того чтобы данные компоненты корма расщеплялись, необходимо использовать надлежащие ферменты, такие как Р-глюканы, арабиноксиланы, целлюлоза и др. [9].

Ферменты (или энзимы) – это природные вещества, способные ускорять обменные процессы в организме сельскохозяйственных животных (птиц, свиней, молодняка крупного рогатого скота). Применение ферментов удешевляет корма (до 10 %) и улучшает их усвоение в организме. Использование в рационах ферментных препаратов при кормлении бройлеров способствует увеличению среднесуточного прироста живой массы на 3,3–4,5 %, яйценоскость кур-несушек – в среднем на 5,3 % при снижении расхода кормов от 7 до 11 %.

Многими исследователями доказано, что действительными предпосылками для использования ферментных препаратов в кормлении птицы является то, что в пищеварительном тракте птицы вырабатываются ферменты (сложные соединения белковой природы), расщепляющие питательные вещества корма на более простые соединения, которые потом всасываются пищеварительным трактом. Однако пищеварительные железы птицы не выделяют ферменты, гидролизующие целлюлозу, пектины и другие полисахариды, поэтому клетчатка, входящая в ежедневный корм птицы, практически не усваивается. Для примера: любое зерно (пшеница, овес, ячмень) содержит оболочку, которая как раз и состоит в основном из клетчатки. Но клетчатка не только не переваривается в пищеварительном тракте птицы, но и затрудняет переваривание других питательных веществ: это понятно, пока не разрушена оболочка, нет доступа к питательным веще-

ствам внутри зерна. Добавка в комбикорма птицы ферментных препаратов способствует разрушению оболочек растительных клеток и повышает переваримость и усвоение питательных веществ рациона.

Часто ферменты путают с кормовыми антибиотиками и стимуляторами роста, но это две абсолютно разные линии. Ферменты, ускоряющие химические реакции в организме, как и пробиотики, заселяющие микрофлору кишечника полезными бактериями, направлены только на то, чтобы принести птице пользу. Пробиотики и ферменты, как уже доказано, оказывают благотворное воздействие на состояние кишечника птицы и, наоборот, стимулируют сокращение применения кормовых антибиотиков в птицеводстве.

Введением ферментных препаратов в комбикорма можно повысить уровень ячменя до 50 %, ржи – до 30 %, отрубей – до 52 % для взрослой птицы и до 31 % для ремонтного молодняка, гороха – до 27 %, шрота и жмыха подсолнечных – до 33 %.

Для нормальной деятельности микрофлоры кишечника в настоящее время многие используют многообразные функциональные кормовые добавки, которые положительно воздействуют на микробное сообщество ЖКТ: кормовые пробиотики, пребиотики, антибиотики, подкислители. Широкую популярность приобретают синбиотики – это комбинация про- и пребиотиков [6; 11; 17; 18]. Все вышеизложенные биологически активные вещества (БАВ) добавляют в комбикорма для сельскохозяйственной птицы в виде 0,5–1-процентных премиксов или в составе 5–10-процентных белково-витаминно-минеральных концентратов (БВМК).

Все больший интерес к лекарственным растениям обусловлен тем, что они могут улучшать качество конечной продукции из мяса птицы [6; 9; 15].

Для поддержания здоровья и повышения продуктивности птицы в комбикорма добавляют травы и растительные масла, которые содержат эфирные масла, оказывающие профилактические действия: антиоксидантное, антибактериальное, противовоспалительное [5; 6; 18]. Механизм действия этих эфирных масел можно разделить на два. Первый влияет на повышение секреции пищеварительных ферментов, а второй связан с нормализацией жизнедеятельности кишечной микрофлоры.

Помимо этого, некоторые ученые на бройлерах установили положительное влияние эфирных масел растений на секрецию пищеварительных ферментов поджелудочной железой и слизистой оболочки кишечника, а также отмечено улучшение переваримости и усвояемости питательных веществ [7; 9].

Экзогенные кормовые ферменты – это биологически активные белки, разрывающие специфические химические связи, чтобы высвободить питательные вещества для дальнейшего переваривания и всасывания. Питательная значимость экзогенных

ферментов для эффективности использования корма и стимулирования роста хорошо известна в птицеводстве [2]. Они помогают снизить содержание антипитательных соединений, таких как кислотнo-детергентная клетчатка и лигнин, а также увеличить потребление корма, улучшить конверсию корма в прирост живой массы, качество мяса и европейский индекс производства (ЕPI).

По данным некоторых исследователей, экзогенные ферменты компенсируют дефицит эндогенного фермента, который важен для переваривания антипитательных кормовых веществ [9].

М. Khoobani с соавторами провели ряд исследований по оценке влияния порошка цикория (*Chicorium intybus* L.) и пробиотической смеси (PrimaLac®) в форме природных добавок для улучшения роста, развития и продуктивности цыплят-бройлеров [7]. В связи с этим они брали 225 однодневных бройлеров Ross 308, которым давали различные комбинации рационов. В итоге было выявлено значительное увеличение привеса тела, снижение уровня триглицеридов в крови и липопротеидной низкой плотности (ЛПНП) с увеличением липопротеинов высокой плотности (ЛПВП). Сравнительное исследование бройлеров, которых кормили различными добавками, такими как антибиотик (Ренамицин 100®), фитобиотик (Галибиотик®), пробиотик (Ветом®) и комбинация пробиотика и фитобиотика, показало, что скормливание пробиотика улучшило показатели роста бройлеров. Таким образом, был сделан вывод, что пробиотики могут быть лучшим вариантом в качестве стимуляторов роста в птицеводстве [18].

Использование в кормлении сельскохозяйственной птицы кросса Росс-308 синбиотического препарата «ПроСтор» оказывает положительное влияние на рост, сохранность мясной птицы и способствует

сокращению затрат кормов на 1 кг мяса птицы, что ведет к снижению себестоимости продукции, повышению ее рентабельности, а также к повышению сохранности и выхода молодняка [1].

Для повышения поедаемости корма усвоения его питательных веществ и увеличения срока хранения применяют подкислители. Они в основном встречаются в виде органических кислот и их солей, которые проявляют и антистрессовые свойства на организм животного [8].

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Таким образом можно сделать общий вывод о том, что интенсивность роста, развития и продуктивности сельскохозяйственной птицы зависит от многих факторов, важнейшим из которых является кормление с включением различных биологически активных добавок.

При внедрении биологически активных веществ в рацион зафиксирован рост живой массы на 3,2 %, среднесуточный прирост – на 11,5 %, при этом снизились затраты корма на 1 кг прироста живой массы на 150 г.

Перспективность использования биологически активных веществ обусловлена тем, что сельскохозяйственные животные и птица часто «не добирают» полезные вещества из повседневного питания, поэтому нуждаются в обогащении ежедневного рациона витаминами, минеральными комплексами исходя из индивидуальных особенностей и потребностей. Недостаток микро- и макроэлементов может спровоцировать возникновение болезней, что делает БАД в рационе птицы не прихотью, а необходимостью. Также следует учитывать перспективность постоянного расширения ассортиментного ряда биологически активных добавок для сельскохозяйственной птицы. Очень важно компаниям-производителям отслеживать обратную связь и последние научные разработки в этой области.

Библиографический список

1. Буяров В. С., Метасова С. Ю. Эффективность применения синбиотика «ПроСтор» в птицеводстве // Ученые записи Казанского Университета. Серия естественные науки. 2019. Т. 161, кн. 3. С. 408–421.
2. Кочиш И. И., Мясникова О. В., Мартынов В. В., Смоленский В. И. Микрофлора кишечника кур и экспрессия связанных с иммунитетом генов под влиянием пробиотической и пребиотической кормовых добавок // Сельскохозяйственная биология. 2020. Т. 55, №2. С. 315–327.
3. Фисинин В. И. Мировое и российское птицеводство: реалии и вызовы будущего: монография. Москва: Хлебпродинформ, 2019. 470 с.
4. Топурия Г. М., Топурия Л. Ю., Кутырева А. А. Иммунобиологический статус бычков под действием пробиотика // Достижения и перспективы в сфере производства и переработки сельскохозяйственной продукции: материалы национальной научно-практической конференции. Оренбург, 2020. С. 137–139.
5. Дюжева Н. А. Эффективность использования премиксов на основе горчичного белоксодержащего кормового концентрата «Горлинка» в кормлении кур несушек родительского стада: дисс. ... канд. с.-х. наук. Усть-Кинельский, 2019. 260 с.
6. Казачкова Н. М., Рахматуллин Ш. Г., Инчагова К. С., Дускаев Г. К. Иммунный статус организма и продуктивность цыплят-бройлеров при совместном использовании в рационе растительных экстрактов и пробиотиков // Молодые ученые и специалисты – науке и практике страны: сборник материалов конференции. Оренбург, 2019. С. 138–141.

7. Khoobani M., Hasheminezhad S. H., Javandel F., et al. Effects of Dietary Chicory (*Chicorium Intybus* L.) and Probiotic Blend as Natural Feed Additives on Performance Traits, Blood Biochemistry, and Gut Microbiota of Broiler Chickens // *Antibiotics* (Basel). 2019. Vol. 9, No. 1. Article number 5. DOI: 10.3390/antibiotics9010005.
8. Крашенинникова Р. Т. Состав и механизм действия пробиотика «Ветоспорин» [Электронный ресурс] // *Международный студенческий научный вестник*. 2023. № 2. URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=21247> (дата обращения: 25.01.2024).
9. Mohamed D., Abd El-sadek M., Abdel-Wareth A. Effects of Copper oxide nanoparticles on productive performance of broiler chickens under climate change conditions. *Environmental Science, Agricultural and Food Sciences* // *SVU – International Journal of Agricultural Sciences*. 2022. Vol. 4, No. 4. Pp. 51–57. DOI: 10.21608/svuijas.2022.178563.1247.
10. Gallardo C., Martínez-Castaño M., Mejía Díaz D., Contreras J. Physicochemical properties of bean pod (*Phaseolus vulgaris*) flour and its potential as a raw material for the food industry // *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 2020. Vol. 73, No. 2. Pp. 9179–9187. DOI: 10.15446/rfnam.v73n2.81564.
11. Zhu Y. F., Li S. Z., Sun Q. Z., Yang X. J. Effect of in ovo feeding of vitamin C on antioxidation and immune function of broiler chickens // *Animal*. 2019. Vol. 13, No. 9. Pp. 1927–1933. DOI: 10.1017/S1751731118003531.
12. Araújo I. C. S., Café M. B., Noleto R. A., Martins J. M. S., Ulhoa C. J., Guareshi G. C., Reis M. M., Leandro N. S. M. Effect of vitamin E in ovo feeding to broiler embryos on hatchability, chick quality, oxidative state, and performance // *Poultry Science*. 2019. Vol. 98, No. 9. Pp. 3652–3661. DOI: 10.3382/ps/pey439.
13. Лебедев С. В., Шошина О. В., Нуржанов Б. С., Ширнина Н. М., Шейда Е. В. Пиколинат хрома и его действие на метаболические процессы, а также продуктивность бычков мясного типа // *Аграрный вестник Урала*. 2023. Т. 23, № 09. С. 76–86.
14. Alagawany M., Taha A. E., Noreldin A., El-Tarabily K. A., Abd El-Hack M. E. Nutritional applications of species of spirulina and *Chlorella* in farmed fish: a review // *Aquaculture*. 2021. Vol. 542. Article number 736841. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2021.736841.
15. Solis-Cruz B., Hernandez-Patlan D., Hargis B. M., Tellez G. Use of Prebiotics as an Alternative to Antibiotic Growth Promoters in the Poultry Industry [Электронный ресурс]. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/68967> (дата обращения: 10.12.2023).
16. Duskaev G., Kurilkina M., Zavyalov, O. Growth-stimulating and antioxidant effects of vanillic acid on healthy broiler chickens // *Veterinary World*. 2023. Vol. 16, No. 3. Pp. 518–525.
17. Duskaev G. K., Kvan O. V., Rakhmatullin S. G. Eucalyptus viminalis leaf extract alters the productivity and blood parameters of healthy broiler chickens // *Veterinary World*. 2020. Vol. 13, No. 12. Pp. 2673–2680.
18. Шумицкая К. С., Федяева С. В., Заикина А. С. Альтернатива антибиотикам в птицеводстве // *Научно-практические достижения молодых ученых как основа развития АПК: материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции*. Рязань, 2020. С. 308–312.

Об авторах:

Надежда Михайловна Казачкова, кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела кормления и технологии кормов им. проф. С. Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия; ORCID 0000-0002-0871-736X, AuthorID 613281. *E-mail*: yagoda-oren@mail.ru

Канат Шарипович Картекенов, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела кормления и технологии кормов им. проф. С. Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия; ORCID 0000-0002-0983-885X, AuthorID 339366. *E-mail*: fncbst@mail.ru

Галимжан Калиханович Дускаев, доктор биологических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия; ORCID 0000-0002-9015-8367, AuthorID 316084. *E-mail*: gduskaev@mail.ru

References

1. Buyarov V. S., Metasova S. Yu. ProStor Synbiotic Efficiency in Poultry Farming. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta Seriya Estestvennye Nauki*. 2019; 161 (3): 408–421. DOI: 10.26907/2542-064X.2019.3.408-421. (In Russ.)
2. Kochish I. I., Myasnikova O. V., Martynov V. V., Smolenskij V. I. Intestinal microflora of chickens and expression of immunity-related genes under the influence of probiotic and prebiotic feed additives. *Agricultural Biology*. 2020; 55 (2): 315–327. DOI: 10.15389/agrobiol.2020.2.315-327. (In Russ.)
3. Fisinin V. I. *World and Russian Poultry Farming: Realities and Challenges of the Future*: a monograph. Moscow: Khlebprouinform, 2019. 470 p. (In Russ.)

4. Topuriya G. M., Topuriya L. Yu., Kutyreva A. A. Immunobiological status of bulls under the influence of a probiotic. *Achievements and Prospects in the Field of Production and Processing of Agricultural Products: materials of the national scientific and practical conference*. Orenburg, 2020. Pp. 137–139. (In Russ.)
5. Dyuzheva N. A. *Efficiency of Using Premixes Based on Mustard Protein-Containing Feed Concentrate "Gorlinka" in Feeding Laying Hens of the Parent Flock*: abstract of the dissertation ... candidate of agricultural sciences: 06.02.08. Ust'-Kinel'skiy, 2019. 260 p. (In Russ.)
6. Kazachkova N. M., Rakhmatullin Sh. G., Inchagova K. S., Duskaev G. K. The immune status of the body and the productivity of broiler chickens when combined with plant extracts and probiotics in the diet. *Young Scientists and Specialists – Science and Practice of the Country: collection of conference materials*. Orenburg, 2019. Pp. 138–141. (In Russ.)
7. Khoobani M., Hasheminezhad S. H., Javandel F., Nosrati M., Seidavi A., Kadim I. T., et al. Effects of Dietary Chicory (*Chicorium intybus* L.) and Probiotic Blend as Natural Feed Additives on Performance Traits, Blood Biochemistry, and Gut Microbiota of Broiler Chickens. *Antibiotics (Basel)*. 2019; 9 (1): 5. DOI: 10.3390/antibiotics9010005.
8. Krashennnikova R. T. Composition and mechanism of action of the probiotic "Vetosporin". *International Student Scientific Magazine* [Internet]. 2023 [cited 2024 Jan 25]; 2. Available from: <https://eduherald.ru/en/article/view?id=21247>. (In Russ.)
9. Mohamed D., Abd El-sadek M., Abdel-Wareth A. Effects of Copper oxide nanoparticles on productive performance of broiler chickens under climate change conditions. *SVU – International Journal of Agricultural Sciences*. 2022; 4 (4): 51–57. DOI: 10.21608/svuijas.2022.178563.1247.
10. Gallardo C., Martínez-Castaño M., Mejía Díaz D., Contreras J. Physicochemical properties of bean pod (*Phaseolus vulgaris*) flour and its potential as a raw material for the food industry. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 2020; 73 (2): 9179–9187. DOI: 10.15446/rfnam.v73n2.81564.
11. Zhu Y. F., Li S. Z., Sun Q. Z., Yang X. J. Effect of in ovo feeding of vitamin C on antioxidation and immune function of broiler chickens. *Animal*. 2019; 13 (9): 1927–1933. DOI: 10.1017/S1751731118003531.
12. Araújo I. C. S., Café M. B., Noleto R. A., Martins J. M. S., Ulhoa C. J., Guareshi G. C., Reis M. M., Leandro M. S. N. Effect of vitamin E in ovo feeding to broiler embryos on hatchability, chick quality, oxidative state, and performance. *Poultry Science*. 2019; 98 (9): 3652–3661. DOI: 10.3382/ps/pey439.
13. Lebedev S. V., Shoshina O. V., Nurzhanov B. S., Shirnina N. M., Sheyda E. V. Chromium picolinate and its effect on metabolic processes, as well as the productivity of meat-type steers. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2023; 23 (9): 76–86. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-09-76-86. (In Russ.)
14. Alagawany M., Taha A. E., Noreldin A., El-Tarabily K. A., Abd El-Hack M. E. Nutritional applications of species of *Spirulina* and *Chlorella* in farmed fish: A review. *Aquaculture*. 2021; 542: 736841. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2021.736841.
15. Solis-Cruz B., Hernandez-Patlan D., Hargis B. M., Tellez G. Use of Prebiotics as an Alternative to Antibiotic Growth Promoters in the Poultry Industry. *Prebiotics and Probiotics – Potential Benefits in Nutrition and Health* [Internet]. 2019 [cited 2023 Dec 10]; 2. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/68967>.
16. Duskaev G., Kurilkina M., Zavyalov O. Growth-stimulating and antioxidant effects of vanillic acid on healthy broiler chickens. *Veterinary World*. 2023; 16 (3): 518–525. DOI: 10.14202/vetworld.2023.518-525.
17. Duskaev G. K., Kvan O. V., Rakhmatullin S.G. *Eucalyptus viminalis* leaf extract alters the productivity and blood parameters of healthy broiler chickens. *Veterinary World*. 2020; 13(12): 2673–2680. DOI: 10.14202/vetworld.2020.2673-2680.
18. Shumitskaya K. S., Fedyaeva S. V., Zaikina A. S. Alternative to antibiotics in poultry farming. *Scientific and practical achievements of young scientists as the basis for the development of the agro-industrial complex: materials of the All-Russian Student Scientific and Practical Conference*. Ryazan, 2020. Pp. 308–312. (In Russ.)

Authors' information:

Nadezhda M. Kazachkova, candidate of biological sciences, researcher at the department of feeding and feed technology named after professor S. G. Leushina, Federal Scientific Center for Biological Systems and Agricultural Technologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia; ORCID 0000-0002-0871-736X, AuthorID 613281. *E-mail*: yagoda-oren@mail.ru

Kanat Sh. Karteknov, candidate of biological sciences, senior researcher at the department of feeding and feed technology named after professor S. G. Leushina; ORCID 0000-0002-0983-885X, AuthorID 339366. *E-mail*: fncbst@mail.ru

Galimzhan K. Duskaev, doctor of biological sciences, professor of the Russian Academy of Sciences, leading researcher, Federal Scientific Center for Biological Systems and Agricultural Technologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia; ORCID 0000-0002-9015-8367, AuthorID 316084. *E-mail*: gduskaev@mail.ru

Способ улучшения зоогигиенических условий выращивания цыплят-бройлеров

О. В. Ковалева¹✉, А. П. Дуктов², Н. М. Костомахин³

¹ Государственный аграрный университет Северного Зауралья, Тюмень, Россия

² Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия, Горки, Республика Беларусь

³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Россия

✉ E-mail: kovalevaov@gausz.ru

Аннотация. Целью проводимого исследования является изучение влияния подстилочного материала на физиологические показатели цыплят-бройлеров, поскольку важнейшим условием оптимизации микроклимата в птичнике является соответствие физиологическому состоянию поголовья и поддержание его жизнедеятельности на оптимальном уровне. **Методы исследований.** Эксперимент проводился в промышленных условиях птицефабрики на бройлерном поголовье кросса Arbor Acres+ в экспериментальном цехе, где были сформированы четыре секции. Ежедневно осуществлялся контроль роста и развития бройлеров, проводился учет поголовья, еженедельно составлялся ветеринарный отчет по причинам падежа. Также проводились лабораторные исследования согласно утвержденным методикам по следующим показателям: содержание аммиака, санитарно-гигиенические показатели, объем, масса и влажность подстилочного материала, а также продуктивность и основные показатели крови цыплят-бройлеров. **Результаты.** Выявлены тенденции положительного влияния сорбента в виде модифицированного диатомита на продуктивность цыплят-бройлеров за счет улучшения зоогигиенических условий выращивания. В частности, подробно рассматривается содержание общего количества микроорганизмов, спор плесневых грибов и содержание аммиака в производственном экспериментальном цехе. В ходе работы были рассчитаны объем и вес подстилочного материала, в том числе на выходе из птичника. Особое внимание постарались уделить биохимии крови, что позволило оценить физиологическое состояние цыплят-бройлеров и сделать вывод о качестве рационов кормления. При этом выявлены проблемные моменты, связанные с кормлением сельскохозяйственной птицы, которые оказывают влияние на содержание минеральных элементов в крови. При определении критерия производительности проведены расчеты по индексу ЕРЕФ. **Научная новизна.** Впервые было доказано, что использование диатомита высотой насыпного слоя 0,5–1 см с размером гранул не менее 5 мм в качестве подстилочного материала приводит к улучшению зоогигиенических условий выращивания цыплят-бройлеров без дополнительных капитальных вложений в виде монтажа дорогостоящего вентиляционного оборудования или применения дополнительных технологических операций. Такой вариант замены оказывает положительное влияние на здоровье молодняка птицы.

Ключевые слова: подстил, диатомит, патогенная флора, аммиак, запах, продуктивность, микроклимат, цыплята-бройлеры, биохимические показатели

Для цитирования: Ковалева О. В., Дуктов А. П., Костомахин Н. М. Способ улучшения зоогигиенических условий выращивания цыплят-бройлеров // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 08. С. 1045–1055. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1045-1055>.

Дата поступления статьи: 09.03.2024, **дата рецензирования:** 18.05.2024, **дата принятия:** 17.06.2024.

A way to improve the zoohygienic conditions of growing broiler chickens

O. V. Kovaleva¹✉, A. P. Duktov², N. M. Kostomakhin³

¹ Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen, Russia

² Belarusian State Orders of the October Revolution and the Labor Red Banner Agricultural Academy, Gorki, Republic of Belarus

³ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

✉ E-mail: kovalevaov@gausz.ru

Abstract. The purpose of the study is to study the effect of bedding material on the physiological parameters of broiler chickens. Since the most important condition for optimizing the microclimate in the poultry house is compliance with the physiological state of the livestock and maintaining its vital activity at an optimal level. **Research methods.** The experiment was carried out in the industrial conditions of a poultry farm on broiler stock of the Arbor Acres+ cross in the experimental workshop, where four sections were formed. The growth and development of broilers was monitored daily, livestock records were carried out, and a weekly veterinary report was compiled on the causes of mortality. Also, laboratory studies were carried out according to approved methods for the following indicators: ammonia content, sanitary and hygienic indicators of bedding material, volume, weight and moisture content of bedding material, as well as productivity and basic blood parameters of broiler chickens. **Results.** Trends in the positive effect of the sorbent in the form of modified diatomite on the productivity of broiler chickens due to the improvement of zoohygienic growing conditions have been identified. In particular, the content of the total number of microorganisms, mold spores and ammonia content in the production experimental workshop is examined in detail. During the work, the volume and weight of bedding material was calculated, including at the exit from the poultry house. We tried to pay special attention to blood biochemistry, which made it possible to assess the physiological state of broiler chickens and draw conclusions about the quality of feeding rations. At the same time, problematic issues associated with feeding poultry were identified, which affect the content of mineral elements in the blood. When determining the performance criterion, calculations were carried out using the EPEF index. **Scientific novelty.** For the first time, it was proven that the use of diatomite with a bulk layer height of 0.5–1 cm with a granule size of at least 5 mm as bedding material leads to improved zoohygienic conditions for raising broiler chickens without additional capital investments in the form of installation of expensive ventilation equipment or the use of additional technological operations. This replacement option has a positive effect on the health of young poultry.

Keywords: litter, diatomite, pathogenic flora, ammonia, odor, productivity, microclimate, broiler chickens, biochemical parameters

For citation: Kovaleva O. V., Duktov A. P., Kostomakhin N. M. A way to improve the zoohygienic conditions of growing broiler chickens. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (08): 1045–1055. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1045-1055>. (In Russ.)

Date of paper submission: 09.03.2024, **date of review:** 18.05.2024, **date of acceptance:** 17.06.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

При интенсивном выращивании птицы на подстилке в окружающую среду выделяются метаболиты, подстилка, влага, пыль и микроорганизмы, которые накапливаются в птичнике. В результате этого птицефабрики становятся потенциальными загрязнителями окружающей среды [1; 2].

С точки зрения экономики важно, чтобы потенциал, который заложен в геноме птицы продуктивных кроссов, реализовывался за счет наличия оптимальных параметров микроклимата. Таким образом, содержание большого количества углекислого газа (CO₂) и аммиака (NH₃) в помещениях будет

приводить к нарушению физиологических процессов в организме птицы, что, в свою очередь, окажет свое негативное воздействие на ее продуктивность [5; 6].

Со стороны дыхательной системы наблюдаются учащенное дыхание, кашель и одышка. Нарушение метаболических процессов приводит к потере аппетита, снижению веса и общей слабости. Высокие уровни аммиака могут вызывать раздражение кожи и глаз, что проявляется покраснением, воспалением, зудом и даже язвами. Это ведет к ослаблению иммунной системы птицы, делая их более подверженными инфекциям и болезням [3; 4].

Для предотвращения негативных последствий на здоровье птицы важно обеспечить хорошую вентиляцию в помещении, где они находятся, чтобы уровни углекислого газа и аммиака были на приемлемом уровне. Регулярная очистка и дезинфекция помещения также могут помочь снизить уровень аммиака. Но при большой скученности птицы этих приемов, как правило, недостаточно, так как при повышении рН подстилки (а данное явление является неизбежным процессом) увеличивается щелочность среды, поэтому возрастает испарение аммиака [10].

Согласно нормативным требованиям РД-АПК 1.10.05.04-13, содержание CO_2 должно быть не более 0,25 об. %, NH_3 – 15 мг/м³, диапазон влажности подстилочного материала – не более 35–40 % [9]. Одним из наиболее важных аспектов подстилки является его влияние на здоровье и благополучие цыплят. Правильно выбранная и уложенная подстилка способствует снижению возникновения стресса у птиц, а также предотвращает контакт с голым или влажным полом и заболеваниями, передаваемыми через него. Наконец, подстилка является также источником питательных веществ. Многие фермеры используют специально подготовленную подстилку, содержащую дополнительные добавки, такие как кормовые премиксы, витамины и минералы. Это позволяет улучшить питательную ценность корма, что является ключевым фактором для роста и развития птиц.

Цель работы – улучшение зоогигиенических условий выращивания цыплят-бройлеров.

Методология и методы исследования (Methods)

Эксперимент проводился в летний период (2021 год) в промышленных условиях птицефабрики на бройлерном поголовье кросса Arbor Acres+ в экспериментальном цехе, где были сформированы четыре секции: три опытные и одна контрольная. В каждой секции содержалось 6000 голов цыплят-бройлеров, что в сумме составляло общее поголовье 24 000 голов. В опытной секции № 1 использовался подстилочный материал, состоящий из слоя диатомита толщиной 0,5 см (объем – 1,65 м³, масса – 940 кг) и слоя опилок толщиной 2,5 см (объем – 8,25 м³, масса – 1650 кг). В опытной секции № 2 использовался подстилочный материал, состоящий из слоя диатомита толщиной 1 см (объем – 3,3 м³, масса – 1880 кг). В опытной секции № 3 использовался подстилочный материал, состоящий из слоя диатомита толщиной 0,5 см (объем – 1,65 м³, масса – 940 кг). В контрольной секции № 4 использовался только слой опилок толщиной 3 см (объем – 9,9 м³, масса – 1980 кг).

Кормление бройлеров во всех группах было одинаковым с использованием гранулированных полнорационных комбикормов собственного про-

изводства. Условия содержания, световой и температурный режимы во всех секциях также были идентичны. Ежедневно проводился учет поголовья. Ежедневно составлялся ветеринарный отчет по причинам падежа. Также осуществлялся контроль за ростом и развитием бройлеров. Коэффициент роста по Н. П. Чирвинскому вычислялся как отношение живой массы при посадке в корпус к живой массе в конце выращивания. Кроме этого, производился замер концентрации аммиака в секциях. Проводились лабораторные исследования подстилки на влажность, наличие спор плесневых грибов, наличие патогенных микроорганизмов (включая сальмонеллы) и наличие ооцистэймерий. Также проводились химические анализы подстилки в лаборатории института фундаментальных и прикладных агробιοтехнологий ГАУ Северного Зауралья на содержание азота, фосфора, калия и других химических показателей, а также наличие тяжелых металлов. Лабораторное исследование крови птиц проводилось в конце опыта на 31-й день выращивания. Для этого отбиралось по 10 голов из каждой группы.

Результаты (Results)

Не случайно к перечню показателей при оценке зоогигиенических параметров производственных цехов относят уровень вредных веществ, поскольку оценка микроклимата является важным аспектом для обеспечения здоровых условий содержания птиц на птицефабриках. Уровень углекислого газа, аммиака, сероводорода, микроорганизмов и пыли может оказывать негативное влияние на здоровье птиц и условия их содержания. Использование модифицированного диатомита может быть оправданным средством для снижения влажности подстилки. Снижение влажности может оказывать положительный эффект на здоровье птиц, так как это может помочь предотвратить развитие патогенных микроорганизмов и улучшить условия содержания. Снижение влажности хотя бы на 10–20 % по сравнению с использованием традиционного опила поможет управлять влажностью помещения, а значит, создаст более комфортные условия для птицы, особенно в весенне-осенний период.

Во время проведения эксперимента во 2-й и 3-й опытных секциях, где использовался модифицированный диатомит (высота насыпного слоя – 0,5–1 см) в качестве подстилки, было отмечено снижение ее влажности в сравнении с контрольной секцией на 13,9–36,5 % соответственно. Однако это сопровождается повышенной запыленностью (рис. 1), поэтому при загрузке корпуса птицей необходимо было дополнительно увлажнить подстилку. В последующем эта проблема была решена за счет использования более крупной фракции (гранул) модифицированного диатомита.



Рис. 1. Посадка цыплят (слева – цыплята на подстилке из диатомита, справа – запыленность поилок)
 Fig. 1. Planting chickens (on the left – chickens on a diatomite litter, on the right – dustiness of drinking bowls)

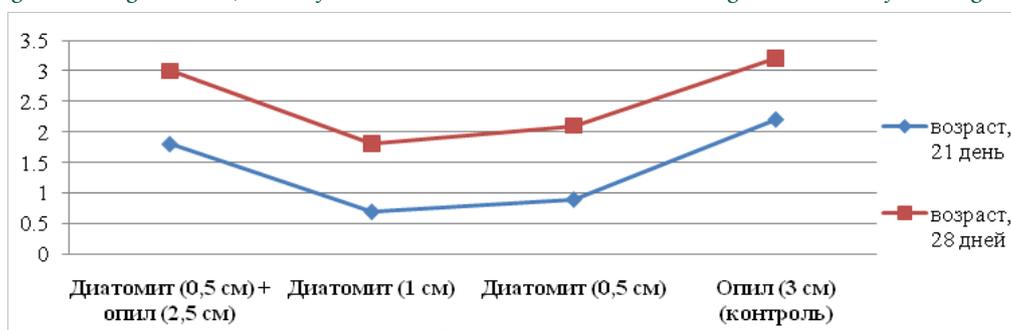


Рис. 2. Содержание аммиака, мг/м³

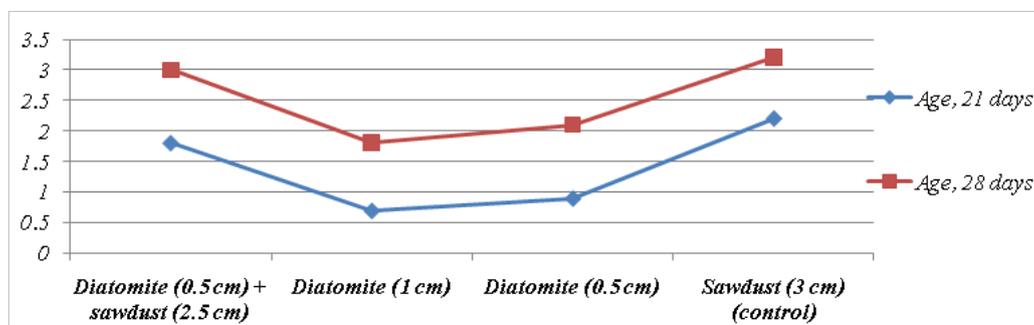


Fig. 2. Ammonia content, mg/m³

Иммунная система птиц обычно успешно справляется со своими функциями, однако уровень патогенной микрофлоры в птичнике увеличивается при снижении скорости движения воздуха. В ночное время ситуация может стать критической из-за падения температуры снаружи и уменьшения воздухообмена, при этом происходит быстрый рост микрофлоры и, как следствие, аммиака, который они выделяют. Постоянно высокая концентрация аммиака наряду с патогенной микрофлорой вызывает подавление иммунитета у цыплят. На рис. 2 представлено содержание аммиака в секциях.

На основании полученных данных по концентрации аммиака в секциях можно сделать вывод, что наименьшее значение было зафиксировано во 2-й секции при использовании диатомита толщи-

ной 1 см. Разница в сравнении с контролем составила 1,5 мг/м³ (68,2 %) в 21 день, к 28-му дню – 2,3 мг/м³ (71,9 %). Разница между 2-й и 3-й секциями составила 1,1 мг/м³ (61,1 %) и 1,2 мг/м³ (57,1 %) соответственно.

Уровень аммиака выше 25 ppm наносит вред защитному реснитчатому эпителию дыхательной системы птиц [11]. Это способствует проникновению патогенных агентов, ухудшает здоровье и продуктивность, увеличивает риск заболеваний и затраты на лечение. Исследования российских и зарубежных ученых показали, что повышение содержания аммиака до 50 ppm приводит к увеличению конверсии корма бройлеров на 8 % и снижению убойной живой массы каждой птицы на более чем 110 г.

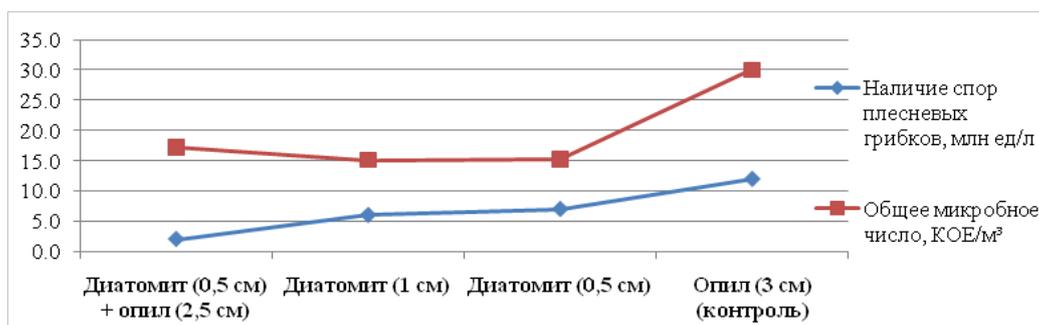


Рис. 3. Отдельные санитарно-гигиенические показатели подстилочного материала

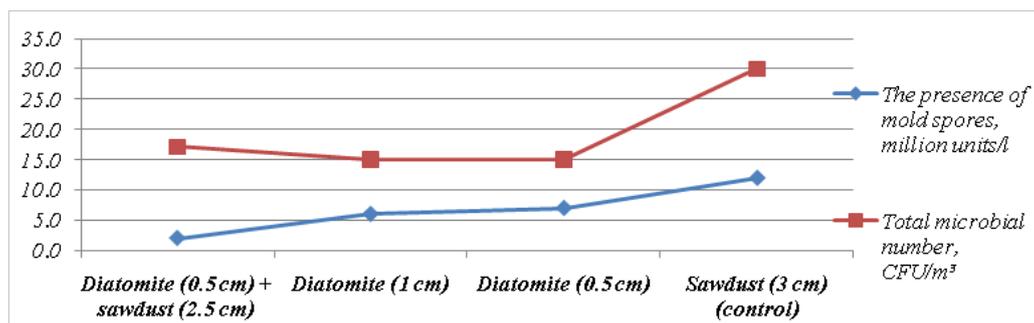


Fig. 3. Individual sanitary and hygienic indicators of bedding material

Таблица 1
Объем и масса подстилочного материала

Секция	Объем, м ³	Масса, кг	Подстилочный материал с пометом (на выходе из птичника), кг
1	9,9	2590	3987,2
2	3,3	1880	3416,4
3	1,65	940	2467,6
4	9,9	1980	3591,5

Table 1
The volume and weight of the bedding material

Section	Volume, m ³	Weight, kg	Litter material with droppings (at the exit from the poultry house), kg
1	9.9	2590	3987.2
2	3.3	1880	3416.4
3	1.65	940	2467.6
4	9.9	1980	3591.5

В процессе жизнедеятельности происходит разложение азотистых оснований с образованием NH_3 . Для работы этих микроорганизмов необходимы определенные диапазоны влажности и температуры. При контроле условий жизни бактерий подвержен контролю и процесс образования аммиака. Однако изменение температурного режима невозможно, так как он в птичнике строго контролируется [12; 13]. Это означает, что единственно верный способ контролировать выбросы аммиака – регулировать влажность подстилки. Чем выше сухость среды, тем менее активны микроорганизмы. Содержание некоторых видов микроорганизмов представлено на рис. 3.

Исследования показали, что использование диатомита в опытных секциях привело к отсутствию ооцист эймерий в подстилке. Кроме того, отмечено

снижение общего количества микроорганизмов на 42,7 % в 1-й секции и на 49,7 % во 2-й секции, а также уменьшилось содержание спор грибов во 2-й секции на 41,7 %, в 1-й секции на 83,3 % в сравнении с 4-й секцией (контроль). Данные свидетельствуют о том, что подстил с использованием диатомита в чистом виде или с его добавлением обладает противомикробными свойствами в отношении бактерий (ОМЧ) и плесневелых грибов.

Средняя плотность сухого диатомита разного происхождения составляет от 150 до 600 кг/м². Основными характеристиками природного диатомита являются способность к адсорбции, плохая теплопроводность, тугоплавкость и кислотостойкость. Он также имеет мелкую, равномерно распределенную, преимущественно замкнутую пористость, которая достигает 80–85 %.

В зависимости от происхождения плотность диатомита составляет порядка 150–600 кг на 1 м². При этом ему свойственна хорошая пористость (80–85 %).

После завершения эксперимента анализ данных показал, что наименьший выход подстилочного материала был в 3-й секции: по сравнению с контролем снижение составило 31 % (таблица 1). В сравнении со второй секцией снижение составило 27,7 %, что является закономерностью, поскольку в данной секции использовалось в 2 раза меньше подстилочного материала.

Сочетание таких показателей, как высокая температура и высокая относительная влажность воздуха, особенно опасно для молодняка птицы (таблица 2), при этом высокое теплосодержание возду-

ха приводит в дальнейшем к снижению теплообмена между организмом и окружающей средой и, как следствие, тепловому удару. Как правило, в момент посадки цыплят в птичник строго выдерживают параметры микроклимата, а именно температурный режим, диапазон которого должен выходить за пределы 22–34 °С при относительной влажности не менее 40–50 %. Снижение этих показателей в опыте привело к повышению запыленности воздуха во 2-й и 3-й секции. Чтобы исключить возникновение респираторных заболеваний и пересыхание слизистых оболочек, дополнительно на 2-й день после посадки цыплят провели увлажнение воздуха, увеличив данный показатель на 2 %.

Содержание сухого вещества и питательных веществ в подстилке представлено в таблице 3.

Таблица 2
Уровень влажности, %

Секция	Влажность воздуха в помещении		Влажность подстила		
	День посадки цыплят	День забоя	День посадки цыплят	День забоя	Выгрузка подстила из корпуса
1	63,12	67,45	21,0	33,6	40,6
2	51,03	68,1	13,4	33,4	23,6
3	52,73	65,3	18,2	34,6	17,4
4	69	68,2	34,4	36,0	27,4

Table 2
Humidity level, %

Section	Indoor air humidity		Moisture content		
	Chick planting day	Slaughter day	Chick planting day	Slaughter day	Unloading litter from the housing
1	63.12	67.45	21.0	33.6	40.6
2	51.03	68.1	13.4	33.4	23.6
3	52.73	65.3	18.2	34.6	17.4
4	69	68.2	34.4	36.0	27.4

Таблица 3
Содержание сухого вещества и биогенных веществ в подстилке, %

Показатель	Минимальные требования (навоз/помет подстилочный)	Секция			
		1	2	3	4
Массовая доля сухого вещества, не менее:	25,0	59,4	76,4	82,6	72,6
Массовая доля питательных веществ в удобрении с исходной влажностью, не менее:					
азот общий	0,30	1,38	1,41	1,50	1,54
фосфор общий в пересчете на P ₂ O ₅	0,20	0,30	0,40	0,43	0,37
калий общий в пересчете на K ₂ O	0,20	2,65	2,10	2,41	2,93

Table 3
The content of dry matter and nutrients in the litter, %

Indicator	Minimum requirements (litter manure)	Section			
		1	2	3	4
Mass fraction of dry matter, not less than:	25.0	59.4	76.4	82.6	72.6
The mass fraction of nutrients in the fertilizer with the initial moisture content, not less than:					
total nitrogen	0.30	1.38	1.41	1.50	1.54
total phosphorus, in terms of P ₂ O ₅	0.20	0.30	0.40	0.43	0.37
total potassium, in terms of K ₂ O	0.20	2.65	2.10	2.41	2.93

Таблица 4

Показатели продуктивности цыплят-бройлеров

Секция	Живая масса 1 головы на начало эксперимента, г	Среднесуточный прирост, г	Сохранность, %	Конверсия корма	Живая масса к убою, г	Интенсивность скорости роста, %	EPEF
1	89 ± 0,6	47,1	75,12	1,94	1520 ± 18,5	5,86	189,9
2	88 ± 0,7	49,2	82,6	1,7	1582 ± 17,8	5,56	248,0
3	85 ± 0,5	49,3	82,13	1,7	1585 ± 17,1	5,36	247,0
4	95 ± 0,8	51,97	86,64	1,54	1663 ± 22,4	5,71	301,8
В среднем	89,25	49,5	81,23	1,72	1591	5,62	242,4

Table 4
Productivity indicators of broiler chickens

Section	Live weight 1 head at the beginning of the experiment, g	Average daily increase, g	Safety, %	Feed conversion	Live weight for slaughter, g	The intensity of the growth rate, %	EPEF
1	89 ± 0.6	47.1	75.12	1.94	1520 ± 18.5	5.86	189.9
2	88 ± 0.7	49.2	82.60	1.7	1582 ± 17.8	5.56	248.0
3	85 ± 0.5	49.3	82.13	1.7	1585 ± 17.1	5.36	247.0
4	95 ± 0.8	51.97	86.64	1.54	1663 ± 22.4	5.71	301.8
On average	89.25	49.5	81.23	1.72	1591,0	5.62	242.4

Проведенные исследования показали, что 3-я секция с использованием подстилки в виде модифицированного диатомита в количестве насыпного слоя 0,5 см имеет более высокую массовую долю сухого вещества 82,6 %, что на 12 % лучше, чем в секции с опилом [14–16]. Кроме этого, по содержанию общего фосфора 3-я секция также имеет более высокие показатели – на 16 % выше, чем в 4-й секции (контроль). Содержание же общего азота и калия выше в 4-й секции (контроль), поскольку опил по своему составу имеет органическое происхождение в отличие от диатомита.

Оптимальные условия содержания способствуют лучшему росту и развитию птицы [17]. Коэффициент роста (интенсивность скорости роста) является важным показателем продуктивности птиц. Он позволяет птицеводам контролировать рост и при необходимости корректировать рацион и условия содержания для достижения максимальной эффективности производства (таблица 4).

Показатель интенсивности скорости роста цыплят оказался наивысшим в 1-й секции и составил 5,86 % с конверсией корма 1,94, что выше показателя контрольной группы на 0,15 % с конверсией корма 1,54. В 3-й секции наблюдается самая низкая интенсивность роста (5,36 %) при конверсии кор-

ма 1,7. Это объясняется тем, что при посадке цыплят в данной группе была наименьшая средняя живая масса, уступавшая показателю 4-й секции на 10,5 %. Но, несмотря на это, к концу выращивания разница по средней живой массе между 3-й секцией и 4-й (контрольной) сократилась и составила 4,7 %.

При выращивании цыплят-бройлеров важна их производительность. Для определения производительности во всем мире проводятся различные расчеты. Самыми часто используемыми критериями производительности при разведении бройлеров являются значения FCR и EPEF (индекс эффективности). Чем выше индекс EPEF (более 100), тем выше рентабельность производства.

Так, анализируя полученные данные, можно сказать, что наилучший индекс эффективности был в контрольной группе (301,8). Это связано с тем, что в среднем по секции масса цыплят была больше, а значит, они были более крепкими и жизнеспособными. Это позволило им более эффективно использовать корма, конверсия корма при этом составила 1,54, среднесуточный прирост поддерживать на уровне 51,97 г.

Если бройлеры показывают коэффициент интенсивности роста 300 %, это означает, что они увеличили свою массу в 3 раза по сравнению с

начальной массой. Для достижения оптимальной эффективности можно увеличить калорийность рациона или отрегулировать температуру в птичнике, чтобы обеспечить молодняку благоприятные условия роста.

Кровь является одной из основных жизненно важных жидкостей в организме, играющей роль в поддержании гомеостаза и гуморальной регуляции, а также в обработке и передвижении питательных веществ и энергии. Поэтому изучение состава крови бройлеров при убое является важным фактором для определения и контроля их здоровья и качества кормления (таблица 5).

В ходе исследований было обнаружено отклонение от нормы некоторых основных показателей крови у контрольной и опытных групп цыплят-бройлеров. Содержание общего белка в крови бройлеров составило от 39,13 до 42,90 г/л, что на 12,4–20,1 % ниже нормы в опытных группах и на

12,6 % ниже нормы в контрольной группе. Российские и зарубежные исследователи отмечают положительную связь между белковым составом крови и продуктивностью птицы.

Также было выявлено наличие отклонений в содержании калия в крови бройлеров. Повышение концентрации калия выше 6,5 ммоль/л плазмы считается критическим, выше 7,5 до 10,5 ммоль/л – токсичным, а свыше 10,5 ммоль/л – смертельным. В контрольной группе цыплят-бройлеров содержание калия составило 8,13 ммоль/л, при этом наименьший показатель был отмечен в опытной группе и составлял 6,63 ммоль/л, что незначительно, но все же выходит за пределы нормативного показателя.

Таким образом, исследования показывают, что состав крови цыплят-бройлеров играет важную роль в их общем здоровье и продуктивности.

Особое значение имеет и содержание минеральных элементов в составе крови (таблица 6).

Таблица 5
Биохимические показатели крови цыплят-бройлеров

Наименование показателя	Норма	Секция			
		1	2	3	4
Триглицериды, ммоль/л	0,3–0,9	1,09	1,06	1,09	1,14
Глюкоза, ммоль/л	11–27,5	14,55	13,86	14,41	13,91
Общий белок, г/л	49–59	42,90	41,43	39,13	42,80
Альбумин, г/л	31,4–35,1	18,77	19,07	15,97	18,20
Гамма-глутамилтранспептидаза, Ед/л	11–25	11,80	15,63	15,30	10,37
Мочевина, ммоль/л	14–22	1,51	1,50	1,47	1,38
Креатинин, ммоль/л	20–87	20,03	19,50	15,60	16,87
Аспаргатаминотрансфераза, Ед/л	330–560	529,97	513,50	413,37	387,73
Аланинаминотрансфераза, Ед/л	1,2–6,8	4,00	4,67	5,20	2,70
Амилаза, Ед/л	1124–1794	537,47	680,96	480,40	700,43
Билирубин общий, ммоль/л	0,01–0,5	0,26	0,10	0,15	0,00
Холестерин, ммоль/л	3,4–4,6	3,38	2,95	2,85	3,34
Лактатдегидрогеназа, Ед/л	250–295	295,59	184,170	153,72	333,90

Table 5
Biochemical blood parameters of broiler chickens

Indicator	Standard	Section			
		1	2	3	4
Triglycerides, mmol/l	0.3–0.9	1.09	1.06	1.09	1.14
Glucose, mmol/l	11–27.5	14.55	13.86	14.41	13.91
Total protein, g/l	49–59	42.90	41.43	39.13	42.80
Albumin, g/l	31.4–35.1	18.77	19.07	15.97	18.20
Gamma-glutamyl transpeptidase, Units/l	11–25	11.80	15.63	15.30	10.37
Urea, mmol/l	14–22	1.51	1.50	1.47	1.38
Creatinine, mmol/l	20–87	20.03	19.50	15.60	16.87
Aspartate aminotransferase, Units/l	330–560	529.97	513.50	413.37	387.73
Alanine aminotransferase, Units/l	1.2–6.8	4.00	4.67	5.20	2.70
Amylase, Units/l	1124–1794	537.47	680.96	480.40	700.43
Total bilirubin, mmol/l	0.01–0.5	0.26	0.10	0.15	0.00
Cholesterol, mmol/l	3.4–4.6	3.38	2.95	2.85	3.34
Lactate dehydrogenase, Units/l	250–295	295.59	184.170	153.72	333.90

Содержание минеральных элементов в крови цыплят-бройлеров, ммоль/л

Показатель	Норма	Секция			
		1	2	3	4
Магний (Mg)	0,8–1,1	1,09	1,07	1,01	1,06
Кальций (Ca)	3,8–6,8	2,74	2,38	2,41	2,47
Фосфор (P)	8–15	2,97	2,88	2,52	2,97
Калий (K)	4,9–6,4	9,67	8,50	6,63	8,13
Железо (Fe)	29–36	14,63	15,73	15,20	18,37

Table 6

The content of mineral elements in the blood of broiler chickens, mmol/L

Indicator	Standard	Section			
		1	2	3	4
Magnesium (Mg)	0.8–1.1	1.09	1.07	1.01	1.06
Calcium (Ca)	3.8–6.8	2.74	2.38	2.41	2.47
Phosphorus (P)	8–15	2.97	2.88	2.52	2.97
Potassium (K)	4.9–6.4	9.67	8.50	6.63	8.13
Iron (Fe)	29–36	14.63	15.73	15.20	18.37

Дефицит фосфора в рационе и возникновение хронической остеодистрофии может наблюдаться на фоне низкого содержания витамина D и избыточного содержания кальция. Гиперфосфатемия возникает при гипофункции паращитовидных желез и гипервитаминозе D. Кроме этого, качество мяса зависит от содержания фосфора, поскольку является основным структурным компонентом органов и тканей.

Повышенная концентрация калия в плазме может быть угрожающей, токсичной и даже смертельной, поскольку отвечает за регуляцию осмотического давления, ускоряя обмен веществ, чем и способствует выведению воды из организма. В контрольной группе бройлеров содержание калия составило 8,13 ммоль/л, в опытной – 6,63 ммоль/л, что превышает нормативное значение. Содержание же кальция во всех группах ниже нормы на 27,9–37,0 %. Железо также ниже нормативных показате-

телей по всем группам на 36,7–49,6 %. Недостаток минерального питания влечет за собой в первую очередь нарушение биохимических показателей крови, сказывается на увеличении конверсии корма, а значит, и на снижении скорости роста.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

На основании проведенных опытов можно судить о положительном влиянии нового способа улучшения зоогигиенических условий выращивания цыплят-бройлеров с использованием сорбента в виде модифицированного диатомита на продуктивность цыплят-бройлеров. Его использование не оказывает отрицательного влияния на физиологические параметры птицы и улучшает состояние крови по основным показателям. Поэтому при выращивании цыплят-бройлеров рекомендуется применять подстилочный материал в виде модифицированного диатомита насыпным слоем 0,5–1 см с размером гранул не менее 5 мм.

Библиографический список

1. Абдурагимов Р. М., Майорова Т. Л., Мусиев Д. Г., Азаев Г. Х., Гунашев Ш. А., Джабарова Г. А., Волкова А. В. Загрязненность воздушной среды птичника, кормов и подстилки микроорганизмами и спорами плесневых грибов // Проблемы развития АПК региона. 2019. № 3. С. 152–157.
2. Епимахова Е. Э., Самокиш Н. В., Барсукова М. Г. Биодеструкция подстилки и качество мяса птицы // Вестник АПК Ставрополя. 2018. № 3. С. 11–14. DOI: 10.31279/2222-9345-2018-7-31-11-14.
3. Ковалева О. В., Волынкина М. Г., Костомахин Н. М. Приоритетное развитие сельского хозяйства в Тюменской области // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2017. № 11. С. 3–8.
4. Костомахин Н. М., Волынкина М. Г., Ковалева О. В., Иванова И. Е., Кармацких Ю. А. Состояние и перспективы развития животноводства тюменского региона // Молочное и мясное скотоводство. 2019. № 1. С. 9–13.
5. Дрозд М. Н., Усевич В. М. Оценка качества мясного птицеводческого сырья при использовании минерального адаптогена // Аграрный вестник Урала. 2021. № 3 (206). С. 53–66. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-206-03-53-66.

6. Завьялов О. А., Дускаев Г. К., Курилкина М. Я. Влияние БАД растительного происхождения на продуктивность и показатели крови цыплят-бройлеров // Аграрный вестник Урала. 2023. № 1 (230). С. 34–42. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-230-01-34-42.
7. Епимахова Е. Э., Скрипкин В. С., Ожередова Н. А. [и др.]. Использование бактерий в подстилочном материале, используемом для содержания сельскохозяйственных животных и птицы: научные рекомендации. Ставрополь: АГРУС, 2017. 101 с.
8. Шулепова О. В., Ковалева О. В., Санникова Н. В., Бочарова А. А. Использование природного сорбента в птицеводстве // Вестник КрасГАУ. 2022. № 6 (183). С. 131–140. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-6-131-140.
9. Skopina L. Yu., Demin E., Kostomakhin N. M., Kovaleva O. V. Sanitary and microbiological assessment of wastewater when using a biological treatment system // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Scientific and Practical Conference: Food and Environmental Security in Modern Geopolitical Conditions: Problems and Solutions (EPFS-2023). Kostanay, 2023. Vol. 1206 (1). Article number 012040. DOI: 10.1088/1755-1315/1206/1/012040.
10. Веремеева С. А., Шенина А. Н. Микробная экосистема: пробиотики и пребиотики // Интеграция науки и практики для развития агропромышленного комплекса: материалы 2-й национальной научно-практической конференции. Тюмень, 2019. С. 489–494.
11. Лунева А. В. Влияние кормовой микробной добавки на мясную продуктивность цыплят-бройлеров и качество мяса птицы // Аграрный вестник Урала. 2021. № 10 (213). С. 55–64. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-213-10-55-64.
12. Салеева И., Иванов А., Бахарев А. Состав воздуха и продуктивность бройлеров // Животноводство России. 2017. № 3. С. 19–20.
13. Лунева А. В. Скрининг микроорганизмов, способных ускорять процесс микробной трансформации птичьего помета // Аграрный вестник Урала. 2021. № 12 (215). С. 50–58. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-215-12-50-58.
14. Файзрахманов Р. Н., Софронов В. Г., Данилова Н. И. [и др.] Оценка микроклимата и продуктивности гусят бройлеров при использовании подстилки // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана. 2021. Т. 246, № 2. С. 236–243. DOI: 10.31588/2413-4201-1883-246-2-236-243.
15. Санникова Н. В., Ковалева О. В., Шулепова О. В., Бочарова А. А., Костомахин Н. М., Филатов Н. Ф. Минерально-сырьевые ресурсы и отходы птицеводства для повышения плодородия почвы // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2021. № 11 (196). С. 3–11. DOI: 10.33920/sel-05-2111-01.
16. Sannikova N., Shulepova O., Bocharova A., Kostomakhin N., Ilyasov O., Kovaleva O. Natural reserves of diatomite are as a component of organomineral fertilizers based on chicken manure // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled, 2021. Vol. 937, No. 3. DOI: 10.1088/1755-1315/937/3/032093.
17. Kikusato M. Phytobiotics to improve health and production of broiler chickens: functions beyond the anti-oxidant activity // Animal Bioscience. 2021. Vol. 34, No. 3. Pp. 345–353. DOI: 10.5713/ab.20.0842.

Об авторах:

Ольга Викторовна Ковалева, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Государственный аграрный университет Северного Зауралья, Тюмень, Россия; ORCID 0000-0002-6833-4715, AuthorID 798314.

E-mail: kovalevaov@gausz.ru

Александр Петрович Дуктов, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия, Гродно, Республика Беларусь; ORCID 0000-0002-8910-7669, AuthorID 1094171. *E-mail: duktov@mail.ru*

Николай Михайлович Костомахин, доктор биологических наук, профессор, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Россия; ORCID 0000-0003-3987-0372, AuthorID 353486. *E-mail: kostomakhin@rgau-msha.ru*

References

1. Abduragimova R. M., Mayorova T. L., Musiev D. G., Azaev G. Kh., Gunashev Sh. A., Dzhabarova G. A., Volkova A. V. Air pollution of a poultry house, fodder and littering by micro-organisms and spores of mold mushrooms. *Problems of Agroindustrial Complex Development in the Region*. 2019; 3: 52–157. (In Russ.)
2. Epimakhova E. E., Samokish N. V., Barsukova M. G. Biodestruction of litter and quality of poultry meat. *Bulletin of Agroindustrial Complex of Stavropol Territory*. 2018; 3: 11–14. DOI: 10.31279/2222-9345-2018-7-31-11-14. (In Russ.)

3. Kovaleva O. V., Volynkina M. G., Kostomakhin N. M. The priority development of agriculture in the Tyumen region. *Feeding of Farm Animals and Feed Production*. 2017; 11: 3–8. (In Russ.)
4. Kostomakhin N. M., Volynkina M. G., Kovaleva O. V., Ivanova I. E., Karmatskikh Yu. A. Condition and perspectives of the development of animal breeding in the Tyumen region. *Dairy and Meat Cattle Breeding*. 2019; 1: 9–13. (In Russ.)
5. Drozd M. N., Usevich V. M. Assessment of the quality of meat and poultry raw materials using mineral adaptogen. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2021; 3 (206): 53–66. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-206-03-53-66. (In Russ.)
6. Zavyalov O. A., Duskaev G. K., Kurilkina M. Ya. The effect of herbal BAA on the productivity and blood parameters in broiler chickens. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2023; 1 (230): 34–42. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-230-01-34-42. (In Russ.)
7. Epimakhova E. E., Skripkin V. S., Ozheredova N. A., et al. *The use of bacteria in bedding material used for the maintenance of agricultural animals and birds: scientific recommendations*. Stavropol: AGRUS, 2017. 101 p. (In Russ.)
8. Shulepova O. V., Kovaleva O. V., Sannikova N. V., Bocharova A. A. Using natural sorbent in poultry farming. *Bulletin of KrasGAU*. 2022; 6 (183): 131–140. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-6-131-140. (In Russ.)
9. Skopina L. Yu., Demin E., Kostomakhin N. M., Kovaleva O. V. Sanitary and microbiological assessment of wastewater when using a biological treatment system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Scientific and Practical Conference: Food and Environmental Security in Modern Geopolitical Conditions: Problems and Solutions (EPFS-2023)*. Kostanay, 2023. Vol. 1206 (1). Article number 012040. DOI: 10.1088/1755-1315/1206/1/012040.
10. Veremeeva S. A., Shenina A. N. Microbial ecosystem: probiotics and prebiotics. *Integration of Science and Practice for the Development of the Agro-Industrial Complex; proceedings of the 2nd national scientific and practical conference*. Tyumen, 2019. Pp. 489–494. (In Russ.)
11. Luneva A. V. The effect of a fodder microbial additive on meat productivity of broiler chickens and quality of poultry meat. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2021; 10 (213): 55–64. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-213-10-55-64. (In Russ.)
12. Saleeva I., Ivanov A., Bakharev A. Air composition and productivity of broilers. *Animal Husbandry of Russia*. 2017; 3: 19–20. (In Russ.)
13. Luneva A. V. Screening of microorganisms which are able to accelerate the process of microbial transformation of bird droppings. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2021; 12 (215): 50–58. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-215-12-50-58. (In Russ.)
14. Fayzrakhmanov R. N., Sofronov V. G., Danilova N. I. [et al.] Assessment of the microclimate and productivity of broiler goslings using hygienic bedding. *Scientific Notes of the Kazan State Academy of Veterinary Medicine named after N. E. Bauman*. 2021; 246 (2): 236–243. DOI: 10.31588/2413-4201-1883-246-2-236-243. (In Russ.)
15. Sannikova N. V., Kovaleva O. V., Shulepova O. V., Bocharova A. A., Kostomakhin N. M., Filatov N. F. Mineral and raw resources and poultry waste to increase soil fertility. *Feeding of Farm Animals and Feed Production*. 2021; 11 (196): 3–11. DOI: 10.33920/sel-05-2111-01. (In Russ.)
16. Sannikova N., Shulepova O., Bocharova A., Kostomakhin N., Ilyasov O., Kovaleva O. Natural reserves of diatomite are as a component of organomineral fertilizers based on chicken manure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [this link is disabled](#). 2021; 937 (3). DOI: 10.1088/1755-1315/937/3/032093.
17. Kikusato M. Phytobiotics to improve health and production of broiler chickens: functions beyond the antioxidant activity. *Animal Bioscience*. 2021; 34 (3): 345–353. DOI: 10.5713/ab.20.0842.

Authors' information:

Olga V. Kovaleva, candidate of agricultural sciences, associate professor, Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen, Russia, ORCID 0000-0002-6833-4715, AuthorID 798314. *E-mail: kovalevaov@gausz.ru*

Aleksandr P. Duktov, candidate of agricultural sciences, associate professor, Belarusian State Orders of the October Revolution and the Labor Red Banner Agricultural Academy, Gorki, Republic of Belarus; ORCID 0000-0002-8910-7669, AuthorID 1094171. *E-mail: dukto@mail.ru*

Nikolay M. Kostomakhin, doctor of biological sciences, professor, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev, Moscow, Russia; ORCID 0000-0003-3987-0372, AuthorID 353486. *E-mail: kostomakhin@rgau-msha.ru*

Нелинейные главные компоненты биохимического профиля молочного скота пяти пород

Д. Ю. Нохрин¹, О. В. Соколова¹✉, А. И. Белоусов¹, А. Г. Исаева¹, Е. В. Мокерова²,
Ю. С. Герасимова³

¹ Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

² Акционерное общество «Кировское» по племенной работе, Киров, Россия

³ Акционерное общество «Смоленское» по племенной работе, Смоленск, Россия

✉ E-mail: nauka_sokolova@mail.ru

Аннотация. Цель – выявление и объяснение паттернов биохимических показателей у коров с учетом особенностей породы. **Методы.** В настоящих исследованиях проводили сравнение выборок животных пяти пород (голштинская, тагильская, суксунская, сычевская, истобенская) по 17 биохимическим показателям. Общее число исследованных животных составило 407. Для анализа полученных результатов использовали методы статистического анализа, включающие метод нелинейного анализа главных компонент по алгоритму САТРСА (Categorical PCA). **Научная новизна.** Выбранный метод позволил обобщить большое число биохимических показателей и выявить процессы, по которым изученные группы коров различались в большей или меньшей степени. **Результаты.** Выделены и интерпретированы 5 главных компонент, объясняющих в сумме 67,4 % общей дисперсии. Некоторые наблюдаемые паттерны могут свидетельствовать о развитии патологических состояний животных. Схожие биохимические паттерны наблюдали с одной стороны у коров тагильской, голштинской и суксунской, а с другой – истобенской и сычевской пород. Наиболее близкими к физиологической норме были животные суксунской породы. У коров голштинской породы регистрировали более выраженные изменения, связанные с отрицательным энергетическим балансом.

Ключевые слова: метаболомика, крупный рогатый скот, биохимические показатели, анализ главных компонент, породные различия

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 22-16-00021 «Изучение ассоциаций молекулярно-генетических маркеров с ценными физиологическими признаками сельскохозяйственных животных с целью направленной селекции для повышения адаптационного потенциала и долголетия». Авторы выражают благодарность главному специалисту Управления сельского хозяйства и предпринимательства Октябрьского городского округа Пермского края В. М. Абсаликову, генеральному директору ООО «Суксунское» С. А. Пестрикову, директору ООО «Суксунское» Н. П. Суетиной, генеральному директору АО «Кировское» по племенной работе Н. А. Белявину за содействие в проведении научных исследований.

Для цитирования: Нохрин Д. Ю., Соколова О. В., Белоусов А. И., Исаева А. Г., Мокерова Е. В., Герасимова Ю. С. Нелинейные главные компоненты биохимического профиля молочного скота пяти пород // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 08. С. 1056–1070. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1056-1070>.

Дата поступления статьи: 02.05.2024, **дата рецензирования:** 18.07.2024, **дата принятия:** 25.07.2024.

Nonlinear principal components of the biochemical profile of dairy cattle of five breeds

D. Yu. Nokhrin¹, O. V. Sokolova^{1✉}, A. I. Belousov¹, A. G. Isaeva¹, E. V. Mokerova², Yu. S. Gerasimova³

¹Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

²“Kirovskoe” for breeding work JSC, Kirov, Russia

³“Smolenskoe” for breeding work JSC, Smolensk, Russia

✉E-mail: nauka_sokolova@mail.ru

Abstract. The purpose of this study was to identify and explain patterns of biochemical parameters in dairy cows, taking into account the characteristics of their breed. **Methods.** A comparison was made of samples of animals of five breeds (Holstein, Tagil, Suksun, Sychevsk, Istoben) according to 17 biochemical parameters. The total number of animals studied was 407. To analyze the obtained results, statistical analysis methods were used, including the method of nonlinear principal component analysis using the CATPCA (Categorical PCA) algorithm. **Scientific novelty.** The chosen method made it possible to summarize a large number of biochemical indicators and identify processes in which the studied groups of cows differed to a greater or lesser extent. **Results.** Five principal components were identified and interpreted, explaining a total of 67.4 % of the total variance. Some observed patterns may indicate the development of pathological conditions in animals. Similar biochemical patterns were observed, on the one hand, in cows of the Tagil, Holstein and Suksun breeds, and on the other, in the Istoben and Sychev breeds. The animals of the Suksun breed were closest to the physiological norm. More pronounced changes associated with a negative energy balance were observed in Holstein cows.

Keywords: metabolomics, cattle, biochemical parameters, principal component analysis, breed differences

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project No. 22-16-00021 “Study of associations of molecular genetic markers with valuable physiological traits of farm animals for the purpose of targeted selection to increase adaptive potential and longevity.” The authors express their gratitude to the chief specialist of the Department of Agriculture and Entrepreneurship of the Oktyabrsky Urban District of the Perm Territory V. M. Absalikov, General Director of Suksunskoe LLC S. A. Pestrikov, Director of Suksunskoe LLC N. P. Suetina, General Director of Kirovskoe JSC for breeding work N. A. Belyavin for assistance in conducting scientific research.

For citation: Nokhrin D. Yu., Sokolova O. V., Belousov A. I., Isaeva A. G., Mokerova E. V., Gerasimova Yu. S. Nonlinear main components of the biochemical profile of dairy cattle of five breeds. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (08): 1056–1070. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1056-1070>. (In Russ.)

Date of paper submission: 02.05.2024, **date of review:** 18.07.2024, **date of acceptance:** 25.07.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

Современные технологии выращивания и разведения крупного рогатого скота, направленные на интенсивное производство молока, обуславливают высокие риски развития нарушений обмена веществ [1–4]. Субклинические алиментарные и метаболические заболевания выявляются в ходе клинико-лабораторного мониторинга по большому числу биохимических показателей, причем в последнее десятилетие наблюдается рост их числа. Это обусловлено сочетанием сразу нескольких факторов: повышением доступности высокотехнологического аналитического оборудования, перспективами метабомики для диагностики большого спектра заболеваний [5], а также развитием метода

анализа больших массивов данных [6]. Среди последних особое значение имеют методы, позволяющие не только связать изменения содержания конкретных метаболитов с теми или иными физиологическими или патологическими процессами, но и выявить специфические группы показателей, указывающих на возможные отклонения от нормы. К ним относятся различные многомерные техники, представляющие собой варианты анализа главных компонент (PCA), регрессии частных наименьших квадратов (PLS) и дискриминантного анализа (DA). Помимо условий кормления и содержания, на вариабельность биохимических показателей у молочного скота также влияют физиологическое состояние, количество отелов, стадия лактации, се-

зон года, экологические условия [7–9], особенности породы [10–11]. Многофакторная обусловленность биохимического профиля затрудняет однозначную интерпретацию результатов мониторинга и требует дополнительных исследований с применением методов, учитывающих комплексный характер изменения показателей.

Цель данного исследования заключалась в выявлении и объяснении паттернов биохимических показателей у коров с учетом особенностей породы.

Методология и методы исследования (Methods)

Материалом для исследования послужили коровы 5 пород молочного направления: голштинская ($n = 70$), истобенская ($n = 75$), суксунская ($n = 79$), сычевская ($n = 96$) и тагильская ($n = 87$). Отбор проб крови осуществляли в животноводческих предприятиях Свердловской, Кировской и Смоленской областей, а также Пермского края. В сыворотке крови определяли 17 биохимических показателей (общий белок, альбумин, глобулины, аспаратаминотрансфераза (АсТ), креатинин, мочевины, общий билирубин, щелочная фосфатаза, бикарбонаты, гамма-глутамилтрансфераза (гамма-ГТ), калий, кальций, натрий, свободные жирные кислоты (СЖК), фосфор, хлориды, холестерин) на автоматическом анализаторе Chem Well-2910 Combi (Awaveness Technology, США) с использованием наборов реактивов Vital Diagnostics Spb (Россия), DIALAB GmbH (Австрия), Human (Германия), «Хема-Медика» (Россия) и RayBiotech (США).

В ходе статистического анализа полученных данных использовали анализ распределений, а также порядковые методы описательной статистики и многомерного эксплорационного анализа. Оценку характера распределения признаков проводили визуально: по гистограммам распределения с кривыми плотности, рассчитанными методом Сильвермана в пакете PAST (v. 4.15). В качестве показателей описательной статистики использовали минимальное и максимальное значения, а также медиану с квартилями. Многомерный анализ проводили методом нелинейных главных компонент по алгоритму САТРСА, в ходе которого метки принадлежности к популяции обрабатывали как сглаженные сплайном номинальные категории, а все биохимические показатели – как сглаженные сплайном порядковые переменные. При выборе числа латентных переменных руководствовались критерием Кайзера и графическим критерием осыпи Кэттелла. Преобразованные в ходе САТРСА переменные сохраняли для возможности расчета общностей, а также вращения решения, которое проводили методом «варимакс». Сравнения 5 выборок по отдельным биохимическим показателям проводили с помощью omnibusного критерия Краскала – Уоллиса с последующими апостериорными сравнениями по Данну. Расчеты и графические построения выполнены в пакетах IBM® SPSS® Statistics (v. 20), KyPlot (v. 6.02) и PAST (v. 4.15).

Результаты (Results)

Модель классического анализа главных компонент (Principal component analysis, PCA) имеет ряд известных ограничений, затрудняющих ее использование применительно к биохимическим данным вообще и к нашим данным в частности. Рассмотрим их кратко, а далее отметим преимущества нелинейного варианта этой распространенной техники.

Во-первых, в основе PCA лежит расчет парных корреляций Пирсона, т. е. параметрический метод, требующий двумерного нормального, или гауссового, распределения данных. В нашем случае часть показателей имела близкие к логнормальному распределения, например аспаратаминотрансфераза (АСТ), где положительную асимметрию отмечали для всех пяти популяций (рис. 1). Сходную ситуацию наблюдали для глобулинов, креатинина, молочной кислоты, билирубина, щелочной фосфатазы, гамма-глутамилтрансферазы, кальция, свободных жирных кислот, холестерина. Однако для других показателей распределения были более симметричными (общий белок, бикарбонаты, калий, фосфор) или даже имели отрицательную асимметрию, как в случае альбумина (рис. 1), а также натрия и хлора. Это означает, что логарифмическое преобразование не будет универсальным для всех показателей. Для корректного анализа необходимо либо предварительное адаптивное к данным степенное преобразование Бокса – Кокса, широко используемое в расчетах референтных интервалов [12; 13], либо какие-то другие, причем непараметрические подходы.

Во-вторых, корреляция Пирсона оценивает только линейные связи, тогда как в биологии более распространены нелинейные связи и зависимости [14]. В-третьих, классический PCA-анализ требует, чтобы показатели имели непрерывную шкалу – относительную или интервальную. Модель PCA некорректна применительно к качественным признакам, однако в биомедицинских науках такие показатели весьма распространены и важны: возраст, пол, наличие/отсутствие нарушений, диагноз и т. п. Таким образом, нормализующее преобразование исходных данных не позволяет решить весь комплекс проблем, поэтому были предложены другие варианты этой техники: функциональный, упрощенный, робастный PCA, а также нелинейные его варианты.

Нелинейный анализ главных компонент по алгоритму САТРСА (Categorical PCA) представляет собой гибкую статистическую технику, в которой в зависимости от настроек можно работать с нормально распределенными количественными показателями и получать результаты, аналогичные классическому PCA, а можно – с качественными номинальными показателями и получать результаты, аналогичные анализу соответствий (Correspondence analysis). Возможен одновременный анализ количественных и качественных (порядковых и

номинальных) признаков с получением результатов в привычной для анализа главных компонент форме, тогда как сам анализ можно рассматривать как непараметрический вариант PCA. Такая универсальность достигается за счет разных методов предобработки данных (отсутствие предобработки, ранжирование или группировка) с последующим многомерным их преобразованием по Джифи (Gifi transformation). Последнее делает связи между всеми показателями в анализируемом наборе данных максимально взаимно линейными. При этом номинальные и порядковые признаки получают цифровые значения, что в терминах авторов метода называется «квантификацией», но может переводиться на русский язык как «оцифровка». В качестве примера на рис. 2 представлены графики оцифровки показателей, распределения которых были рассмотрены выше (рис. 1).

Видно, что показатель «альбумин» проявляет себя в наборе прочих показателей нелинейно: с тенденцией выхода на плато после 30 г/л, где сосредоточено наибольшее число наблюдений n . Это можно интерпретировать так, что концентрации в диапазоне 30–39 г/л, с одной стороны, представляют собой вероятную норму для исследуемых животных, с другой – 30 г/л и 39 г/л с биологической точки зрения находятся в одном референтном интервале. Напротив, концентрации менее 30 г/л редки, а менее 26 г/л представляют собой явные и сильные отклонения от нормы. Судя по расстояниям между точками оцифровки показателя, можно обоснованно предполагать, что снижение концентрации альбумина с 39 г/л до 26 г/л (разность $\Delta = 13$ г/л) по масштабу биологических изменений в организме эквивалентно снижению с 26 г/л до 24 г/л ($\Delta = 2$ г/л).

У показателя АСТ наблюдали принципиально другую картину: вместо плавного нелинейного тренда график квантификации демонстрировал несколько ступеней, соответствующих разным качественным состояниям организма животных. Известно, что рост активности АСТ является важным маркером цитолиза клеток из-за высоких концентраций фермента в цитоплазме и митохондриях, а согласно современным представлениям энзимодиагностики, активность энзима прямо пропорциональна степени повреждения клеток. Важно отметить, что АСТ не является тканеспецифичным ферментом. Используя данный индикатор, трудно говорить о поражении конкретного органа, однако его можно рассматривать как показатель протекания патологического процесса у животных [15]. Ключевыми органами, имеющими наибольшие концентрации АСТ в клетке, являются печень и поджелудочная железа, сердце, скелетная мускулатура и почки [16], а рост активности фермента наблюдается у коров при ацидозе, кетозе, жировой дистро-

фии печени, миодистрофии и др. [17]. Опираясь на литературные данные и график квантификации для данного показателя, можно считать физиологической нормой уровень до 100 Ед/л, тогда как уровни 100–135 Ед/л и 135–140 Ед/л указывают, вероятно, на развитие патологических изменений во внутренних органах разной степени тяжести, а к значениям более 180 Ед/л следует относиться как к выраженной патологии.

Таким образом, процедура многомерной квантификации исходных данных может давать информацию, представляющую самостоятельный интерес в предметной области, в данном случае – информацию об интервалах нормы и патологии, что является альтернативным существующим и многомерным подходом к расчету референтных интервалов. Технически же квантификация решает как проблему асимметрии распределений, так и нелинейности связей показателей. Поэтому к предварительно оцифрованным по Джифи данным корректно применять классический анализ главных компонент, что и составляет суть процедуры САТРСА.

Анализ был проведен в несколько этапов. На первом этапе принимали решение о числе латентных переменных, стоящих за изменениями биохимических показателей. Для этого на предварительно ранжированных и сглаженных сплайном средствами процедуры САТРСА значениях биохимических показателей, а также сглаженных сплайном оцифрованных меток принадлежности животным к группам был проведен первый вариант анализа. Сведения об анализируемых показателях представлены в таблице 1.

Количество узлов для сглаживания выбирали максимальным для каждого показателя, оно равно количеству уникальных значений за вычетом первого и последнего. Из последней колонки таблицы 1 видно, что наименьшее число таких значений было у билирубина и свободных жирных кислот (СЖК), для которых у основной массы животных регистрировали нулевые значения. Следует отметить, что в действительности это были значения ниже чувствительности аналитического метода определения, которые просто отмечали как нулевые концентрации, что корректно при использовании в анализе порядковых статистик (как в нашем случае), но искажает результаты классических техник, основанных на расчете среднего значения и дисперсии.

В ходе первого варианта анализа были выделены все возможные для 18 показателей (17 биохимических и 1 метка принадлежности к группе) 18 главных компонент (далее – ГК), 5 из которых, согласно критериям Кэттелла и Кайзера (рис. 3), являлись обобщающими; в сумме они объясняли 59,2 % общей изменчивости (количественно – дисперсии) показателей в наборе данных.

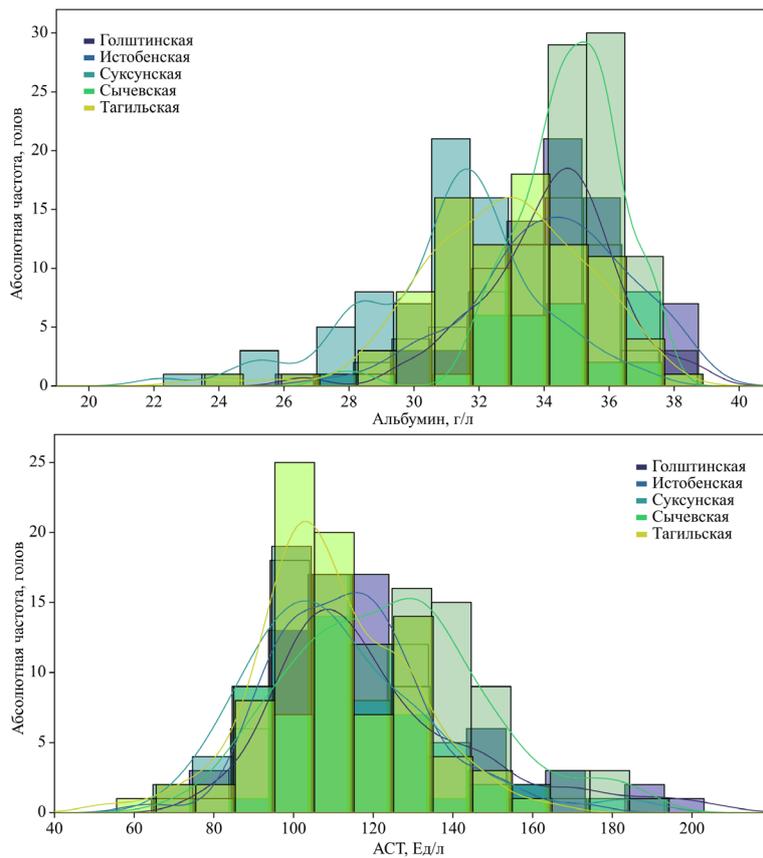


Рис. 1. Гистограмма распределения альбумина и аспаратаминотрансферазы в сыворотке крови коров

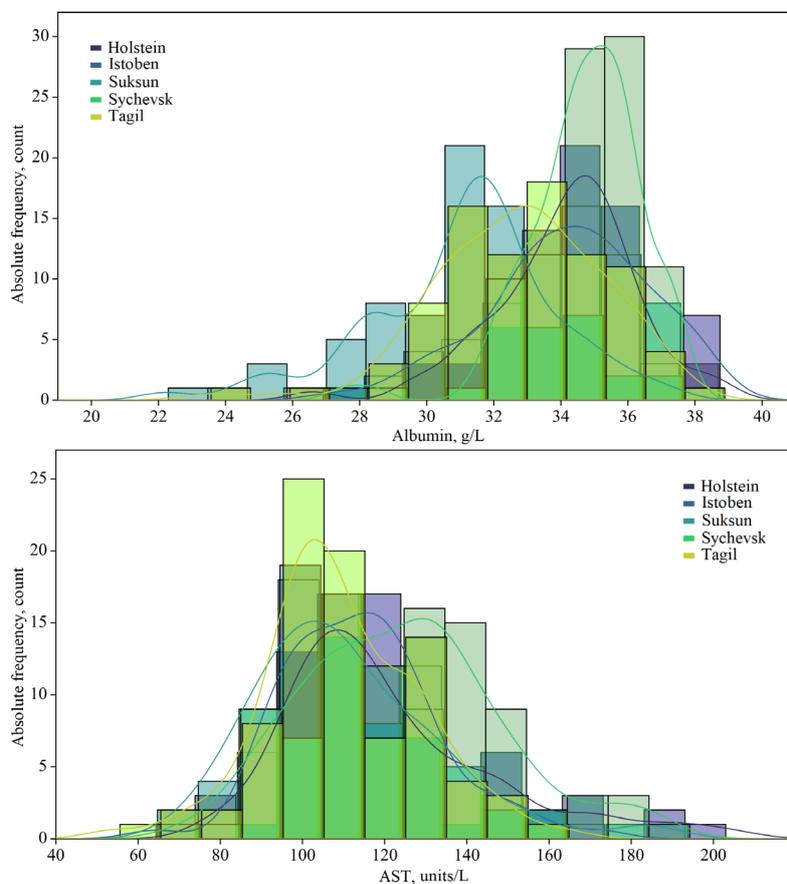


Fig. 1. Histograms of the distributions of albumin and aspartate aminotransferase in the blood serum of cows

Таблица 1
Сведения о показателях, использованных в нелинейном анализе главных компонент ($n = 407$)

Показатель	Единицы измерения	Минимум – максимум	Медиана	Квартили	Количество узлов
Популяция	–	–	–	–	3
Общий белок	г/л	59,3–101,7	82,8	77,7–87,9	114
Альбумин	г/л	22,2–38,7	33,8	31,9–35,3	102
Глобулины	г/л	27,8–76,1	49,4	43,7–55,1	309
Аспаргатаминотрансфераза	Ед/л	54,0–203	113	101–129	95
Креатинин	мкмоль/л	51,1–159	89	76,1–107,3	224
Мочевина	ммоль/л	0–7,5	2,8	1,9–3,9	61
Общий билирубин	мкмоль/л	0–16,9	0	0–0	7
Щелочная фосфатаза	Ед/л	16–412	64	48–81	111
Бикарбонаты	ммоль/л	5–45,7	27,6	22,7–31,4	185
Гамма-глутамилтрансфераза	Ед/л	5,2–54,9	14,4	11,5–20,8	175
Калий	ммоль/л	2,7–7,9	5	4,5–5,6	40
Кальций	ммоль/л	1,9–3,2	2,3	2,2–2,5	12
Натрий	ммоль/л	112,1–175,8	149,9	143,6–156,9	214
Свободные жирные кислоты	ммоль/л	0–1,2	0,2	0,1–0,5	10
Фосфор	ммоль/л	0,2–3,5	2	1,7–2,2	25
Хлориды	ммоль/л	94,7–129,5	114,1	109,4–117,8	159
Холестерин	ммоль/л	1,2–11,5	5,2	4,1–6,3	70

Table 1
Information about the indicators used in the nonlinear principal component analysis ($n = 407$)

Indicator	Units	Min – Max	Median	Quartiles	Number of nodes
Population	–	–	–	–	3
Total protein	g/L	59.3–101.7	82.8	77.7–87.9	114
Albumin	g/L	22.2–38.7	33.8	31.9–35.3	102
Globulin	g/L	27.8–76.1	49.4	43.7–55.1	309
Aspartate aminotransferase	units/L	54.0–203	113	101–129	95
Creatinine	$\mu\text{mol/L}$	51.1–159	89	76.1–107.3	224
Urea	mmol/L	0–7.5	2.8	1.9–3.9	61
Total bilirubin	$\mu\text{mol/L}$	0–16.9	0	0–0	7
Alkaline phosphatase	units/L	16–412	64	48–81	111
Bicarbonate	mmol/L	5–45.7	27.6	22.7–31.4	185
Gamma-glutamyl transferase	units/L	5.2–54.9	14.4	11.5–20.8	175
Potassium	mmol/L	2.7–7.9	5	4.5–5.6	40
Calcium	mmol/L	1.9–3.2	2.3	2.2–2.5	12
Sodium	mmol/L	112.1–175.8	149.9	143.6–156.9	214
Free fatty acids	mmol/L	0–1.2	0.2	0.1–0.5	10
Phosphorus	mmol/L	0.2–3.5	2	1.7–2.2	25
Chloride	mmol/L	94.7–129.5	114.1	109.4–117.8	159
Cholesterol	mmol/L	1.2–11.5	5.2	4.1–6.3	70

На втором этапе проведен повторный анализ с теми же настройками, но с выделением только 5 компонент. В отличие от классического PCA результаты такого анализа не идентичны первому варианту. В данном случае объясняемая дисперсия перераспределяется с оставшихся компонент на первые 5 ГК, которые в результате стали объяснять уже 67,4 % дисперсии в наборе данных. На этом стандартная техника CATPCA предлагает сразу интерпретировать выделенные ГК, хотя допускает

вращение полученного решения недокументированным способом¹. Поэтому в ходе второго этапа анализа матрица преобразованных по Джифи значений была сохранена, а затем проанализирована в ходе третьего (окончательного) варианта анализа с ортогональным вращением «варимакс». Результаты этого анализа представлены в таблице 2 и на рис. 4.

¹ Manisera M., Van der Kooij A. J., Dusseldorp E. Identifying the component structure of satisfaction scales by nonlinear principal components analysis // Quality technology & quantitative management. 2010. Vol. 7, No 2. Pp. 97–115. DOI: 10.1080/16843703.2010.11673222.

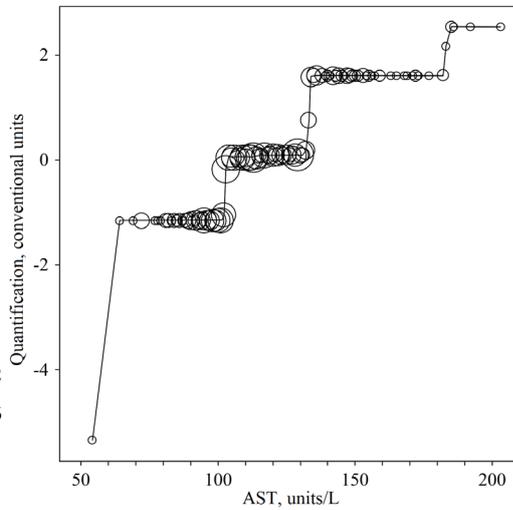
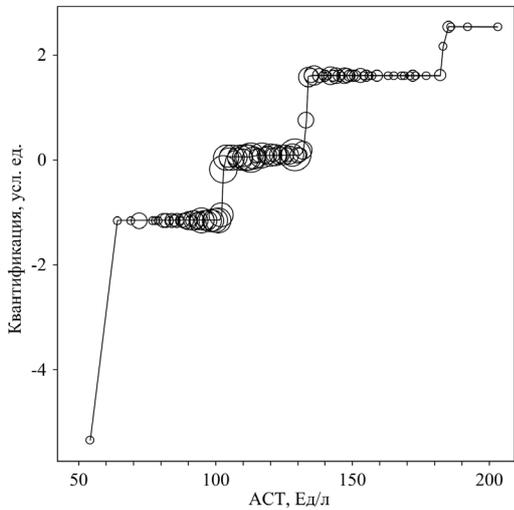
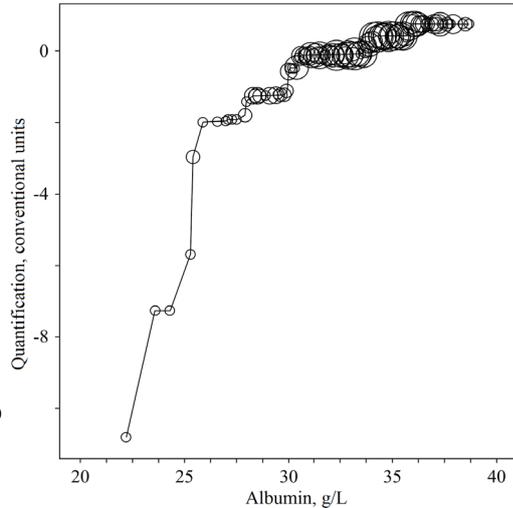
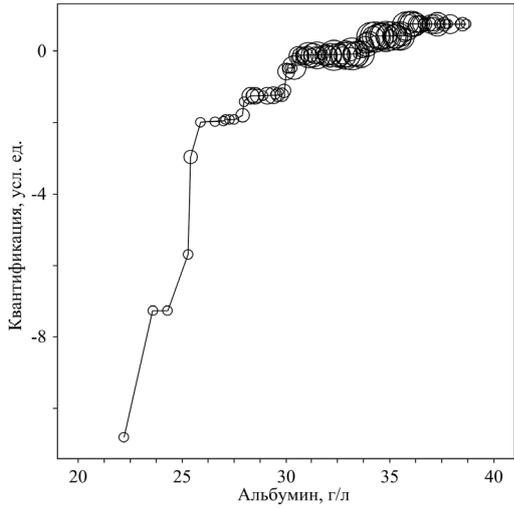


Рис. 2. Реальные и оцифрованные по Джифи значения двух биохимических показателей. Пояснения – в тексте

Fig. 2. Original and Gifi's transformed values of two biochemical parameters. Explanations are in the text

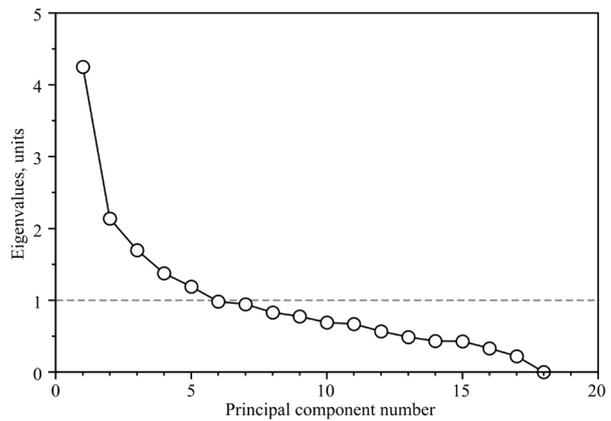
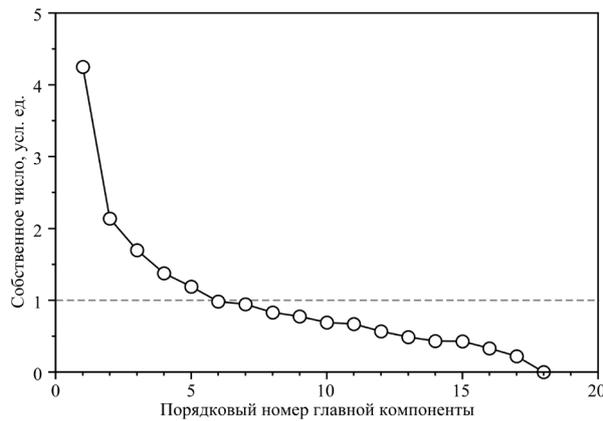


Рис. 3. Выделение главных компонент на графике «каменистой осыпи» Кэттелла. Пунктир – критерий Кайзера

Fig. 3. Search for principal components on the Cattell's scree plot. The dotted line is the Kaiser's rule

По значениям общностей таблицы 2 видно, что в рамках пятифакторной модели достаточно полное объяснение получили вариабельность концентрации глобулинов и различия между популяциями

(нагрузки близки к 1). Менее объясняемыми используемой моделью были изменения общего билирубина и щелочной фосфатазы.

Таблица 2

Нагрузки показателей на нелинейные главные компоненты после варимакс-вращения

Показатель	Главная компонента					Общность
	1	2	3	4	5	
Популяция	0,583	0,582	0,199	0,292	-0,309	0,899
Общий белок	0,066	0,504	0,672	0,157	0,095	0,743
Альбумин	-0,106	0,055	-0,833	0,099	0,189	0,755
Глобулины	0,085	0,307	0,896	0,062	0,006	0,907
Аспаргат-аминотрансфераза	0,068	-0,129	0,061	-0,030	0,827	0,709
Креатинин	-0,388	-0,596	-0,253	-0,095	0,235	0,634
Мочевина	-0,006	0,074	-0,035	0,741	-0,253	0,620
Общий билирубин	-0,556	-0,105	-0,090	-0,076	0,350	0,457
Щелочная фосфатаза	-0,164	-0,602	-0,117	0,064	0,057	0,411
Бикарбонаты	0,779	0,241	0,143	0,097	-0,213	0,739
Гамма-глутамил-трансфераза	-0,303	-0,739	-0,163	-0,130	0,324	0,786
Калий	0,042	0,040	-0,166	0,720	0,197	0,588
Кальций	-0,206	0,766	-0,239	0,115	0,083	0,706
Натрий	0,834	0,005	-0,007	-0,006	0,138	0,715
Свободные жирные кислоты	-0,445	-0,376	-0,152	-0,294	0,451	0,652
Фосфор	0,386	0,079	0,042	0,753	-0,093	0,734
Хлориды	0,698	0,071	-0,015	0,144	0,235	0,568
Холестерин	0,003	0,088	-0,671	0,187	-0,086	0,500
Доля объяснённой дисперсии, %	17,4	15,5	14,9	10,9	8,7	–

Table 2
Loadings of indicators on nonlinear principal components after varimax rotation

Indicator	Principal component					Communality
	1	2	3	4	5	
Population	0.583	0.582	0.199	0.292	-0.309	0.899
Total protein	0.066	0.504	0.672	0.157	0.095	0.743
Albumin	-0.106	0.055	-0.833	0.099	0.189	0.755
Globulin	0.085	0.307	0.896	0.062	0.006	0.907
Aspartate aminotransferase	0.068	-0.129	0.061	-0.030	0.827	0.709
Creatinine	-0.388	-0.596	-0.253	-0.095	0.235	0.634
Urea	-0.006	0.074	-0.035	0.741	-0.253	0.620
Total bilirubin	-0.556	-0.105	-0.090	-0.076	0.350	0.457
Alkaline phosphatase	-0.164	-0.602	-0.117	0.064	0.057	0.411
Bicarbonate	0.779	0.241	0.143	0.097	-0.213	0.739
Gamma glutamyl transferase	-0.303	-0.739	-0.163	-0.130	0.324	0.786
Potassium	0.042	0.040	-0.166	0.720	0.197	0.588
Calcium	-0.206	0.766	-0.239	0.115	0.083	0.706
Sodium	0.834	0.005	-0.007	-0.006	0.138	0.715
Free fatty acids	-0.445	-0.376	-0.152	-0.294	0.451	0.652
Phosphorus	0.386	0.079	0.042	0.753	-0.093	0.734
Chloride	0.698	0.071	-0.015	0.144	0.235	0.568
Cholesterol	0.003	0.088	-0.671	0.187	-0.086	0.500
Explained variance, %	17.4	15.5	14.9	10.9	8.7	–

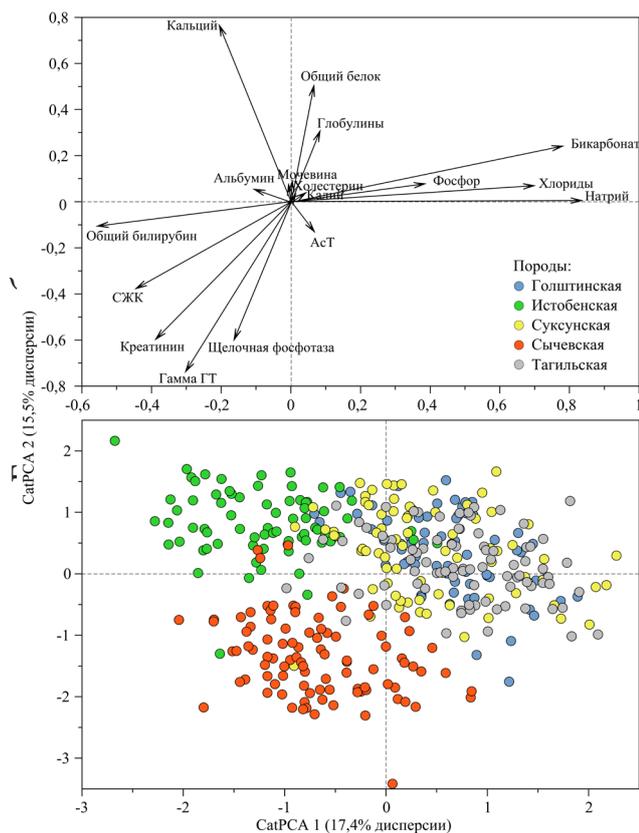


Рис. 4. Показатели и породы крупного рогатого скота в пространстве двух первых нелинейных главных компонент после вращения «варимакс»

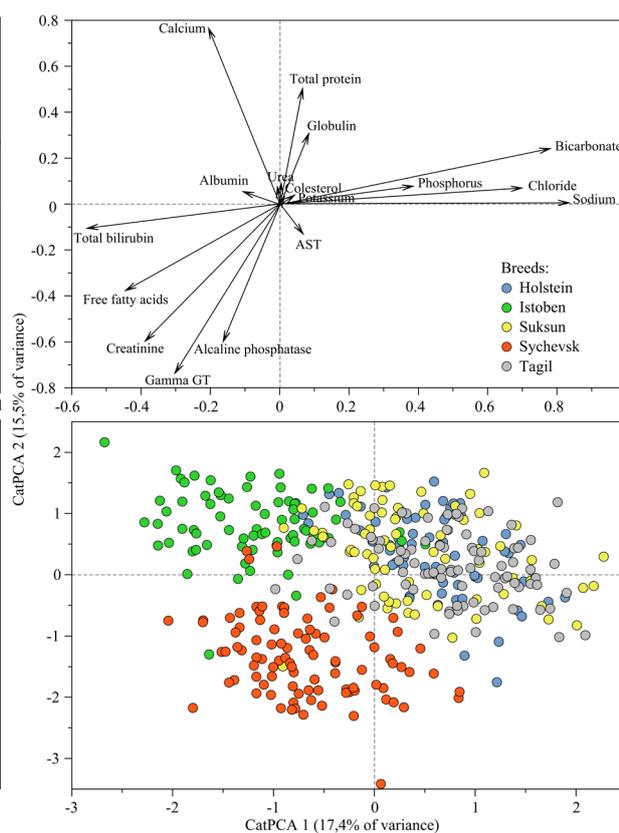


Fig. 4. Cattle traits and breeds in the space of the first two nonlinear principal components after varimax rotation

Первая и вторая главные компоненты ГК 1 и ГК 2 объясняли в сумме треть (32,9 %) всей изменчивости в наборе данных. Судя по высоким значениям нагрузок метки «Популяция» на эти ГК, они отражают процессы, связанные с популяционными различиями. Наиболее отчетливо последние видны на ординационной диаграмме рис. 4, в верхней части которого нагрузки показателей из таблицы 2 представлены в виде векторов. Направленные в одну сторону от нуля по данной ГК векторы указывают на положительную корреляцию показателей, а в разные стороны – на отрицательную. В нижней части рис. 4 приведены индивидуальные значения факторных меток для тех же компонент, т. е. они с одной стороны, показывают значения ГК 1 и ГК 2 для конкретных животных, с другой – указывают на животных и их группы, которые и обусловили выделение соответствующих компонент. Видно, что в пространстве двух первых ГК выделились истобенская и сычевская породы, тогда как голштинская, суксунская и тагильская не разделились и представлены на диаграмме общим облаком в правой верхней части.

Особенностью коров истобенской породы было относительно низкое содержание натрия, бикарбонатов и хлоридов (показатели с высокими нагрузками находятся в противоположной правой части диаграммы), при высоком содержании общего

билирубина и СЖК. Наиболее показательным для этой группы было высокое содержание кальция, направление вектора для которого совпало с положением облака меток в пространстве двух первых ГК.

Как видно из таблицы 3, концентрация кальция у этих животных была максимальной из 5 групп: 2,5 против 2,2–2,4 ммоль/л в других группах (критерий Краскела – Уоллиса $H_{(4)} = 122,5, p < 0,001$). Особенностью группы сычевской породы было относительно низкое содержание натрия, бикарбонатов и хлоридов и самое высокое – СЖК (0,5 против 0,1–0,4 ммоль/л в других группах; $H_{(4)} = 193,2, p < 0,001$), креатинина (117,1 против 79,1–92,6 мкмоль/л; $H_{(4)} = 193,2, p < 0,001$), гамма-ГТ (28,6 против 11,1–13,9 Ед/л, $H_{(4)} = 223,5, p < 0,001$) и щелочной фосфатазы (83,5 против 56,5–63 Ед/л; $H_{(4)} = 58,0, p < 0,001$).

Таким образом, для коров истобенской и сычевской пород можно выделить единый метаболический паттерн, отличающий их от других групп. Он выражается в накоплении в крови свободных жирных кислот, при общем снижении бикарбонатной емкости крови. Регистрируемые метаболические особенности в большей мере характеризуют высокую скорость мобилизации триглицеридов при активизации гормончувствительной липазы, активность которой увеличивается под действием глюкокортикоидов и катехоламинов.

Таблица 3

Биохимические показатели молочного скота пяти пород: медиана (Q_1-Q_3)

№ п/п	Показатель, ед. изм.	Голштинская (n = 70)	Истобенская (n = 75)	Суксунская (n = 79)	Сычевская (n = 96)	Тагильская (n = 87)
1	Общий белок, г/л	85,4 80,9–90,3	85,5 81,3–89,7	85,2 80,7–89,3	75,8 72,5–79,5	84,1 80,3–89,0
2	Альбумин, г/л	34,4 33,0–35,4	34,5 32,9–36,0	31,5 29,8–32,5	34,9 33,8–35,8	32,9 31,0–34,5
3	Глобулины, г/л	50,3 46,8–56,1	50,1 45,3–56,0	52,9 47,4–58,4	40,9 37,4–44,8	51,6 47,2–57,0
4	АСТ, Ед/л	114,0 103,8–132,8	113,0 101,0–125,0	109,0 95,0–125,0	124,0 106,3–137,5	107,0 98,0–124,0
5	Креатинин, мкмоль/л	79,1 73,1–88,6	92,6 85,0–104,6	80,4 73,0–94,5	117,1 105,2–129,7	79,2 68,3–89,4
6	Мочевина, ммоль/л	2,2 1,7–3,0	3,4 2,9–4,4	2,1 1,5–2,7	2,2 1,6–2,9	4,4 3,7–4,8
7	Общий билирубин, мкмоль/л	0,0 0,0–0,0	0,0 0,0–1,9	0,0 0,0–0,0	1,9 0,0–1,9	0,0 0,0–0,0
8	Щелочная фосфатаза, Ед/л	56,5 46,0–70,0	63,0 50,0–74,0	60,0 43,0–78,0	83,5 65,0–108,5	57,0 46,0–74,0
9	Бикарбонаты, ммоль/л	28,3 26,9–30,9	22,0 18,4–24,6	29,3 27,6–31,3	22,2 20,1–24,5	33,4 30,9–36,7
10	Гамма-глутамилтрансфераза, Ед/л	13,5 10,8–16,4	13,9 11,8–15,4	11,1 9,8–13,0	28,6 24,5–34,5	13,9 11,6–16,1
11	Калий, ммоль/л	5,3 4,9–6,0	4,9 4,2–5,3	4,7 4,1–4,9	5,0 4,6–5,4	5,5 4,9–5,9
12	Кальций, ммоль/л	2,4 2,2–2,5	2,5 2,4–2,6	2,4 2,2–2,5	2,2 2,1–2,3	2,3 2,3–2,5
13	Натрий, ммоль/л	155,2 150,7–158,9	141,3 136,3–147,1	152,2 146,6–156,6	145,9 137,9–152,9	155,8 149,6–159,2
14	Свободные жирные кислоты, ммоль/л	0,2 0,1–0,5	0,4 0,3–0,5	0,1 0,1–0,2	0,5 0,4–0,5	0,1 0,1–0,2
15	Фосфор, ммоль/л	2,2 2,0–2,3	1,9 1,8–2,1	1,8 1,6–2,0	1,6 1,5–1,9	2,5 2,2–2,7
16	Хлориды, ммоль/л	115,8 112,8–119,0	111,0 107,9–116,1	114,4 110,6–119,1	111,1 108,5–115,1	117,3 113,1–121,1
17	Холестерин, ммоль/л	4,8 3,8–6,6	4,5 3,5–5,6	4,7 3,6–5,7	5,6 4,7–6,4	5,9 4,5–7,2

Table 3

Biochemical parameters of dairy cows of five breeds: median (Q_1-Q_3)

No.	Indicator, units	Holstein (n = 70)	Istoben (n = 75)	Suksun (n = 79)	Sychevsk (n = 96)	Tagil (n = 87)
1	Total protein, g/L	85.4 80.9–90.3	85.5 81.3–89.7	85.2 80.7–89.3	75.8 72.5–79.5	84.1 80.3–89.0
2	Albumin, g/L	34.4 33.0–35.4	34.5 32.9–36.0	31.5 29.8–32.5	34.9 33.8–35.8	32.9 31.0–34.5
3	Globulin, g/L	50.3 46.8–56.1	50.1 45.3–56.0	52.9 47.4–58.4	40.9 37.4–44.8	51.6 47.2–57.0
4	Aspartate aminotransferase, units/L	114.0 103.8–132.8	113.0 101.0–125.0	109.0 95.0–125.0	124.0 106.3–137.5	107.0 98.0–124.0
5	Creatinine, $\mu\text{mol/L}$	79.1 73.1–88.6	92.6 85.0–104.6	80.4 73.0–94.5	117.1 105.2–129.7	79.2 68.3–89.4
6	Urea, mmol/L	2.2 1.7–3.0	3.4 2.9–4.4	2.1 1.5–2.7	2.2 1.6–2.9	4.4 3.7–4.8

7	Total bilirubin, $\mu\text{mol/L}$	0.0 0.0–0.0	0.0 0.0–1.9	0.0 0.0–0.0	1.9 0.0–1.9	0.0 0.0–0.0
8	Alkaline phosphatase, units/L	56.5 46.0–70.0	63.0 50.0–74.0	60.0 43.0–78.0	83.5 65.0–108.5	57.0 46.0–74.0
9	Bicarbonate, mmol/L	28.3 26.9–30.9	22.0 18.4–24.6	29.3 27.6–31.3	22.2 20.1–24.5	33.4 30.9–36.7
10	Gamma glutamyl transferase, units/L	13.5 10.8–16.4	13.9 11.8–15.4	11.1 9.8–13.0	28.6 24.5–34.5	13.9 11.6–16.1
11	Potassium, mmol/L	5.3 4.9–6.0	4.9 4.2–5.3	4.7 4.1–4.9	5.0 4.6–5.4	5.5 4.9–5.9
12	Calcium, mmol/L	2.4 2.2–2.5	2.5 2.4–2.6	2.4 2.2–2.5	2.2 2.1–2.3	2.3 2.3–2.5
13	Sodium, mmol/L	155.2 150.7–158.9	141.3 136.3–147.1	152.2 146.6–156.6	145.9 137.9–152.9	155.8 149.6–159.2
14	Free fatty acids, mmol/L	0.2 0.1–0.5	0.4 0.3–0.5	0.1 0.1–0.2	0.5 0.4–0.5	0.1 0.1–0.2
15	Phosphorus, mmol/L	2.2 2.0–2.3	1.9 1.8–2.1	1.8 1.6–2.0	1.6 1.5–1.9	2.5 2.2–2.7
16	Chloride, mmol/L	115.8 112.8–119.0	111.0 107.9–116.1	114.4 110.6–119.1	111.1 108.5–115.1	117.3 113.1–121.1
17	Cholesterol, mmol/L	4.8 3.8–6.6	4.5 3.5–5.6	4.7 3.6–5.7	5.6 4.7–6.4	5.9 4.5–7.2

Положение групп коров голштинской, суксунской и тагильской пород на рис. 2 визуально очень сходно, однако критерий Данна выявил значимые различия по ГК 1 и между ними: более высокими значениями характеризовались коровы тагильской породы ($p = 0,023$). С одной стороны, это указывает на то, что электролитный состав крови у коров тагильской породы наиболее соответствует референтным значениям по сравнению с коровами истобенской и сычевской пород. С другой стороны, по сравнению с голштинской и суксунской породами у коров тагильской породы отмечали в среднем стабильно высокие концентрации в плазме крови бикарбонатов, хлоридов и натрия (таблица 3).

Третья главная компонента (ГК 3) объясняла 14,9 % общей дисперсии показателей и отражала процесс, затрагивающий изменения количества плазменных белков и холестерина. Исходя из значений нагрузок (таблица 2) видно, что с содержанием общего белка положительно коррелировала концентрация глобулинов, а отрицательно – альбуминов. Такая ситуация закономерна и отражает альбумин-глобулиновое соотношение, полученное естественным образом в ходе многомерного анализа данных. Из значений ГК 3 следует, что коровы суксунской породы характеризовались более низкими значениями альбуминов и повышенным содержанием глобулинов (рис. 5). Известно, что накопление иммуноглобулинов происходит в ответ на воздействие антигенов, что говорит о высокой иммунологической реактивности указанных животных. Представленные механизмы лежат в основе неспецифической иммунологической реакции при повышении

производства глобулинов ретикулоэндотелиальными тканями, лимфоидными клетками, активированными В-клетками, плазматическими клетками и др. [18; 19]. В отличие от коров суксунской породы животные сычевской породы, напротив, имели высокую долю альбуминов и низкую глобулинов (рис. 5).

ГК 4 объясняла 10,9 % общей дисперсии и включала только 3 коррелирующих между собой показателя: мочевины, калий и фосфор. Максимальные значения ГК 4 отмечали у животных тагильской породы, минимальные – у суксунской. Симметричная относительная азотемия, гиперкалиемия и гипофосфатемия могут потенциально указывать на функциональное состояние почек, и в дальнейшем использоваться в рамках оценки состояния выделительной системы при наличии клинических признаков заболевания.

ГК 5 объясняла 8,7 % общей дисперсии и включала аспаргатаминотрансферазу, свободные жирные кислоты, общий билирубин и гамма-глутамил-трансферазу. Данные показатели объединяет то, что их согласованное изменение является индикатором негативного энергетического баланса в организме, который повышается при кетозе, истощении и липидозе печени [17]. Определенную нагрузку на ГК 5 дала и метка принадлежности к группе, что указывает на существование межгрупповых различий по данному паттерну показателей. Как видно из рис. 5, по сравнению с коровами голштинской породы наиболее благополучная ситуация в этом отношении наблюдалась у животных суксунской и тагильской пород.

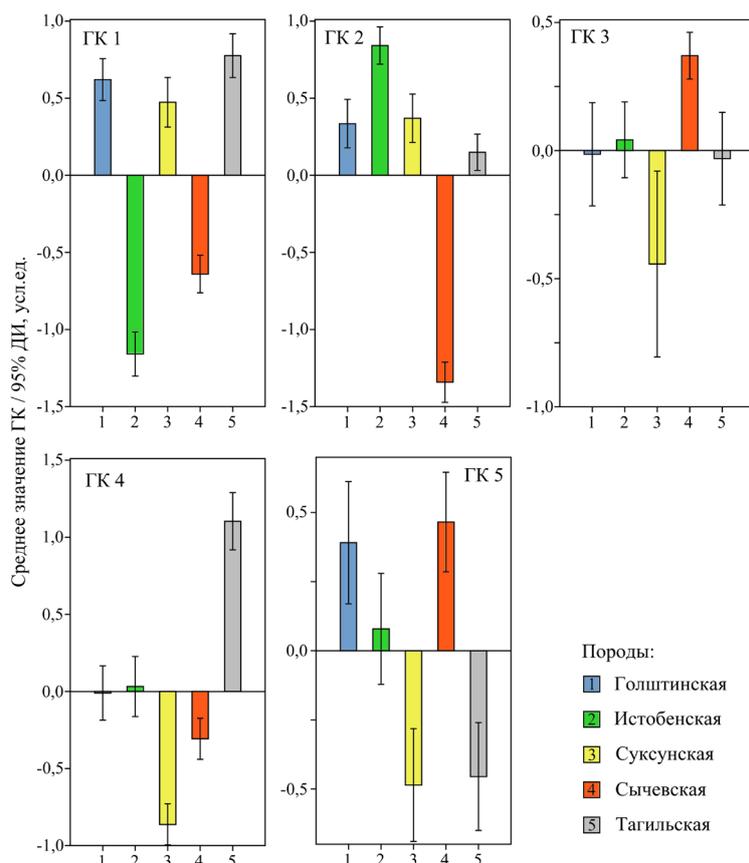


Рис. 5. Средние значения нелинейных главных компонент биохимического профиля коров

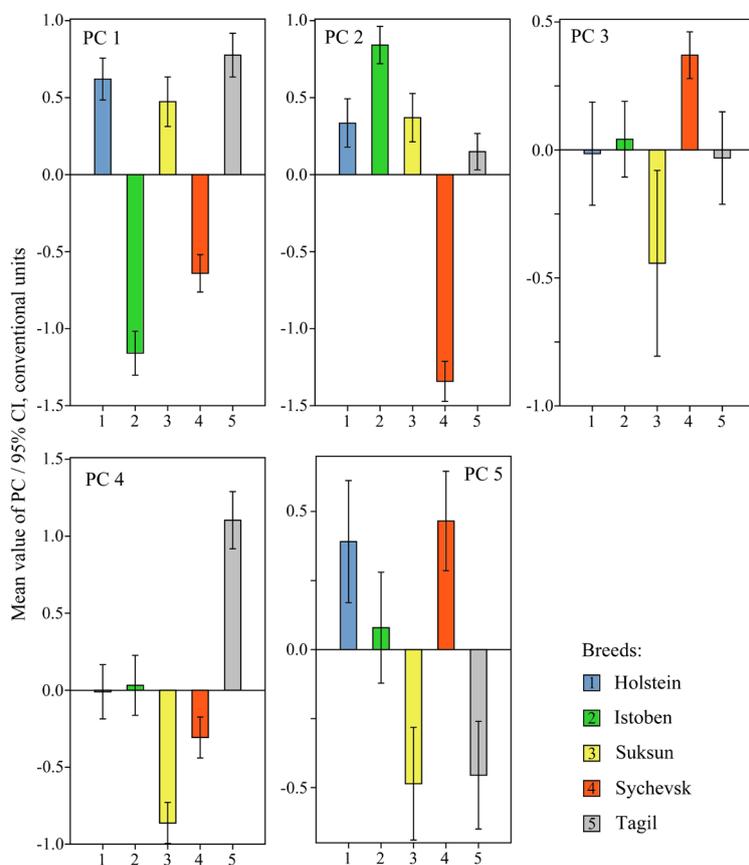


Fig. 5. Average values of nonlinear principal components of the biochemical profile of cows

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Таким образом, проведенный нелинейный анализ главных компонент по алгоритму САТРСА позволил обобщить большое число биохимических показателей и выявить процессы, по которым изученные группы коров различались в большей или меньшей степени. Были выделены и интерпретированы 5 главных компонент, объясняющих в сумме 67,4 % общей дисперсии. Некоторые наблюдаемые паттерны могут указывать на развитие различной патологии у животных. Судя по доле объясняемой дисперсии, среди предполагаемых состояний наиболее выраженными являются ацидоз и изменение микробиоты рубца, являющиеся с одной стороны весьма распространенными симптомокомплексами у крупного рогатого скота, а с другой, будучи связанными с обменом веществ, находят отражение в большом числе биохимических показателей [20; 21].

Показатели, характеризующие электролитный баланс крови, не были выделены в самостоятельный паттерн, а вошли в первую компоненту с противоположным знаком.

На втором месте после процессов нарушения микробиоты выделены признаки холестатического поражения печени на фоне повышенной антигенной нагрузки, приводящей к изменению соотношения плазменных белков.

Наиболее слабыми по отношению к вышеуказанному, но тем не менее выделившимся в самостоятельные интерпретируемые факторы были процессы, характеризующие водный и энергетический баланс в организме [22].

В целом анализ состояния популяций крупного рогатого скота по выделенным с помощью нелинейного анализа главных компонент биохимических процессов указывает на то, что схожие паттерны наблюдали, с одной стороны у коров тагильской, голштинской и суксунской, а с другой – истобенской и сычевской пород. Наиболее близкими к физиологической норме были животные суксунской породы. У коров голштинской породы наблюдали более выраженные изменения, связанные с отрицательным энергетическим балансом.

Библиографический список

1. Andjelić B., Djoković R., Cincović M., Bogosavljević-Bošković S., Petrović M., Mladenović J., Čukić A. Relationships between milk and blood biochemical parameters and metabolic status in dairy cows during lactation // *Metabolites*. 2022. Vol. 12, No. 8. Article number 733. DOI: 10.3390/metabo12080733.
2. Guliński P. Ketone bodies – causes and effects of their increased presence in cows' body fluids: A review // *Veterinary World*. 2021. Vol. 14, No. 6. Pp. 1492–1503. DOI: 10.14202/vetworld.2021.1492-1503.
3. Tufarelli V., Puvača N., Glamočić D., Pugliese G., Colonna, M. A. The most important metabolic diseases in dairy cattle during the transition period // *Animals*. 2024. Vol. 14. Article number 816. DOI: 10.3390/ani14050816.
5. Tran H., McConville M., Loukopoulos P. Metabolomics in the study of spontaneous animal diseases // *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*. 2020. Vol. 32, No. 5. Pp. 635–647. DOI: 10.1177/1040638720948505.
6. Chen Y., Li E. M., Xu L. Y. Guide to metabolomics analysis: A bioinformatics workflow // *Metabolites*. 2022. Vol. 12, No. 4. Article number 357. DOI: 10.3390/metabo12040357.
7. Brscic M., Cozzi G., Lora I., Stefani A. L., Contiero B., Ravarotto L. and Gottardo F. Short communication: Reference limits for blood analytes in Holstein late-pregnant heifers and dry cows: Effects of parity, days relative to calving, and season // *Journal of Dairy Science*. 2015. Vol. 98, No. 11. Pp. 7886–7892. DOI: 10.3168/jds.2015-9345.
8. Kim S., Jung S., Do Y., Jung Y., Choe C., Ha S. et al.. Haemato-chemical and immune variations in Holstein cows at different stages of lactation, parity, and age // *Veterinární medicína Czech*. 2020. Vol. 65, No. 3. Pp. 95–103. DOI: 10.17221/110/2019-VETMED.
9. Guyot H., Legroux D., Epe J., Bureau F., Cannon L., Ramery E. Hematologic and serum biochemical characteristics of Belgian blue cattle // *Veterinary Sciences*. 2024. Vol. 11. No. 5. Article number 222. DOI: 10.3390/vetsci11050222.
10. Štolcová M., Řehák D., Bartoň L., Rajmon R. Blood biochemical parameters measured during the periparturient period in cows of Holstein and Fleckvieh breeds differing in production purpose // *Czech Journal of Animal Science*. 2020. Vol. 65, No. 5. Pp. 172–181. DOI: 10.17221/99/2020-CJAS.
11. Buryakov N., Aleshin D., Buryakova M., Zaikina A., Nasr M., Nassan M., Fathala M. Productive performance and blood biochemical parameters of dairy cows fed different levels of high-protein concentrate // *Frontiers in Veterinary Science*. 2022. Vol. 9. Article number 852240. DOI: 10.3389/fvets.2022.852240.
12. Le Boedec K. Reference interval estimation of small sample sizes: A methodologic comparison using a computer-simulation study // *Veterinary Clinical Pathology*. 2019. Vol. 48, No. 2. Pp. 335–346. DOI: 10.1111/vcp.12725.
13. Friedrichs K. R. ASVCP reference interval guidelines: determination of *de novo* reference intervals in veterinary species and other related topics // *Veterinary Clinical Pathology*. 2012. Vol. 41, No. 4. P. 441–453. DOI: 10.1111/vcp.12006.
14. Briscic M. Improvement of variables interpretability in kernel PCA // *BMC Bioinformatics*. 2023. Vol. 24. Article number 282. DOI: 10.1186/s12859-023-05404-y.

15. Smith A. K., Ropella G. E. P., McGill M. R., Krishnan P., Dutta L., Kennedy R. C., Jaeschke H., Hunt C. A. Contrasting model mechanisms of alanine aminotransferase (ALT) release from damaged and necrotic hepatocytes as an example of general biomarker mechanisms // *PLOS Computational Biology*. 2020. Vol. 16, No. 6. Article number e1007622. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1007622.

16. Kanoh N. An integrated screening system for the selection of exemplary substrates for natural and engineered cytochrome P450s // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9, No. 1. Article number 18023. DOI: 10.1038/s41598-019-54473-8.

17. Puppel K. Comparison of enzyme activity in order to describe the metabolic profile of dairy cows during early lactation // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23, No. 17. Article number 9771. DOI: 10.3390/ijms23179771.

18. Alberghina D. Reference intervals for total protein concentration, serum protein fractions, and albumin/globulin ratios in clinically healthy dairy cows // *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*. 2011. Vol. 23, No. 1. Pp. 111–114. DOI: 10.1177/104063871102300119.

19. Eckersall P. D. Proteins, proteomics, and the dysproteinemias. *Clinical biochemistry of domestic animals*. 6th ed. California: Elsevier Academic Press. 2008. Pp. 117–155. DOI: 10.1016/B978-0-12-370491-7.00005-2.

20. Калюжный И. И. Щербаков Г. Г., Яшин А. В. Клиническая гастроэнтерология животных: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 448 с.

21. Мороз М. Т., Захаров В. В., Саморуков В. И. Современные технологии повышения продуктивности сельскохозяйственных животных, улучшения качества животноводческой продукции. Организация биологически полноценного кормления высокопродуктивных коров: учебное пособие. Санкт-Петербург: СПбГАУ, 2023. 110 с.

22. Васильев Ю. Г., Трошин Е. И., Любимов А. И. Ветеринарная клиническая гематология. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 656 с.

Об авторах:

Денис Юрьевич Нохрин, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-4920-2338, AuthorID 397913. E-mail: nokhrin8@mail.ru

Ольга Васильевна Соколова, доктор ветеринарных наук, ведущий научный сотрудник, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-1169-4090, AuthorID 648613. E-mail: nauka_sokolova@mail.ru

Александр Иванович Белоусов, доктор ветеринарных наук, ведущий научный сотрудник, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-7838-4126, AuthorID 678443. E-mail: white-knight@mail.ru

Альбина Геннадьевна Исаева, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0001-8395-1247, AuthorID 665717. E-mail: isaeva.05@bk.ru

Елена Владимировна Мокерова, начальник отдела по племенной работе АО «Кировское» по племенной работе. ORCID 0009-0007-0149-7214, AuthorID 1087776. Email: risckirov@mail.ru

Юлия Сергеевна Герасимова, заместитель генерального директора АО «Смоленское» по племенной работе. ORCID 0009-0003-4341-2769. Email: plemmolplem@yandex.ru

References

1. Andjelić B., Djoković R., Cincović M., Bogosavljević-Bošković S., Petrović M., Mladenović J., Čukić A. Relationships between milk and blood biochemical parameters and metabolic status in dairy cows during lactation. *Metabolites*. 2022; 12 (8): 733. DOI: 10.3390/metabo12080733.

2. Guliński P. Ketone bodies – causes and effects of their increased presence in cows' body fluids: A review. *Veterinary World*. 2021; 14 (6): 1492–1503. DOI: 10.14202/vetworld.2021.1492-1503.

3. Tufarelli V., Puvača N., Glamočić D., Pugliese G., Colonna, M. A. The most important metabolic diseases in dairy cattle during the transition period. *Animals*. 2024; 14: 816. DOI: 10.3390/ani14050816.

5. Tran H., McConville M., Loukopoulos P. Metabolomics in the study of spontaneous animal diseases. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*. 2020; 32 (5): 635–647. DOI: 10.1177/1040638720948505.

6. Chen Y., Li E. M., Xu L. Y. Guide to Metabolomics Analysis: A Bioinformatics Workflow. *Metabolites*. 2022; 12 (4): 357. DOI: 10.3390/metabo12040357.

7. Brscic M., Cozzi G., Lora I., Stefani A. L., Contiero B., Ravarotto L. and Gottardo F. Short communication: Reference limits for blood analytes in Holstein late-pregnant heifers and dry cows: Effects of parity, days relative to calving, and season. *Journal of Dairy Science*. 2015; 98 (11): 7886–7892. DOI: 10.3168/jds.2015-9345.

8. Kim S., Jung S., Do Y., Jung Y., Choe C., Ha S. et al.. Haemato-chemical and immune variations in Holstein cows at different stages of lactation, parity, and age. *Veterinární Medicína Czech*. 2020; 65 (3): 95–103. DOI: 10.17221/110/2019-VETMED.
9. Guyot H., Legroux D., Eppe J., Bureau F., Cannon L., Ramery E. Hematologic and Serum Biochemical Characteristics of Belgian Blue Cattle. *Veterinary Sciences*. 2024; 11 (5): 222. DOI: 10.3390/vetsci11050222.
10. Štolcová M., Řehák D., Bartoň L., Rajmon R. Blood biochemical parameters measured during the periparturient period in cows of Holstein and Fleckvieh breeds differing in production purpose. *Czech Journal of Animal Science*. 2020; 65 (5): 172–181. DOI: 10.17221/99/2020-CJAS.
11. Buryakov N., Aleshin D., Buryakova M., Zaikina A., Nasr M., Nassan M., Fathala M. Productive performance and blood biochemical parameters of dairy cows fed different levels of high-protein concentrate. *Frontiers in Veterinary Science*. 2022; 9: 852240. DOI: 10.3389/fvets.2022.852240.
12. Le Boedec K. Reference interval estimation of small sample sizes: A methodologic comparison using a computer-simulation study. *Veterinary Clinical Pathology*. 2019; 48 (2): 335–346. DOI: 10.1111/vcp.12725.
13. Friedrichs K. R. ASVCP reference interval guidelines: determination of *de novo* reference intervals in veterinary species and other related topics. *Veterinary Clinical Pathology*. 2012; 41 (4): 441–453. DOI: 10.1111/vcp.12006.
14. Briscik M. Improvement of variables interpretability in kernel PCA. *BMC Bioinformatics*. 2023; 24: 282. DOI: 10.1186/s12859-023-05404-y.
15. Smith A. K., Ropella G. E. P., McGill M. R., Krishnan P., Dutta L., Kennedy R. C., Jaeschke H., Hunt C. A. Contrasting model mechanisms of alanine aminotransferase (ALT) release from damaged and necrotic hepatocytes as an example of general biomarker mechanisms. *PLOS Computational Biology*. 2020; 16 (6): e1007622. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1007622.
16. Kanoh N. An integrated screening system for the selection of exemplary substrates for natural and engineered cytochrome P450s. *Scientific Reports*. 2019; 9 (1): 18023. DOI: 10.1038/s41598-019-54473-8.
17. Puppel K. Comparison of enzyme activity in order to describe the metabolic profile of dairy cows during early lactation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23 (17): 9771. DOI:10.3390/ijms23179771.
18. Alberghina D. Reference intervals for total protein concentration, serum protein fractions, and albumin/globulin ratios in clinically healthy dairy cows. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*. 2011; 23 (1): 111–114. DOI: 10.1177/104063871102300119.
19. Eckersall P. D. *Proteins, Proteomics, and the Dysproteinemias. Clinical Biochemistry of Domestic Animals*. 6th ed. California: Elsevier Academic Press. 2008. Pp. 117–155. DOI: 10.1016/B978-0-12-370491-7.00005-2.
20. Kalyuzhny I. I. Shcherbakov A. V., Yashin G. G. *Clinical Gastroenterology of Animals: a textbook*. Saint Petersburg: Lan', 2022. 448 p. (In Russ.)
21. Moroz M. T., Zakharov V. V., Samorukov V. I. *Modern Technologies for Increasing the Productivity of Farm Animals, Improving the Quality of Livestock Products. Organization of Biologically Complete Feeding of Highly Productive Cows: a textbook*. St. Petersburg: SPbGAU, 2023. 110 p. (In Russ.)
22. Vasil'ev Yu. G., Troshin E. I., Lyubimov A. I. *Veterinary Clinical Hematology*. Saint Petersburg: Lan', 2022. 656 p. (In Russ.)

Authors' information:

Denis Yu. Nokhrin, candidate of biological sciences, leading researcher, Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia. ORCID 0000-0002-4920-2338, AuthorID 397913. *E-mail: nokhrin8@mail.ru*

Olga V. Sokolova, doctor of veterinary sciences, leading researcher, Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia. ORCID 0000-0002-1169-4090, AuthorID 648613. *E-mail: nauka_sokolova@mail.ru*

Aleksandr I. Belousov, doctor of veterinary sciences, leading researcher, Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia. ORCID 0000-0002-7838-4126, AuthorID 678443. *E-mail: white-knight@mail.ru*

Albina G. Isaeva, doctor of biological sciences, leading researcher, Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia. ORCID 0000-0001-8395-1247, AuthorID 665717. *E-mail: isaeva.05@bk.ru*

Elena V. Mokerova, head of department of JSC “Kirovskoe” for breeding work JSC, Kirov, Russia. ORCID 0009-0007-0149-7214, AuthorID 1087776. *Email: riskirov@mail.ru*

Yuliya S. Gerasimova, deputy general director of “Smolenskoe” for breeding work JSC, Smolensk, Russia. ORCID 0009-0003-4341-2769. *Email: plemsmolplem@yandex.ru*

Генетический потенциал токсигенных *Escherichia coli*, выделенных от телят и поросят

А. С. Тищенко[✉], А. Г. Кошчаев¹, А. В. Милованов¹, А. В. Елисютикова¹, В. И. Терехов², Т. В. Малышева³

¹ Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, г. Краснодар, Россия

² Пашковский сельскохозяйственный колледж, Краснодар, Россия

³ Кубанский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, Краснодар, Россия

✉ E-mail: tishhenko.a@edu.kubsau.ru

Аннотация. Исследование направлено на генетическую характеристику диареогенных *Escherichia coli*, выделенных от крупного рогатого скота и свиней. **Цель** – изучение генетического потенциала, ответственного за выработку экзотоксинов у патогенных кишечных палочек, – возбудителей эшерихиоза у телят и поросят. **Научная новизна** работы заключается в расшифровке геномов диареогенных *E. coli* с наличием нуклеотидных последовательностей нескольких экзотоксинов, включая термолабильный, термостабильный и шигаподобный, а также колицинов, гемолизинов и цикломодулинов, имеющих патогенетическое значение в развитии эшерихиозной инфекции у телят и поросят. Работа выполнялась с использованием микробиологических и молекулярно-генетических методов исследований и масс спектрометрического анализа. В результате генетическому скринингу с помощью полимеразной цепной реакции в агарозном геле было подвергнуто 135 изолятов кишечной палочки. Установлено, что 68 (50,36 %) эшерихий обладали маркерами токсигенности, при этом ген термолабильного экзотоксина регистрировали чаще других (48,5 %), и большинство было зафиксировано у *E. coli*, выделяемых от поросят (29,4 %). У 19 (27,9 %) изолятов установили наличие генов, кодирующих выработку нескольких экзотоксинов. По результатам полимеразной цепной реакции 4 изолята кишечной палочки с разным набором нуклеотидных последовательностей, отвечающих за продукцию двух и более экзотоксинов одновременно, были подвергнуты полногеномному секвенированию. Проведены сборка и аннотация геномов эшерихий и их депонирование базу данных NCBI Prokaryotic Genome Annotation Pipeline под общим номером BioProject PRJNA887444. Необходимы дальнейшие исследования генов кишечных палочек и их роль в патогенном потенциале возбудителей эшерихиоза для последующих разработок эффективных средств профилактики и контроля инфекции.

Ключевые слова: *Escherichia coli*, генетическое разнообразие, полногеномное секвенирование, экзотоксины, патогенность, токсигенность, телята, поросята

Для цитирования: Тищенко А. С., Кошчаев А. Г., Милованов А. В., Елисютикова А. В., Терехов В. И., Малышева Т. В. Генетический потенциал токсигенных *Escherichia coli*, выделенных от телят и поросят // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 08. С. 1071–1081. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1071-1081>.

Дата поступления статьи: 06.02.2024, **дата рецензирования:** 13.06.2024, **дата принятия:** 21.06.2024.

The genetic potential of toxigenic *Escherichia coli* isolated from calves and piglets

A. S. Tishchenko¹✉, A. G. Koshchayev¹, A. V. Milovanov¹, A. V. Elisyutikova¹, V. I. Terekhov², T. V. Malysheva³

¹ Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russia

² Pashkovsky Agricultural College, Krasnodar, Russia

³ Kuban State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Krasnodar, Russia

✉ E-mail: tishhenko.a@edu.kubsau.ru

Abstract. The study aims to genetically characterize diarrhoeagenic *Escherichia coli* isolated from cattle and pigs. The main **purpose** is genetic potential responsible for the production of exotoxins in pathogenic *E. coli*, the causative agents of escherichiosis in calves and piglets. The **scientific novelty** of the work consists in deciphering the genomes of diarrhoeagenic *E. coli* with the presence of nucleotide sequences of several exotoxins, including thermolabile, thermostable and shigap-like, as well as colicins, hemolysins and cyclomodulins, which have pathogenic significance in the development of escherichia infection in calves and piglets. The study was carried out using microbiological and molecular genetic **methods** of research and mass spectrometric analysis. As a **result**, 135 *E. coli* isolates were subjected to genetic screening by polymerase chain reaction in agarose gel. It was found that 68 (50.36 %) escherichia had toxigenicity markers, while the thermolabile exotoxin gene was recorded more often than others (48.5 %), and the majority was recorded in *E. coli* isolated from piglets (29.4 %). In 19 (27.9 %) isolates, the presence of genes encoding the production of several exotoxins was established. According to the results of the polymerase-chain reaction, 4 *E. coli* isolates with a different set of nucleotide sequences responsible for the production of two or more exotoxins at the same time were subjected to genome-wide sequencing. The *Escherichia* genomes were assembled and annotated and deposited in the NCBI Prokaryotic Genome Annotation Pipeline database under the general number BioProject PRJNA887444. Further studies of *E. coli* genes and their role in the pathogenic potential of escherichiosis pathogens are needed for the subsequent development of effective means of preventing and controlling infection.

Keywords: *Escherichia coli*, genetic diversity, whole-genome sequencing, exotoxins, pathogenicity, toxigenicity, calves, piglets

For citation: Tishchenko A. S., Koshchayev A. G., Milovanov A. V., Elisyutikova A.V., Terekhov V. I., Malysheva T. V. The genetic potential of toxigenic *Escherichia coli* isolated from calves and piglets. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (08): 1071–1081. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1071-1081>. (In Russ.)

Date of paper submission: 06.02.2024, **date of review:** 13.06.2024, **date of acceptance:** 21.06.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

Кишечная палочка (*Escherichia coli*) – это бактерия, которая является постоянным обитателем желудочно-кишечного тракта людей и многих животных. Хотя большинство штаммов *E. coli* безвредны, существуют некоторые патогенные штаммы, которые могут вызывать у людей болезни пищеварительной системы, инфекции мочевыводящих путей и даже опасные для жизни состояния, такие как гемолитико-уремический синдром [1].

Одним из наиболее известных патогенных штаммов кишечных палочек является *E. coli* O157:H7. Этот штамм ответствен за многие вспышки болезней пищевого происхождения и известен тем, что вырабатывает шигаподобный токсин, который может вызвать серьезное повреждение сли-

зистой оболочки кишечника и привести к почечной недостаточности [2; 3].

Патогенная кишечная палочка может представлять серьезную проблему для здоровья телят и поросят, поскольку эти животные особенно восприимчивы к инфекциям, вызываемым определенными штаммами кишечной палочки [4; 5].

Существует несколько ключевых моментов о важности патогенной кишечной палочки для этих молодых животных. У телят и поросят может развиться диарея в результате заражения определенными штаммами патогенной кишечной палочки, что способно вызвать значительное обезвоживание и привести к снижению темпов роста. Патогенная кишечная палочка является частой причиной неонатальной диареи у телят и поросят. Это может произойти вскоре после рождения и способно при-

вести к летальному исходу при несвоевременном лечении. Патогенные инфекции *E. coli* способны оказать значительное экономическое воздействие на животноводческую отрасль, поскольку больным животным может потребоваться ветеринарная помощь, и в результате инфекции могут снизиться темпы роста или даже погибнуть. Некоторые штаммы патогенной кишечной палочки, которые заражают телят и поросят, также могут передаваться людям, потенциально вызывая заболевания пищевого происхождения [6; 7].

Существует множество патогенных штаммов *E. coli*, включая энтеропатогенную *E. coli* (EPEC), энтеротоксигенную *E. coli* (ETEC), энтероагрегативную *E. coli* (EAEC) и другие. Каждый из этих штаммов обладает собственной уникальной комбинацией факторов вирулентности, и это отражает их генетическое разнообразие [8].

Генетические исследования патогенных штаммов *E. coli* показали, что многие из них приобрели факторы вирулентности посредством горизонтального переноса генов, процесса, посредством которого бактерии могут приобретать новые гены от других бактерий. Это может произойти с помощью таких процессов, как конъюгация, трансформация или трансдукция [9; 10].

Генетическое разнообразие патогенных штаммов *E. coli* весьма значительно. Патогенные штаммы *E. coli* обычно классифицируются на различные категории в зависимости от сочетания факторов вирулентности, которыми они обладают. Факторы вирулентности инфекционного агента – это молекулы или белки, которые позволяют бактериям вызывать заболевание. У *E. coli* некоторые факторы вирулентности патогенных штаммов включают в себя такие распространенные токсины, как адгезины и фимбрии [11; 12].

В связи с этим понимание генетического разнообразия патогенных штаммов *E. coli* важно для разработки эффективных стратегий контроля и профилактики инфекций, вызываемых этими бактериями.

Целью работы явилось изучение генетического разнообразия токсигенных свойств кишечных палочек, выделенных от больных эшерихиозом телят и поросят.

Методология и методы исследования (Methods)

Отбор изолятов кишечной палочки

В работе использовались 135 изолятов кишечной палочки, выделенных от больных эшерихиозом телят и поросят из животноводческих хозяйств Краснодарского края. Четыре изолята *E. coli* (KubGAU B-533, KubGAU B-546, KubGAU B-923, выделенные от поросят, и KubGAU B-933, изолированный от теленка) были подвергнуты полногеномному секвенированию по Сэнгеру.

Родовую идентификацию проводили с использованием бактериологического и серологического ме-

тодов диагностики с использованием коммерческих питательных сред (ГМФ-агар, ГМФ-бульон, бульон Хоттингера, агар Эндо) и коагглютинирующих и адгезивных сывороток производства ФБУН «Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии» (г. Оболенск) и ФКП «Армавирская биофабрика» (г. Армавир). Видовую идентификацию патогенных кишечных палочек проводили с использованием метода MALDI-TOF MS на спектрометре VastoSCREEN при помощи прилагающегося программного обеспечения («Литех», РФ).

Выделение ДНК бактерий

Для подготовки к выделению ДНК образцы бактерий суспендировали в 0,5 мл ТЕ-буфера и центрифугировали 2 минуты при 14 000 об/мин. Надосадочную жидкость удалили, из осадка выделяли ДНК с помощью DNeasy Blood & Tissue Kit (QIAGEN, Германия) по протоколу, входящему в набор. Количество выделенной ДНК оценивали с помощью флуориметра Qubit (Thermo Fisher, США).

ПЦР-анализ исследуемых образцов

Молекулярно-генетическую характеристику изолятов *E. coli* на определение генов экзотоксинов и патотипов эшерихий с выявлением специфических участков ДНК устанавливали в полимеразно-цепной реакции с использованием тест-систем АмплиСенс® Эшерихиозы-FL диареегенные *E. coli* (Москва).

Также при помощи метода ПЦР исследовали образцы на продуцирование следующих токсинов: термолабильный энтеротоксин, термостабильные токсины (ST-I и ST-II), шига-токсин I и II типов. Проводили анализ с помощью следующих праймеров, синтезированных компанией ЗАО «Евроген» (Москва):

LT_F (5'-CTGCCATCGATTCCGTATATGAT-3'),
 LT_R (5'-CAGAACTATGTTCCGGAATATCGCA-3'),
 ST-I_F (5'-TACCTCCCGTCATGTTGTTTTCAC-3'),
 ST-I_R (5'-CCTCGACATATAACATGATGCAACTC-3'),
 ST-II_F (5'-GTTTCTATTGCTACAATGCGCAATGC-3'),
 ST-II_R (5'-AACCTTTTTTACAACCTTCCCTTGGC-3'),
 Stx1_F (5'-TCCCCAGTTCAATGTAAGATCAAC-3'),
 Stx1_R (5'-TTTCGTACAACACTGGATGATCTCA-3'),
 Stx2_F (5'-GAGTGACGACTGATTTGCATTC-3'),
 Stx2_R (5'-CCATGACAACGGACAGCAGTT-3').

ПЦР-смесь включала в себя 12,6 мкл воды, 2,5 мкл буфера, 0,5 мкл dNTP (10 mM каждого), 8 мкл праймера (концентрация – 3 mM), 0,4 мкл полимеразы Taq I (ЗАО «Евроген», Россия), 5–20 нг ДНК. Полимеразная цепная реакция проводилась в амплификаторе C1000 Touch 96 (Bio-Rad, США) при следующих параметрах: начальная денатурация – 10 мин. при 95 °C; далее 40 циклов, включающих в себя денатурацию при 95 °C в течение 30 с, отжиг праймеров в течение 30 с при 60 °C и синтез 30 с при 72 °C; после чего проводилась финальная элонгация при 72 °C в течение 5 мин. [13].

Продукты ПЦР разделяли с помощью горизонтального электрофореза в однопроцентном агарозном геле в ТАЕ-буфере при 100 А и 100 В в течение 1 ч. Результат визуализировали с помощью GelDoc Go Gel Imaging System (Bio-Rad, США).

Полногеномное секвенирование

Для определения нуклеотидной последовательности геномов исследуемых образцов *E. coli* были подготовлены библиотеки с помощью набора DNA Preparation (M) Tagmentation Kit (Illumina Inc., США). Необходимую концентрацию библиотек подбирали в соответствии с показателями флуориметра Qubit. Полногеномное секвенирование проводили при помощи аппарата MiSeq (Illumina Inc., США). Полученные файлы формата fastq были использованы для сборки геномов *de novo* при помощи алгоритмов SPAdes v.3.15.3 [14] в программе UGENE [15]. Качество сборки геномов было оценено с помощью QUAST v.5.0.2 [16]. Полученные контиги были депонированы в NCBI как архивы прочтений и геномы, после чего их кодирующие последовательности ДНК (CDS) были автоматически аннотированы при помощи NCBI Prokaryotic Genome Annotation Pipeline (PGAP) [17].

Полученные данные оформляли в табличный материал с помощью программ Microsoft Office Word и Excel 2010.

Результаты (Results)

Результаты проведенных исследований с использованием ПЦР показали, что из 135 изолятов способностью вырабатывать экзотоксины обладали 68, что составило 50,36 %. У остальных 67 изолятов (49,64 %) маркеров токсигенности выявлено не было.

Как видно из таблицы 1, из 68 эшерихий на долю выделенных от поросят приходилось 40 (58,8 %), а телят – 28 (41,2 %).

Наиболее часто регистрировали *E. coli* с геном LT (48,5 %), из них в 29,4 % случаях выделялись от поросят, 19,1 % – от телят. Кроме того, в 17,6 % исследований зафиксировали наличие гена LT в комбинации с другими генами экзотоксинов.

Наличие генов, отвечающих за продукцию ST-I и ST-II, выявили лишь у 4 изолятов (5,8 %), выделенных от телят и поросят в равной степени. Стоит отметить, что гены ST-II регистрировали еще у 3 изолятов маркерами LT и Stx2.

У 16 изолятов (23,6 %) были выявлены генетические детерминанты только к Stx2, из них 12 (17,7 %) – от поросят, 4 (5,9 %) – от телят. В целом гены шигаподобных экзотоксинов II типа регистрировали у 42,6 % эшерихий и чаще фиксировались у поросят, чем у телят: 16 и 13 изолятов соответственно.

Гены, отвечающие за выработку Stx1, были установлены у 9 изолятов *E. coli*, что составило 13,2 % (1 от поросенка и 8 от телят). Эшерихии, у которых

присутствовал бы только ген шигаподобного экзотоксина I типа, не регистрировали.

У 2 (2,9 %) изолятов, выделенных от поросят, были установлены гены экзотоксинов, отвечающие за продукцию одновременно LT и ST-II. Специфические маркеры, контролирующие выработку сразу LT, Stx1 и 2, выявили у 6 (8,9 %) изолятов (1 от поросенка и 5 от телят). Кроме того, у 4,4 % выделенных эшерихий (у 2 поросят и 1 теленка) было зафиксировано наличие генетических маркеров одновременно к LT, ST-I и Stx2. Один изолят (1,5 %) *E. coli*, выделенный от теленка, обладал генами сразу четырех экзотоксинов: LT, ST-I, ST-II, Stx2.

В результате первичного анализа геномов *E. coli* отобрали 4 кандидатных штамма (KubGAU B-533, KubGAU B-546, KubGAU B-923, KubGAU B-933) – потенциальных стабильных продуцентов экзотоксинов (LT, ST, Stx типов 1, 2), выделенных из химуса кишечника телят и поросят. По итогам проведения ПЦР с имеющимися праймерами и визуализации в агарозном геле получились результаты, регистрирующие наличие маркеров токсигенности у всех четырех образцов *E. coli*, за исключением образца № 1 (KubGAU B-533), на предмет наличия гена, отвечающего за продуцирование термостабильного токсина ST-I. Результаты ПЦР свидетельствуют о том, что все исследуемые штаммы бактерий имеют гены, отвечающие за продуцирование термолабильного токсина, термостабильного токсина ST-II, шига-токсинов 1 и 2. Однако ген, отвечающий за синтез термостабильного токсина ST-I, присутствует у всех образцов, кроме штамма бактерий KubGAU B-533.

Сборка и аннотация геномов

В результате секвенирования, сборки и аннотации геномов образцов *E. coli* были получены данные, отраженные в таблице 2. Наибольшее значение прочтений у штамма KubGAU B-546 (811 581), наименьшее – у штамма KubGAU B-923 (192 647). Размер генома у четырех образцов варьирует от 5 109 654 (KubGAU B-546) до 5 276 368 п.н. (KubGAU B-933), что примерно совпадает с ожидаемым размером генома-референса из базы данных NCBI – 5 498 578 п. н. (номер в GenBank – GCA_000008865.2). Содержание G + C у всех образцов приблизительно одинаковое – варьирует от 50,0 до 50,5 %. Число контигов наибольшее у KubGAU B-923 – 1 113, наименьшее – у KubGAU B-546 (326). Число последовательностей, кодирующих белок (CDSs), примерно в одинаковом диапазоне у всех образцов – от 5 087 (KubGAU B-546) до 5 704 (KubGAU B-533). Число рПНК варьирует от 84 (KubGAU B-533) до 97 (KubGAU B-923). Интересно, что для штамма KubGAU B-546 было выявлено наименьшее количество кодирующих последовательностей и меньший размер генома, в то время как его расчетное покрытие было самым высоким.

Таблица 1

Наличие регистрируемых маркеров токсигенности у патогенных кишечных палочек, выделенных от телят и поросят

Генетический маркер токсигенности	Выделено всего токсигенных эшерихий / %	Из числа изолятов, выделенных от поросят / %	Из числа изолятов, выделенных от телят / %
LT	33 / 48,5	20 / 29,4	13 / 19,1
ST-I, ST-II	4 / 5,8	2 / 2,9	2 / 2,9
Stx2	16 / 23,6	12 / 17,7	4 / 5,9
Stx1, 2	3 / 4,4	–	3 / 4,4
LT, ST-II	2 / 2,9	2 / 2,9	–
LT, Stx1, 2	6 / 8,9	1 / 1,5	5 / 7,4
LT, ST-I, Stx2	3 / 4,4	2 / 2,9	1 / 1,5
LT, ST-I, ST-II, Stx2	1 / 1,5	1 / 1,5	–
Всего	68/100	40/58,8	28/41,2

Table 1

The presence of detectable toxigenic markers in pathogenic *E. coli* isolated from calves and piglets

A genetic marker of toxigenicity	A total of toxigenic <i>E. coli</i> has been isolated / %	From the number of isolates isolated from piglets / %	From the number of isolates isolated from calves / %
LT	33 / 48.5	20 / 29.4	13 / 19.1
ST-I, ST-II	4 / 5.8	2 / 2.9	2 / 2.9
Stx2	16 / 23.6	12 / 17.7	4 / 5.9
Stx1, 2	3 / 4.4	–	3 / 4.4
LT, ST-II	2 / 2.9	2 / 2.9	–
LT, Stx1, 2	6 / 8.9	1 / 1.5	5 / 7.4
LT, ST-I, Stx2	3 / 4.4	2 / 2.9	1 / 1.5
LT, ST-I, ST-II, Stx2	1 / 1.5	1 / 1.5	–
Total	68/100	40/58.8	28/41.2

Таблица 2

Данные, полученные после сборки и аннотации геномов *E. coli*

Характеристика / номер образца	Изоляты кишечной палочки, подвергнувшиеся полногеномному секвенированию			
	KubGAU B-533	KubGAU B-546	KubGAU B-923	KubGAU B-933
Число прочтений	211 196	811 581	192 647	235 624
Размер генома	5 274 955	5 109 654	5 271 013	5 276 368
Содержание G + C (%)	50,5	50,5	50,0	50,0
Контиги N50	15 686	89 082	21 611	29 504
Контиги L50	102	18	77	50
Число контигов	1 006	326	1 113	740
Число последовательностей, кодирующих белок (CDSs)	5 704	5 087	5 696	5 510
Число рРНК	84	90	97	86
Число тРНК	67	71	78	70

Table 2

Data obtained after the assembly and annotation of *E. coli* genomes

Characteristic / sample number	<i>E. coli</i> isolates that have undergone genome-wide sequencing			
	KubGAU B-533	KubGAU B-546	KubGAU B-923	KubGAU B-933
Number of reads	211 196	811 581	192 647	235 624
Genome size	5 274 955	5 109 654	5 271 013	5 276 368
Content of G + C (%)	50,5	50,5	50,0	50,0
Contigs N50	15 686	89 082	21 611	29 504
Contigs L50	102	18	77	50
Number of contigs	1 006	326	1 113	740
CDSs	5 704	5 087	5 696	5 510
rRNAs	84	90	97	86
tRNAs	67	71	78	70

Таблица 3

Внутривидовое разнообразие генов, кодирующих продукцию различных видов экзотоксинов у патогенных эшерихий

Биология и биотехнологии

Вид экзотоксина	Название гена	Изоляты кишечной палочки, подвергнувшиеся полногеномному секвенированию			
		KubGAU B-533	KubGAU B-546	KubGAU B-923	KubGAU B-933
Термолабильный токсин, субъединица В	<i>eltB</i>	+	+	–	–
Термолабильный токсин, субъединица А	<i>eltA</i>	+	+	–	–
Термостабильный токсин ST-II	<i>stb</i>	+	+	–	–
Шигаподобный токсин (Stx) Stx2e, субъединица А Stx2e, субъединица В	<i>stx2eA</i>	–	–	+	+
Цикломодулины субъединица, связывающая токсин семейства субтилаз AB5	<i>subAB</i>	–	–	+	+
Порообразующий бактериоцин колицин E1	<i>cea</i>	+	–	–	–
Порообразующий бактериоцин колицин В	<i>cba</i>	–	+	–	–
Белок, вырабатывающий колицин V	<i>cvpA</i>	+	+	+	+
Токсин RTX гемолизин HlyA	<i>hlyA</i>	–	+	+	+
Гемолизин HlyE	<i>hlyE</i>	+	+	+	+

Table 3

Intraspecific diversity of genes encoding the production of various types of exotoxins in pathogenic *E. coli*

Type of exotoxin	The name of the gene	<i>E. coli</i> isolates that have undergone genome-wide sequencing			
		KubGAU B-533	KubGAU B-546	KubGAU B-923	KubGAU B-933
Heat-labile enterotoxin LT subunit B	<i>eltB</i>	+	+	–	–
Heat-labile enterotoxin LT subunit A	<i>eltA</i>	+	+	–	–
Heat-stable enterotoxin ST-II	<i>stb</i>	+	+	–	–
Shiga toxin (Stx) Stx2e, subunit A Stx2e, subunit B	<i>stx2eA</i>	–	–	+	+
Cyclomodulins A subunit binding a toxin of the subtilase family AB5	<i>subAB</i>	–	–	+	+
Pore-forming bacteriocin colicin E1	<i>cea</i>	+	–	–	–
Pore-forming bacteriocin colicin B	<i>cba</i>	–	+	–	–
Colicin V	<i>cvpA</i>	+	+	+	+
Toxin RTX hemolysin HlyA	<i>hlyA</i>	–	+	+	+
Hemolysin HlyE	<i>hlyE</i>	+	+	+	+

Проекты геномов по результатам секвенирования были депонированы в базу данных NCBI.

Результаты аннотации прокариотических геномов показали наличие в геномах бактерий последовательностей, кодирующих продуцирование следующих токсинов: KubGAU B-923 и KubGAU B-933 – шига-токсин Stx2e видов А и В, KubGAU B-533 и KubGAU B-546 – термолабильный энтеротоксин LT видов А и В, термостабильный энтеротоксин ST-II. Сравнение данных, полученных после аннотации PGAP, с результатами ПЦР-анализа показало, что только 3 из 5 аминокислотных последовательностей и кодирующих ДНК-последовательностей были выявлены. Такие результаты могут являться последствием наличия изменений в геноме, затронувших значимую часть гена, в то время как места присоединения праймеров остались неизменными.

При анализе результатов полногеномного секвенирования изучаемых изолятов *E. coli* было установлено, что наряду с общеизвестными маркерами токсигенности в виде LT, ST и Stx токсинов они обладали генами цикломодулинов (субтилазный токсин) и пороформирующих токсинов: колицинов, α-гемолизина и гемолизина E (таблица 3).

Так, изолят KubGAU B-533, помимо нуклеотидных последовательностей, отвечающих за выработку LT и ST-II, имел гены порообразующего бактериоцина колицина E1, белка, вырабатывающего колицин V и гемолизина E. Изолят KubGAU B-546 обладал схожими генетическими токсигенными свойствами с предыдущим изолятом, за исключением отсутствия гена, кодирующего колицин E1, и наличия токсина RTX α-гемолизина.

В свою очередь, изоляты KubGAU B-923 и KubGAU B-933 были идентичны по генетическому набору экзотоксинов, несмотря на то что были выделены из разных биологических моделей (поросенок и теленок соответственно). Эти штаммы обладали генами, отвечающими за выработку токсина Stx2e, субтилазного токсина AB5, колицина V, токсина RTX α -гемолизина и гемолизина E.

В результате секвенирования и сборки геномов были получены проекты геномов с размерами 5 274 955 (KubGAU B-533), 5 109 654 (KubGAU B-546), 5 271 013 (KubGAU B-923), 5 276 368 п. н. (KubGAU B-933). Образцы были депонированы в базу данных NCBI под общим номером BioProject PRJNA887444 [18]. Также каждый штамм бактерий был зарегистрирован под индивидуальными номерами: *E. coli* KubGAU B-533 – под номерами: BioSample – SAMN31169425, GenBank – ASM2566039v1, Sequence Read Archive (SRA) – SRS15925162; *E. coli* KubGAU B-546 – под номерами: BioSample – SAMN31181481, GenBank – ASM2581757v1, SRA – SRS15925163; *E. coli* KubGAU B-923: BioSample – SAMN31181488, GenBank – ASM2581758v1, SRA – SRS15925164; *E. coli* KubGAU B-933: BioSample – SAMN31185483, GenBank – ASM2567444v1, SRA – SRS15925165.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Токсигенные свойства диареогенных кишечных палочек являются одним из важнейших факторов патогенности эшерихий и активно изучаются. Среди экзотоксинов *E. coli* наиболее изученными являются термолабильный и термостабильный токсины, термостабильный токсин I энтероадгезивной кишечной палочки, шигаподобный токсин, цикломодулины (колибактин, цитонекротический фактор, цитолетальный и субтилазный токсины) и пороформирующие токсины (колицины, гемолизин E и α -гемолизин) [1; 5; 9; 19–24].

Некоторые экзотоксины, помимо токсического воздействия на организм, участвуют в адгезии и инвазии клетки, вызывают воспалительные реакции и апоптоз клеток [5; 8].

Значение LT, ST и Stx экзотоксинов в патогенезе эшерихиоза телят и поросят подтверждается многочисленными исследованиями зарубежных и отечественных авторов. Гены, кодирующие LT (*eltAB*), посредством плазмиды могут передаваться непатогенным *E. coli*, превращая их в патогенные [8]. Рядом исследований было установлено, что, помимо основного своего свойства – нарушения внутриклеточного обмена натрия и хлора, ведущих к развитию водянистой диареи, LT улучшает первоначальную бактериальную адгезию и последующую колонизацию слизистой оболочки кишечника, а также проявляет адьювантную активность в отношении различных бактериальных, вирусных и грибных антигенов [20].

Считается, что ST является одним из главных секреторных экзотоксинов *E. coli*, вызывающих диарею, как у человека, так и у животных [11]. Под действием токсина ST-II наблюдается снижение всасывающей способности слизистой оболочки кишечника по причине гибели поглощающих клеток и уменьшения высоты их ворсинок [4; 10]. Также было установлено, что при одновременном присутствии LT и ST происходит увеличение поступления воды в просвет кишечника сверх уровней, наблюдаемых под воздействием только одного из токсинов.

Семейство шигаподобных токсинов включает два типа белков: Stx1 и Stx2, при этом Stx1 имеет 3 подтипа (a, c, d), а Stx2 – 9 подтипов (a, b, c, d, e, f, g, h, i), определяющиеся нуклеотидными различиями, биологической активностью и серологической неоднородностью [2]. При этом от крупного рогатого скота и свиней чаще всего выделяются штаммы *E. coli*, продуцирующие Stx1c, Stx1d, Stx2d, Stx2e, Stx2f [12].

Помимо диареогенных свойств, LT, ST и Stx влияют на факторы врожденного иммунитета [4; 10]. Выработка цитокинов и хемокинов эукариотическими клетками под действием Stx способствует повреждению тканей толстой кишки, развитию осложнений в виде гемолитико-уремического синдрома, поражению центральной нервной системы, повреждению тканей в различных органах [2].

В наших исследованиях по результатам ПЦР-анализа было выявлено наличие генов, отвечающих за синтез всех четырех групп токсинов у изолятов эшерихий KubGAU B-533, KubGAU B-546, KubGAU B-923, KubGAU B-933 – термолабильного токсина LT, термостабильных токсинов ST-I и ST-II, шига-токсинов Stx1 и Stx2. В случае с образцом бактерий KubGAU B-533 были проявлены ДНК-маркеры только на наличие последовательностей, отвечающих за продуцирование токсинов LT и ST-II, а также шига-токсинов типа Stx1 и Stx2. Исследования, подтверждающие, что от одного животного могут быть выделены изоляты кишечной палочки, обладающие сразу несколькими генами токсинов, отражают в своих работах и другие авторы [1; 9; 10].

В свою очередь, аннотация генома при помощи NCBI PGAP показала наличие последовательностей в последовательностях ДНК, отвечающих за продуцирование токсинов: KubGAU B-923 и KubGAU B-933 – шига-токсин Stx2e видов A и B, KubGAU B-533 и KubGAU B-546 – термолабильный энтеротоксин LT видов A и B, термостабильный энтеротоксин ST-II.

Кроме того, полногеномное секвенирование показало, что выявленные на сегодняшний день диареогенные патотипы *E. coli* не являются статическими, вполне вероятно, они пребывают в стадии динамического и продолжающегося смешивания генов вирулентности, а следовательно, появления новых патогенных вариантов бактерии [1; 5]. Этот

довод согласуется с проведенными нами исследованиями, установившими генетическое разнообразие изучаемых штаммов эшерихий, с наличием в их геноме цикломодулинов и ряда пороформирующих экзотоксинов, играющих важную роль в патогенезе эшерихиоза.

Так, субтилаза АВ, или субтилазный токсин (SubAB), представляет собой токсин типа АВ5, который вырабатывается шигатоксинпродуцирующей *E.coli*. До сих пор неизвестно, действуют ли Stx и SubAB в синергизме или они противостоят друг другу. Эффекты SubAB были изучены на мышах, при этом было установлено, что он вызывает повреждение микрососудов, тромбоз и некроз в мозге и печени. Кроме того, у мышей выявляли микроангиопатическую гемолитическую анемию, тромбоцитопению и нарушение функции почек, характерные для гемолитико-уремического синдрома у людей [2; 9; 12].

Порообразующие токсины (Pore-Forming Toxins; PFT) – это белки-мономеры, представляющие собой растворимые в воде молекулы, которые олигомеризуются на поверхности клетки-хозяина после связывания со специфическим рецептором (сахаром, липидом или белком). У патогенных *E. coli* было выявлено три вида порообразующих токсинов – колицины (E1, B), гемолизин А (HlyA, α -гемолизин, RTX-токсин) и гемолизин Е [19; 22–24].

Колицины являются типичными α -PFT и обычно представляют собой крупные белки с высокой молекулярной массой (40–80 кДа) [22]. В настоящее время идентифицировано 25 различных представителей колицина, среди которых только колицины E1, A, B, N, Ia, Ib, K, S, 10 являются порообразующими и используются своими продуцентами для избирательного уничтожения других бактерий в микробном сообществе путем формирования отверстий в их внутренних мембранах. Наиболее изученными пороформирующими колицинами являются колицины E1, A, B, N и Ia. Колицины вырабатываются штаммами *E. coli*, которые содержат одну колициногенную плазмиду pCol. Такие штаммы широко распространены в природе и особенно многочисленны в кишечнике животных [21].

Гемолизин А (HlyA, RTX) принадлежит к классу α -PFT и входит в семейство RTX-токсинов. Продукт гена *hlyA* представляет собой белок, являющийся предшественником зрелого гемолизина

А. М. Schwidder с соавторами [24] приводят сведения о распространении гена *hlyA* у различных изолятов *E. coli*. Как оказалось, частота регистрации *hlyA*-позитивных *E. coli* среди клинических изолятов, выделенных от человека и продуктивных животных, а также пищевых продуктов колеблется в диапазоне от 12 до 96 %. При введения HlyA в кровяное русло сосудов брыжейки лабораторным животным у них отмечались временное повышение артериального давления, падение кислорода, повышение уровня гемоглобина, а в слизистой оболочке кишечника наблюдались отек и разрушение [19].

Гемолизин Е является представителем семейства цитолизина А класса α -PFT, вызывает гемолиз эритроцитов и влияет на передачу сигналов Ca^{2+} у эпителиальных клеток кишечника. Установлено, что полноценным геном гемолизина Е обладают до 80 % *E. coli* и присутствует он только у патогенных штаммов, проявляя цитотоксическую активность, опосредуя апоптоз макрофагов и способствуя бактериальной инвазии [24].

Ряд исследований подтверждает, что эшерихии, которые способны одновременно продуцировать более одного токсина, повышают вирулентность возбудителя и будут влиять на патогенез и клиническое проявление болезни [1; 3; 5; 8; 9].

Таким образом, в ходе анализа генетических профилей изолятов *E. coli*, выделенных от телят и поросят с диареей, было обнаружено, что наиболее распространенные гены вирулентности относятся к термолабильному энтеротоксину (48,5 %) и шигаподобному токсину II типа (23,6 %). Четыре штамма эшерихий демонстрировали высокое генетическое разнообразие, обладая генами термолабильного токсина, термостабильного токсина ST-I, ST-II и шигаподобных токсинов 2. При изучении профилей генов вирулентности этих изолятов с использованием методов полногеномного секвенирования было установлено, что их патогенный потенциал также связан с наличием нуклеотидных детерминант субтилазного токсина АВ5, колицина B, E1, V, токсина RTX α -гемолизина и гемолизина Е, что демонстрирует их высокое генетическое разнообразие. Полученные результаты позволяют их предлагать в качестве перспективных кандидатных штаммов для производства иммунобиологических препаратов с целью профилактики энтеротоксигенного эшерихиоза у телят и поросят.

Библиографический список

1. Fleckenstein J. M., Kuhlmann F. M. Enterotoxigenic Escherichia coli Infections // Current Infectious Disease Reports. 2020. No. 21 (3). Article number 9. DOI: 10.1007/s11908-019-0665-x.
2. Lee M. S, Tesh V. L. Roles of Shiga Toxins in Immunopathology // Toxins. 2019. No. 11 (4). Article number 212. DOI: 10.3390/toxins11040212.
3. Carlini F., Maroccia Z., Fiorentini C., Travaglione S., Fabbri A. Effects of the Escherichia coli Bacterial Toxin Cytotoxic Necrotizing Factor 1 on Different Human and Animal Cells: A Systematic Review // International Journal of Molecular Sciences. 2021. No. 22. Article number 12610. DOI: 10.3390/ijms22212610.

4. Zegeye E. D., Govasli M. L., Sommerfelt H., Puntervoll P. Development of an enterotoxigenic *Escherichia coli* vaccine based on the heat-stable toxin // *Human Vaccines & Immunotherapeutics*. 2019. No. 15 (6). Pp. 1379–1388. DOI: 10.1080/21645515.2018.1496768.
5. Тищенко А. С. Степаненко А. В., Терехов В. И. Экзотоксины патогенных *Escherichia coli* // *Ветеринария Кубани*. 2020. № 5. С. 3–7. DOI: 10.33861/2071-8020-2020-5-3-7.
6. Кощаев А. Г., Черных О. Ю., Тищенко А. С. [и др.] Распространенность острых кишечных инфекций телят и поросят в Краснодарском крае // *Ветеринария, зоотехния и биотехнология*. 2023. № 10. С. 65–75. DOI: 10.36871/vet.zoo.bio.202310008.
7. Medrano-Galarza C., LeBlanc S. J., Jones-Bitton A., et al. Associations between management practices and within-pen prevalence of calf diarrhea and respiratory disease on dairy farms using automated milk feeders // *Journal of Dairy Science*. 2018. No. 101 (3). Pp. 2293–2308. DOI: 10.3168/jds.2017-13733.
8. Dubreuil J. D. EAST1 toxin: An enigmatic molecule associated with sporadic episodes of diarrhea in humans and animals // *Journal of Microbiology*. 2019. No. 57 (7). Pp. 541–549. DOI: 10.1007/s12275-019-8651-4.
9. Pakbin B., Brück W. M., Rossen J. W. A. Virulence Factors of Enteric Pathogenic *Escherichia coli*: A Review // *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. No. 22 (18). Article number 9922. DOI: 10.3390/ijms22189922.
10. Wang H., Zhong Z., Luo Yu, Cox E., Devriendt B. Heat-Stable Enterotoxins of Enterotoxigenic *Escherichia coli* and Their Impact on Host Immunity // *Toxins*. 2019. No. 11 (1). Article number 24. DOI: 10.3390/toxins11010024.
11. Govasli M. L., Diaz Y., Zegeye E. D., Darbakk C. et al. Purification and Characterization of Native and Vaccine Candidate Mutant Enterotoxigenic *Escherichia coli* Heat-Stable Toxins // *Toxins*. 2018. No. 10 (7). Article number 274. DOI: 10.3390/toxins10070274.
12. Menge C. Molecular Biology of *Escherichia coli* Shiga Toxins Effects on Mammalian Cells // *Toxins*. 2020. No. 12 (5). Article number 345. DOI: 10.3390/toxins12050345.
13. Feuerstein A., Scuda N., Klose C., Hoffmann A., Melchner A., Boll K., Riehm J. M. Antimicrobial Resistance, Serologic and Molecular Characterization of *E. coli* Isolated from Calves with Severe or Fatal Enteritis in Bavaria, Germany // *Antibiotics*. 2021. Vol. 11. No. 1. Article number 23. DOI: 10.3390/antibiotics11010023.
14. Prjibelski A., Antipov D., Meleshko D., Lapidus A., Korobeynikov A. Using SPAdes de novo assembler // *Current Protocols in Bioinformatics*. 2020. No. 70 (1). Article number 102. DOI: 10.1002/cpbi.102.
15. Rose R., Golosova O., Sukhomlinov D., Tiunov A., Prospero M. Flexible design of multiple metagenomics classification pipelines with UGENE // *Bioinformatics*. 2019. No. 35 (11). Pp. 1963–1965. DOI: 10.1093/bioinformatics/bty901.
16. Mikheenko A., Prjibelski A., Saveliev V., Antipov D., Gurevich A. Versatile genome assembly evaluation with QUAST-LG // *Bioinformatics*. 2018. No. 34 (13). Pp. i142–i150. DOI: 10.1093/bioinformatics/bty266.
17. Li W., O'Neill K. R., Haft D. H., et al. RefSeq: expanding the Prokaryotic Genome Annotation Pipeline reach with protein family model curation // *Nucleic Acids Research*. 2021. No. 49 (1). Pp. 1020–1028. DOI: 10.1093/nar/gkaa1105.
18. *Escherichia coli* strain:533 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/bioproject/PRJ-NA887444> (дата обращения: 26.01.2024).
19. Frey J. RTX Toxins of Animal Pathogens and Their Role as Antigens in Vaccines and Diagnostics // *Toxins*. 2019. No. 11. Article number 719. DOI: 10.3390/toxins11120719.
20. Duan Q., Xia P., Nandre R., Zhang W., Zhu G. Review of Newly Identified Functions Associated With the Heat-Labile Toxin of Enterotoxigenic *Escherichia coli* // *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2019. No. 9. Article number 292. DOI: 10.3389/fcimb.2019.00292.
21. Li Ya., Li Yu., Mengist H. M., et al. Structural Basis of the Pore-Forming Toxin/Membrane Interaction // *Toxins*. 2021. No. 13. Article number 128. DOI: 10.3390/toxins13020128.
22. Cameron A., Zaheer R., Adator E. H., Barbieri R. Bacteriocin Occurrence and Activity in *Escherichia coli* Isolated from Bovines and Wastewater // *Toxins*. 2019. No. 11. Article number 475. DOI: 10.3390/toxins11080475.
23. Murase K. Cytolysin A (ClyA): A Bacterial Virulence Factor with Potential Applications in Nanopore Technology, Vaccine Development, and Tumor Therapy // *Toxins*. 2022. No. 14 (2). Article number 78. DOI: 10.3390/toxins14020078.
24. Schwidder M., Heinisch L. and Schmidt H. Genetics, Toxicity, and Distribution of Enterohemorrhagic *Escherichia coli* Hemolysin // *Toxins*. 2019. No. 11. Article number 502. DOI: 10.3390/toxins11090502.

Об авторах:

Александр Сергеевич Тищенко, кандидат ветеринарных наук, заведующий лабораторией микробиологии центра биотехнологий, доцент кафедры микробиологии, эпизоотологии и вирусологии факультета

ветеринарной медицины, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар, Россия; ORCID 0000-0003-0942-120X, AuthorID 785293. *E-mail: tishhenko.a@edu.kubsau.ru*

Андрей Георгиевич Коцаев, доктор биологических наук, профессор, проректор по научной работе, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар, Россия; ORCID 0000-0002-2629-2334, AuthorID 138537. *E-mail: koshhaev.a@kubsau.ru*

Александр Валериевич Милованов, кандидат биологических наук, ведущий специалист отдела науки и инноваций, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар, Россия; ORCID 0000-0002-6312-1147, AuthorID 694432. *E-mail: milovanov1991@mail.ru*

Анастасия Васильевна Елисютикова, лаборант лаборатории молекулярно-генетических исследований растений и животных, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар, Россия; ORCID 0009-0008-8941-1506, AuthorID 1207475. *E-mail: nas-elisyutikova@yandex.ru*

Владимир Иванович Терехов, доктор биологических наук, профессор, Пашковский сельскохозяйственный колледж, Краснодар, Россия; ORCID 0000-0003-0392-9133, AuthorID 192043. *E-mail: vtterekhov@list.ru*

Татьяна Вячеславовна Мальшева, кандидат медицинских наук, доцент кафедры микробиологии, Кубанский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, Краснодар, Россия; ORCID 0000-0003-1354-4317, AuthorID 1012472. *E-mail: mvn-46@mail.ru*

References

1. Fleckenstein J. M., Kuhlmann F. M. Enterotoxigenic Escherichia coli Infections. *Current Infectious Disease Reports*. 2020; 21 (3): 9. DOI: 10.1007/s11908-019-0665-x.
2. Lee M. S, Tesh V. L. Roles of Shiga Toxins in Immunopathology. *Toxins*. 2019; 11 (4): 212. DOI: 10.3390/toxins11040212.
3. Carlini F., Maroccia Z., Fiorentini C., Travaglione S., Fabbri A. Effects of the Escherichia coli Bacterial Toxin Cytotoxic Necrotizing Factor 1 on Different Human and Animal Cells: A Systematic Review. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021; 22: 12610. DOI: 10.3390/ijms222212610.
4. Zegeye E. D., Govasli M. L., Sommerfelt H., Puntervoll P. Development of an enterotoxigenic Escherichia coli vaccine based on the heat-stable toxin. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*. 2019; 15 (6): 1379–1388. DOI: 10.1080/21645515.2018.1496768.
5. Tishchenko A. S. Stepanenko A. V., Terekhov V. I. Exotoxins of pathogenic Escherichia coli. *Veterinaria Kubani*. 2020; 5: 3–7. DOI: 10.33861/2071-8020-2020-5-3-7. (In Russ.)
6. Koshchaev A. G., Chernykh O. Yu., Tishchenko A. S., et al. Prevalence of acute intestinal infections in calves and pigs in the Krasnodar region. *Veterinary, Zootechnics and Biotechnology*. 2023; 10: 65–75. DOI: 10.36871/vet.zoo.bio.202310008. (In Russ.)
7. Medrano-Galarza C., LeBlanc S. J., Jones-Bitton A. Associations between management practices and within-pen prevalence of calf diarrhea and respiratory disease on dairy farms using automated milk feeders. *Journal of Dairy Science*. 2018; 101 (3): 2293–2308. DOI: 10.3168/jds.2017-13733.
8. Dubreuil J. D. EAST1 toxin: An enigmatic molecule associated with sporadic episodes of diarrhea in humans and animals. *Journal of Microbiology*. 2019; 57 (7): 541–549. DOI: 10.1007/s12275-019-8651-4.
9. Pakbin B., Brück W. M., Rossen J. W. A. Virulence Factors of Enteric Pathogenic Escherichia coli: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021; 22 (18): 9922. DOI: 10.3390/ijms22189922.
10. Wang H., Zhong Z., Luo Yu, Cox E., Devriendt B. Heat-Stable Enterotoxins of Enterotoxigenic Escherichia coli and Their Impact on Host Immunity. *Toxins*. 2019; 11 (1): 24. DOI: 10.3390/toxins11010024.
11. Govasli M. L., Diaz Y., Zegeye E. D., Darbakk C. et al. Purification and Characterization of Native and Vaccine Candidate Mutant Enterotoxigenic Escherichia coli Heat-Stable Toxins. *Toxins*. 2018; 10 (7): 274. DOI: 10.3390/toxins10070274.
12. Menge C. Molecular Biology of Escherichia coli Shiga Toxins Effects on Mammalian Cells. *Toxins*. 2020; 12 (5): 345. DOI: 10.3390/toxins12050345.
13. Feuerstein A., Scuda N., Klose C., Hoffmann A., Melchner A., Boll K., Riehm J. M. Antimicrobial Resistance, Serologic and Molecular Characterization of E. coli Isolated from Calves with Severe or Fatal Enteritis in Bavaria, Germany. *Antibiotics*. 2021; 11 (1): 23. DOI: 10.3390/antibiotics11010023.
14. Prjibelski A., Antipov D., Meleshko D., Lapidus A., Korobeynikov A. Using SPAdes de novo assembler. *Current Protocols in Bioinformatics*. 2020; 70 (1): 102. DOI: 10.1002/cpbi.102.
15. Rose R., Golosova O., Sukhomlinov D., Tiunov A., Prospero M. Flexible design of multiple metagenomics classification pipelines with UGENE. *Bioinformatics*. 2019; 35 (11): 1963–1965. DOI: 10.1093/bioinformatics/bty901.
16. Mikheenko A., Prjibelski A., Saveliev V., Antipov D., Gurevich A. Versatile genome assembly evaluation with QUAST-LG. *Bioinformatics*. 2018; 34 (13): i142–i150. DOI: 10.1093/bioinformatics/bty266.

17. Li W., O'Neill K. R., Haft D. H., et al. RefSeq: expanding the Prokaryotic Genome Annotation Pipeline reach with protein family model curation. *Nucleic Acids Research*. 2021; 49 (1): 1020–1028. DOI: 10.1093/nar/gkaa1105.
18. Escherichia coli strain:533 [Internet] [cited 2024 Jan 26]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/bioproject/PRJNA887444>.
19. Frey J. RTX Toxins of Animal Pathogens and Their Role as Antigens in Vaccines and Diagnostics. *Toxins*. 2019; 11: 719. DOI: 10.3390/toxins11120719.
20. Duan Q., Xia P., Nandre R., Zhang W., Zhu G. Review of Newly Identified Functions Associated With the Heat-Labile Toxin of Enterotoxigenic Escherichia coli. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2019; 9: 292. DOI: 10.3389/fcimb.2019.00292.
21. Li Ya., Li Yu., Mengist H. M., et al. Structural Basis of the Pore-Forming Toxin/Membrane Interaction. *Toxins*. 2021; 13: 128. DOI: 10.3390/toxins13020128.
22. Cameron A., Zaheer R., Adator E. H., Barbieri R. Bacteriocin Occurrence and Activity in Escherichia coli Isolated from Bovines and Wastewater. *Toxins*. 2019; 11: 475. DOI: 10.3390/toxins11080475.
23. Murase K. Cytolysin A (ClyA): A Bacterial Virulence Factor with Potential Applications in Nanopore Technology, Vaccine Development, and Tumor Therapy. *Toxins*. 2022; 14 (2): 78. DOI: 10.3390/toxins14020078.
24. Schwidder M., Heinisch L. and Schmidt H. Genetics, Toxicity, and Distribution of Enterohemorrhagic Escherichia coli Hemolysin. *Toxins*. 2019; 11: 502. DOI: 10.3390/toxins11090502.

Authors' information:

Aleksandr S. Tishchenko, candidate of veterinary sciences, head of microbiology laboratory of biotechnology center, associate professor of the department of microbiology, epizootology and virology, faculty of veterinary medicine, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russia;

ORCID 0000-0003-0942-120X, AuthorID 785293. *E-mail: tishhenko.a@edu.kubsau.ru*

Andrey G. Koshchaev, doctor of biological sciences, professor, vice-rector for research, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russia; ORCID 0000-0002-2629-2334, AuthorID 138537.

E-mail: koshhaev.a@kubsau.ru

Aleksandr V. Milovanov, candidate of biological sciences, leading specialist of the department of science and innovation, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russia;

ORCID 0000-0002-6312-1147, AuthorID 694432. *E-mail: milovanov1991@mail.ru*

Anastasiya V. Elisyutikova, laboratory assistant of laboratory of molecular genetic research of plants and animals, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russia;

ORCID 0009-0008-8941-1506, AuthorID 1207475. *E-mail: nas-elisyutikova@yandex.ru*

Vladimir I. Terekhov, doctor of biological sciences, professor, Pashkovsky Agricultural College, Krasnodar, Russia; ORCID 0000-0003-0392-9133, AuthorID 192043. *E-mail: vterekhov@list.ru*

Tatyana V. Malysheva, candidate of medical sciences, associate professor of the department of microbiology, Kuban State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Krasnodar, Russia;

ORCID 0000-0003-1354-4317, AuthorID 1012472. *E-mail: mvn-46@mail.ru*

Идентификация гапблоков, потенциально ассоциированных с эмбриональной смертностью крупного рогатого скота черно-пестрого корня

О. А. Шевкунов[✉], О. В. Костюнина, О. А. Быкова, А. А. Зырянова

Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

[✉]E-mail: Xoshyn@gmail.com

Аннотация. В современных реалиях в управлении большим поголовьем проблема воспроизводства крупного рогатого скота становится на одно из главенствующих мест. Долговременное стремление селекционеров во всех странах мира на увеличение показателей молочной продуктивности у молочного скота привела к деградации их репродуктивной способности. Сервис-период увеличился больше чем на 40 дней, индекс осеменения увеличился почти в 2 раза, межотельный период стал больше года на 3 месяца. Благодаря интенсивной селекции, направленной на производства молока, и снижению репродуктивной способности корова не каждый год приносит теленка, а процент стельных животных после первого осеменения резко снизился до 30 %. По степени потерь воспроизводительной функции у коров на первом месте стоит эмбриональная смертность, за счет которой происходит до 70 % потерь стельности в первые 45 дней после плодотворного осеменения. Ускорение темпов селекционного прогресса требует использования в животноводстве геномной селекции, что даст возможность провести анализ полногеномных ассоциаций (GWAS) с показателями продуктивного долголетия и фертильности коров и установить геномные регионы, подверженные наибольшему селекционному давлению для показателей продуктивного долголетия и репродуктивной функции молочного скота. **Цель работы** – идентификация гаплотипов, ответственных за репродуктивную функцию крупного рогатого скота. **Методы исследований.** Исследования проводились на голштинской породе крупного рогатого скота. Идентификация гомозиготных гаплотипов выполнялась при помощи пакета GMap в программном обеспечении R. **Научная новизна** работы заключается в выявлении гомозиготных гаплотипов, ответственных за раннюю эмбриональную смертность и влияющих на фертильность в популяции коров голштинской породы Уральского региона. **Результаты.** В ходе обработки полученных данных были выявлены хромосомы с гапблоками, которые могут отвечать за раннюю эмбриональную смертность и влиять на фертильность крупного рогатого скота.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, гомозиготный гаплотип, эмбриональная смертность, воспроизводительная способность

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-76-10021.

Для цитирования: Шевкунов О. А., Костюнина О. В., Быкова О. А., Зырянова А. А. Идентификация гапблоков, потенциально ассоциированных с эмбриональной смертностью крупного рогатого скота черно-пестрого корня // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 08. С. 1082–1092. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1082-1092>.

Дата поступления статьи: 14.05.2024, **дата рецензирования:** 11.06.2024, **дата принятия:** 15.06.2024.

Identification of haploblocks potentially associated with embryonic mortality in Black-and-White cattle

O. A. Shevkunov[✉], O. V. Kostyunina, O. A. Bykova, A. A. Zyryanova

Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia

[✉]E-mail: Xoshyn@gmail.com

Abstract. In modern realities, the problem of cattle reproduction is becoming one of the most important issues in managing a large herd. The long-term desire of breeders in all countries of the world to increase milk productivity in dairy cattle has led to the degradation of their reproductive capacity. The service period has increased by more than 40 days, the insemination index has increased almost 2 times, the intercalving period has become 3 months longer than a year. Due to intensive selection aimed at milk production and a decrease in reproductive capacity, a cow does not give birth to a calf every year, and the percentage of pregnant animals after the first insemination has sharply decreased to 30 %. In terms of the degree of loss of reproductive function in cows, embryonic mortality ranks first, due to which up to 70 % of pregnancy losses occur in the first 45 days after fruitful insemination. Accelerating the pace of breeding progress requires the use of genomic selection in animal husbandry, which will make it possible to conduct genome-wide association studies (GWAS) with indicators of productive longevity and fertility of cows and to identify genomic regions subject to the greatest selection pressure for indicators of productive longevity and reproductive function of dairy cattle. **Purpose of the work:** Identification of haplotypes responsible for reproductive function of cattle. **Research methods.** The studies were conducted on the Holstein breed of cattle. Identification of homozygous haplotypes was carried out using the GHap package in R software. **The scientific novelty of the work** lies in the identification of homozygous haplotypes responsible for early embryonic mortality and affecting fertility in a population of Holstein cows of the Ural type. **Results.** During the processing of the data obtained, chromosomes with haploblocks were identified, which may be responsible for early embryonic mortality and affecting the fertility of cattle.

Keywords: cattle, homozygous haplotype, embryonic mortality, reproductive ability

Acknowledgements. The research was supported by Russian Science Foundation, project No. 22-76-10021.

For citation: Shevkunov O. A., Kostyunina O. V., Bykova O. A., Zyryanova A. A. Identification of haploblocks potentially associated with embryonic mortality in Black-and-White cattle. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (08): 1082–1092. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1082-1092>. (In Russ.)

Date of paper submission: 14.05.2024, **date of review:** 11.06.2024, **date of acceptance:** 15.06.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

Решение проблемы снижения воспроизводительных способностей крупного рогатого скота, поиск и интерпретация генетических механизмов, ответственных за фертильность сельскохозяйственных животных и нахождение ответов на проявление летальных исходов в сельском хозяйстве, имеет большое значение для отрасли животноводства. Сканирование участков ДНК с помощью биочипов различной плотности предоставляет возможность идентифицировать участки генома мутации, которые могут быть сопряжены с проблемами репродуктивной функции у животных, такими как нарушения развития, генетические аномалии и эмбриональная смертность [1–3].

Изучение генома крупного рогатого скота отвечает задачам развития отрасли животноводства и решения проблем в рамках продовольственной безопасности Российской Федерации. Улучшение показателей в отрасли скотоводства, таких как

продуктивность и репродуктивная функция, стоит на первом месте, что повышает интерес ученых к генетическим исследованиям. Селекционная стратегия крупного рогатого скота молочного направления продуктивности предусматривает улучшение продуктивных качеств производства молока, оставляя без внимания снижение воспроизводительных качеств коров, что способствовало удлинению сервис-периода и снижению репродуктивной способности в целом. Генетический фактор является одной из распространенных причин такого существенного спада, поскольку мутации могут приводить к эмбриональной смертности и летальности на разных этапах развития животного – от эмбриона до новорожденного теленка. Проявление мутаций оказывает большое влияние на экономическую составляющую любого хозяйства – от незначительных проблем увеличения нагрузки на ветеринарных сотрудников до выбраковки животных. Стоит упомянуть, что чаще всего мутации с негативным

воздействием на репродуктивную функцию сельскохозяйственных животных характеризуются плейотропным эффектом, а значит, имеют положительную корреляцию с продуктивными качествами. Совершенствование генетического потенциала коров позволит улучшить уровень воспроизводительных способностей и резко снизить частоту возникновения мутаций, что сократит экономические потери хозяйств. Повышение приоритетов в изучении генома молочного крупного рогатого скота происходит по всему миру и одной из наиболее важных проблем является получение здорового молодняка. Генетические характеристики коров черно-пестрого корня, разводимых в Уральском регионе, остаются малоизученными, вместе с тем статистически фиксируемое по данному субъекту Российской Федерации снижение показателя выхода телят позволяет характеризовать обозначенную проблему как социально значимую. Полногеномные исследования, выполняемые на молочных коровах, преследуют своей целью идентификацию мутаций и геномных регионов, ассоциированных с фертильностью крупного рогатого скота, а также являющихся причинными для генетических дефектов в отечественных стадах, что характеризуется актуальностью и значимостью [4–9].

Раньше снижение репродуктивных качеств связывали с послеродовыми проблемами клинического характера, а также с развитием метаболического стресса, обусловленного лактацией. В настоящее время считается, что по меньшей мере половина такого снижения обусловлена генетическими факторами [10].

Поиск причин, влияющих на репродуктивную функцию коров, послужил толчком к идентификации гомозиготных регионов, мутации в которых зачастую являются летальными, что позволило определить летальные гаплотипы, связанные с рецессивными расстройствами репродуктивных и продуктивных признаков. Определение их локализации позволило разработать тесты для скрининга поголовья. Полногеномные исследования, направленные на оценку биоразнообразия внутри и между породами, позволили определить неравновесное сцепление генов, что вносит большой вклад в понимание природы сложных сетей связей между генами, гаплотипами и формированием фенотипических признаков [11].

Повышение уровня развития селекции, изучение молекулярно-генетических методов отбора и применение результатов исследований на практике позволили обратить вспять курс на снижение репродуктивных качеств крупного рогатого скота и оценить эффективность геномной селекции. Для понимания генетической архитектуры признаков фертильности был выполнен ряд полногеномных ассоциативных исследований (GWAS) для поиска

локусов количественных признаков (QTL) и генов-кандидатов, мутации в которых могут быть ассоциированы с фертильностью молочного скота [12–14].

Развитие полногеномных методов анализа способствовало выявлению ряда гаплотипов, фиксируемых с довольно высокой частотой встречаемости, ассоциированных со снижением воспроизводительной способности коров, получивших название гаплотипов фертильности. В голштинской породе идентифицировано 22 гаплотипа фертильности, связанных со стельностью, для некоторых из них причинные мутации еще не определены.

Существенный сдвиг, произошедший в последние годы в маркировании признаков репродукции молочного скота, был связан с разработкой и внедрением геномной селекции. Также заметной практической эффективностью характеризуется скрининг поголовья по известным гаплотипам с целью идентификации скрытых носителей генетических дефектов. В целом включение обнаруживаемых ассоциаций SNP с показателями воспроизводства в геномную оценку является одним из перспективных направлений работы с геномом крупного рогатого скота [15–23].

С учетом актуальности данной темы нами было выполнено исследование, направленное на идентификацию гомозиготных гапоблоков, потенциально ассоциированных с эмбриональной смертностью крупного рогатого скота черно-пестрого корня Уральского региона.

Методология и методы исследования (Methods)

В процессе выполнения исследований сформирована экспериментальная выборка лактирующих коров голштинской породы. Для отбора использовали племенное поголовье коров АО «Каменское» Свердловской области разного возраста ($n = 431$, с 1-й по 3-ю лактацию). От животных экспериментальной выборки осуществляли отбор крови из яремной вены в вакуумные пробирки, содержащие консервант К2-ЭДТА, в объеме не менее 5 мл.

Полногеномное генотипирование поголовья крупного рогатого скота Уральского типа чернопестрой породы проводили в центре геномной селекции компании ООО «Мираторг-генетика» с использованием чипа Illumina Bovine SNP50V3 средней плотности в соответствии с протоколом производителя в образцах ДНК с концентрацией не менее 20 нг/мкл и соотношением A230/260 1.8–2.0. Выделение ДНК осуществлялось с помощью автоматической роботизированной станции. Для каждого образца проводили измерение концентрации и чистоты. Гарантия показателей: концентрация – не ниже 50 нг/мкл; чистота (A260/280) – не ниже 1,7; выход – не менее 2 мкг. Анализ данных генотипирования проводили в программе GenomeStudio v. 2.0. По окончании анализа формировали финал-репорт, содержащий сведения о генотипах более чем по 50

000 SNP. Осуществляли редактирование данных биочипов для построения файлов адаптированного расширения (.ped, .map, .fam, .bed, .bim). Контроль качества выполняли в программном пакете Plink 1.9 по параметрам качества генотипирования (выше 90 %), частоты минорных аллелей (не более 0,5 %), неравновесного сцепления генов (с шагом 50 кб), ошибок по Менделю (не более 1 %). Контроль качества генотипирования составил 0,98–0,99. Для повышения точности генотипирования SNP при проверке качества использовались показатели GenCall (GC) и GenTrain (GT). Для определения действительных генотипов для каждого SNP применяли баллы GC и GT с пороговым значением 0,5. Для проведения предварительных GWAS-исследований использовали пакет Gpart v.3. Проводили анализ воспроизводительных качеств коров с различными аллельными вариантами полиморфизмов, показавших наибольшую значимость при GWAS-исследовании. Обработку полученных в эксперименте данных проводили в программах Microsoft Excel, Biostatistics при расчете основных статистических и биометрических показателей. Этапы фазирования и статистической оценки гаплотипов были выполнены с использованием программного обеспечения SHAPEIT2. Пакет GMap в программном обеспечении R использовался для идентификации гапблоков из фазированных данных SNP и для расчета его наблюдаемой и ожидаемой гомозиготности. Гапблоку были сгенерированы путем сканирования окна 500 кб и скользящего шага каждые 100 кб. Значимость была рассчитана на основе отклонения наблюдаемых частот гапблоков от ожидаемых. Физические области гапблоков, проходящих порог Р-значения, были аннотированы в отношении функций генов с использованием референсного генома Bos Taurus UMD 3.1.1 в NCBI. [17, 20, 23].

Результаты (Results)

При выполнении исследований было обнаружено 65 гапблоков в экспериментальной выборке животных. Анализ отобранных участков хромосом позволил выявить более 200 генов, локализованных в пределах гапблоков. Данные гены выполняют функции, которые могут влиять на жизненно важные процессы в организме животных.

Исследования показали, что наибольшее количество генов располагалось на 7-й, 8-й, 18-й, 22-й, 23-й хромосомах. Предполагаем, это связано с большей вовлеченностью данных участков генома в метаболические процессы организма коров (таблицы 1, 2).

Гапблоку на четвертой хромосоме содержат гены регуляции обмена веществ внутриклеточных образований, которые повышают резистентность организма к внешним и внутренним угрозам.

На пятой и шестой хромосомах гапблоку включают гены, влияющие на такие заболевания, как агнозия, омодисплазия, координация внутренних часов организма, дефекты строения кожи и глухота.

Седьмая и восемнадцатая хромосомы на момент исследования не содержали генов, которые, возможно, отвечали за фертильность и эмбриональную смертность крупного рогатого скота.

На восьмой хромосоме в рамках исследуемых гапблоков обнаружился ген, ответственный за формирование беременности и развитие плода. Это результат влияния групп генов на синтез и формирование интерферона.

Гены в гапблоках на одиннадцатой хромосоме отвечают за формирование гуаниновых нуклеотидов и протеинкиназных киназ, участвуют в фосфорилировании белков, регуляции цитозольной концентрации ионов кальция.

Шестнадцатая хромосома включала в себя гапблоку, кодирующую специфичную для последовательности активность связывания двухцепочечной ДНК, белок гидролизующий тиоэфир КоА пальмитоил-КоА, интегральный мембранный белок, который принадлежит к суперсемейству родопсинов класса А рецепторов, связанных с G-белком, ДНК-связывающих белков хромодомен-хеликазы, и белок, участвующий в развитии и функционировании почечных канальцев.

Двадцать вторая и двадцать третья хромосомы представлены большим количеством генов, ответственных за развитие клеточных мембран и их резистентность к внешним патогенам. Много генов внутри блоков отвечают за синтез белков, входящих в основные метаболические процессы клетки.

Блоки на двадцать четвертой хромосоме отвечают за активность ДНК-связывающего транскрипционного фактора, активность связывания цисрегуляторной области транскрипции и активность якоря цитоскелетных белков и мембран.

В ходе отбора наиболее перспективных для изучения эмбриональной смертности и влияния на фертильность были выбраны гапблоку на хромосомах 8, 16, 22, 23 и 24.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

После проведения исследования и аннотации генов были отобраны гапблоку, которые могут отвечать за эмбриональную смертность и фертильность коров голштинской породы. Эти гапблоку находятся на 8-й, 16-й, 22-й, 23-й и 24-й хромосомах с шагом 500 кб.

На 8-й хромосоме гапблоку содержали следующие гены: *IFN*, *KLHL9*, *IFNAC*, *IFNB3*, *IFNB1*, *IL6*, *PTPLAD2*, *KIAA1797*, *MIR491*.

Гены группы *IFN* относятся к различным группам интерферонов, которые напрямую влияют на формирование беременности и развитие эмбриона и плода у коров.

Таблица 1

Расположение изучаемых гапблоков

Table 1

Location of the studied haploblocks

Биология и биотехнологии

CHR	BP1 (Mb)	BP2 (Mb)	Allele	N	FREQ	O.HOM	O.HET	E.HOM	RATIO	P-Value
8	22.8	23.3	AGAAAACCA	162	0.19	0	162	15.6	16.6	1,7
8	22.9	23.4	GAAAACCAAA	183	0.21	0	183	19.9	20.9	2,3
8	23	23.5	GAAAACCAAAGAA	181	0.21	0	181	19.5	20.4	3,5
8	23.1	23.6	GAAAACCAAAGAAAC	180	0.21	0	180	19.2	20.2	4,4
8	23.2	23.7	AACCAAAGAAACAAG	165	0.19	0	165	16.2	17.2	9,5
16	47.8	48.3	GGGGAAAAAG	162	0.19	0	162	15.5	16.5	1,8
16	47.9	48.4	GGGAAAAAGAA	161	0.19	0	161	15.3	16.3	2,2
16	48	48.5	AAAAAGAAAAAC	171	0.20	0	171	17.3	18.3	3,1
16	48.1	48.6	AAAGAAAACAA	172	0.20	0	172	17.5	18.5	2,5
16	48.2	48.7	AAGAAAACAAGAG	172	0.20	0	172	17.5	18.5	2,5
22	19.4	19.9	CTTGACACG	147	0.17	0	147	12.7	13.7	3,1
22	19.5	20	TTGACACGG	157	0.18	0	157	14.5	15.5	5,2
23	28.1	28.6	GGAGGAAAA	154	0.18	0	154	13.9	14.9	8,45
23	28.2	28.7	AGGAAAAAGA	154	0.18	0	154	13.9	14.9	8,45
23	28.3	28.8	GAAAAAGACG	154	0.18	0	154	13.9	14.9	8,45
23	28.4	28.9	AAAAGACG	154	0.18	0	154	13.9	14.9	8,45
23	28.5	29	AAAAGACGA	153	0.18	0	153	13.8	14.8	1
24	38.9	39.4	GAAGGGGAGAA	146	0.17	0	146	12.5	13.5	3,6
24	39.2	39.7	GAGAAAGGAG	148	0.17	0	148	12.9	13.9	2,5
24	39.3	39.8	AGAAAGGAG	151	0.17	0	151	13.4	14.4	1,5

Таблица 2

Список генов, локализованных в пределах хромосом

Table 2

List of genes located on haploblocks within a chromosome

Хромосома Chromosome	Гены Genes
8	LOC509166, LOC781948, IFN, KLHL9, LOC781732, LOC781778, LOC781815, LOC781853, IFNAC, LOC100298530, LOC100298573, LOC100335340, LOC100336573, LOC515953, LOC617135, LOC618859, LOC538620, LOC616463, LOC618985, LOC510726, LOC540442, LOC617112, LOC618943, LOC619092, LOC100299481, LOC783912, LOC523509, LOC616977, LOC784026, IFNB3, LOC100337470, LOC100300143, LOC100336340, LOC787343, IFNB1, LOC100337496, LOC100295404, LOC517108, LOC784525, LOC787588, IL6, LOC787664, LOC525550, PTPLAD2, KIAA1797, LOC100139990, MIR491
16	HES2, LOC782560, ACOT7, GPR153, HES3, LOC785548, RNF207, LOC616065, CHD5, KCNAB2, NPHP4,
22	OSBPL10, GPD1L, LOC100296399, CMTM8, CMTM7, LOC100298048, CMTM6, DYNC1L1, LOC514651, CNOT10, GRM7, LOC100299678, LOC782757, FRMD4B, LOC100140700, LMOD3, ARL6IP5, UBA3, TMF1, C22H3ORF64, FAM19A4, FAM19A1, LOC783001, SUCLG2, LOC100296442, KBTBD8, LOC100297257, LOC100140914, LOC100139569, LOC509580, ADAMTS9, LOC100299027,
23	FLOT1, TUBB2B, LOC100336520, NRM, MDC1, KIAA1949, DHX16, C23H6orf136, MGC165685, MRPS18B, PPP1R10, MIR2378, MIR877, PRR3, GNLI, RPP21, LOC516723, LOC787610, LOC512672, BOLA, BOLA-NC1, LOC614091, LOC100298822, LOC100125916, JSP.1, BOLA-N, LOC100295296, BOLA, LOC619014, LOC100337432, TRIM26, TRIM15, TRIM10, TRIM40, TRIM31, LOC504845, PPP1R11, ZNRD1, ZFP57, MOG, GABBR1, LOC786987, LOC786194, LOC517912, UBD, LOC506486, LOC538947, LOC528254, LOC100300211, LOC523768, LOC523769, LOC523389, LOC786846,
24	LOC781066, LOC615682, ZFP161, EPB41L3, TMEM200C

Ген *KLHL9* отвечает за активность убиквитин-протеинтрансферазы, также кодируемый им белок связывают с дистальной миопатией и немалиновой миопатией.

Интерлейкин-6 (*IL6*) недавно был идентифицирован как эмбриотрофический фактор у эмбрионов крупного рогатого скота, где он действует, главным образом опосредуя размер внутренней клеточной массы.

Ген *PTPLAD2 (HACD4)* катализирует третью из четырех реакций цикла удлинения длинноцепочечных жирных кислот. Этот ферментативный процесс, связанный с эндоплазматическим ретикуломом, позволяет добавить два атома углерода в цепь длинноцепочечных и очень длинноцепочечных жирных кислот (ЖКОДЦ) за цикл. Этот фермент катализирует дегидратацию промежуточного соединения 3-гидроксиацил-КоА в транс-2,3-еноил-КоА в каждом цикле удлинения жирной кислоты. Таким образом, он участвует в производстве ЖКОДЦ с различной длиной цепи, задействованных в качестве предшественников мембранных липидов и липидных медиаторов во многих биологических процессах.

Ген *KIAA1797 (Focad)* необходим для поддержания протеостатических уровней SKIC2 и SKIC3 в печени. Может быть вовлечен в регуляцию деградации РНК экзосомным комплексом.

Ген *MIR491* относится к микроРНК, представляющим собой короткие некодирующие РНК, участвующие в посттранскрипционной регуляции экспрессии генов в многоклеточных организмах, влияющие на стабильность и на трансляцию мРНК.

На 16-й хромосоме были найдены следующие гены: *HES2, ACOT7, GPR153, HES3, RNF207, CHD5, KCNAB2, NPHP4*.

HES2 отвечает за координацию фето-материнского взаимодействия в организме коров.

ACOT7 (ацил-КоА-тиоэстераза 7) представляет собой ген, кодирующий белок. Заболевания, связанные с *ACOT7*, включают височную эпилепсию и гиперинсулинемическую гипогликемию. Участвует в метаболизме жирных кислот.

HES3 принадлежит к семейству основных репрессоров транскрипции Hes «спираль – петля – спираль», которые играют центральную роль в поддержании клеток-предшественников и регуляции решений судьбы бинарных клеток в эмбрионе.

RNF207 играет роль в сердечном энергетическом метаболизме. Участвует в положительной регуляции активности калиевых каналов замедленного выпрямления, в позитивной регуляции экспрессии генов и позитивной регуляции активности потенциал-зависимых калиевых каналов, участвующих в реполяризации потенциала действия клеток сердечной мышцы желудочка.

Ген *CHD5* кодирует белок ремоделирования хроматина, который регулирует транскрипцию генов путем связывания с ДНК с помощью гистонов. Он участвует в сперматогенезе, регулируя гиперацетилирование гистонов и заменяя гистоны переходными белками в хроматине, что является важным этапом в сворачивании хроматина сперматозоидов и формировании функциональных сперматозоидов.

Ген *KCNAB2* – кодирующий белок. Потенциал-управляемые (Kv) калиевые каналы представляют собой наиболее сложный класс потенциал-управля-

емых ионных каналов как в функциональном, так и в структурном аспектах. Их различные функции включают регуляцию высвобождения нейромедиаторов, частоты сердечных сокращений, секреции инсулина, возбудимости нейронов, транспорта эпителиальных электролитов, сокращения гладких мышц и объема клеток.

Ген *NPHP4* участвует в организации апикальных соединений и в организации субапикальной актиновой сети в многоклеточных эпителиальных клетках. По-видимому, рекрутирует INT в базальные тела подвижных ресничек, которые впоследствии взаимодействуют с актин-модифицирующими белками.

На 22-й хромосоме расположен один ген, ассоциированный со здоровьем коров. *GRM7* – это L-глутамат, являющийся основным возбуждающим нейротрансмиттером в центральной нервной системе и активирующий как ионотропные, так и метаболитические рецепторы глутамата. Глутаматергическая нейротрансмиссия участвует в большинстве аспектов нормальной функции мозга и может нарушаться при многих невропатологических состояниях.

В определенных нами участках гаплоблоков на 23-й хромосоме были аннотированы следующие гены: *FLOT1, TUBB2B, NRM, MDC1, KIAA1949, DHX16, C23H6orf136, MGC165685, MRPS18B, PPP1R10, MIR2378, MIR877, PRR3, GNLI, RPP21, BOLA, BOLA-NC1, JSP.1, BOLA-N, TRIM26, TRIM15, TRIM10, TRIM40, TRIM31, PPP1R11, ZNRD1, ZFP57, MOG, GABBR1, UBD*.

Ген *FLOT1* кодирует белок, локализующийся в кавеолах, представляющих собой небольшие домены на внутренней клеточной мембране. Этот белок играет роль в переносе везикул и клеточной морфологии.

TUBB2B – тубулин является основным компонентом микротрубочек цилиндра, состоящего из латерально связанных линейных протофиламентов, состоящих, в свою очередь, из гетеродимеров альфа- и бета-тубулина. Играет решающую роль в правильном направлении аксонов как в центральных, так и в периферических аксоновых трактах. Участвует в миграции нейронов.

NRM – белок, кодируемый этим геном, содержит трансмембранные домены и находится во внутренней ядерной мембране, где он тесно связан с ядром.

MDC1 – белок, кодируемый этим геном, содержит N-концевой домен вилки, два C-концевых (BRCT) мотива *BRCA1* и центральный домен с 13 повторами последовательности примерно из 41 аминокислоты. Кодируемый белок необходим для активации контрольных точек клеточного цикла внутри S-фазы и G2/M-фазы в ответ на повреждение ДНК.

KIAA1949 – ген, кодирующий регуляторную субъединицу протеинфосфатазы 1 18, которая ме-

няет активность протеинфосфатазы 1 в отношении специфических субстратов и направляет фермент в разные клеточные местоположения.

DHX16 – бокс-белки DEAD, характеризующиеся консервативным мотивом Asp-Glu-Ala-Asp (DEAD), являются предполагаемыми РНК-хеликазами. Они принимают участие в таких клеточных процессах, как инициация трансляции, ядерный и митохондриальный сплайсинг, сборка рибосом и сплайсосом, задействованы в эмбриогенезе, сперматогенезе, росте и делении клеток.

Ген *C23Hborf136* кодирует белок, функции которого не охарактеризованы, но предполагается его участие в клеточной мембране.

MGC165685 способствует дестабилизации микротрубочек и ускоряет их динамику; эта активность может быть независимой от активности ацетилирования. Необходим для нормальной функции жгутиков сперматозоидов. Способствует направленной клеточной локомоции и хемотаксису посредством AP2A2-зависимого ацетилирования альфа-тубулина в покрытых клатрином ямках, которые концентрируются на переднем крае мигрирующих клеток.

Ген *PPP1R10* кодирует белок, связывающий протеинфосфатазу 1, регулирующий активность протеинфосфатазы 1 и играющий важную роль в различных клеточных процессах, таких как апоптоз, репарация ДНК, ход клеточного цикла.

MIR2378, *MIR877* представляют собой короткие (20–24 нт) некодирующие РНК, участвующие в посттранскрипционной регуляции экспрессии генов в многоклеточных организмах.

Ген *PRR3* обеспечивает активность связывания РНК и отвечает за первичную гипероксалурию.

GNLI – ген, кодирующий белок, идентифицированный в области I класса главного комплекса гистосовместимости человека. Заболевания, связанные с *GNLI*, включают множественные доброкачественные окружные складки кожи на конечностях и синдром Гольдберга – Шпринтцена.

RPP21 представляет собой ген, ответственный за активность рибонуклеазы Р. С геном *RPP21* связано такое заболевание, как анауксетическая дисплазия.

BOLA, *BOLA-NC1*, *BOLA-N* – эти гены действуют как фактор сборки митохондриального железо-серного кластера (Fe-S), облегчающий вставку кластера (Fe-S) в подмножество митохондриальных белков. Заболевания, связанные с *BOLA*, включают синдром множественной митохондриальной дисфункции 2 с гиперглициемией и баланопостит.

Ген *JSP.1* кодирует белок, который является частью мембраны.

TRIM26 – белок, кодируемый этим геном, является членом семейства трехчастных мотивов (TRIM). Мотив TRIM включает три цинксвязывающих до-

мена: RING, В-бок типа 1 и В-бок типа 2, а также область спиральной спирали. Белок локализуется в цитоплазматических тельцах. Хотя функция белка неизвестна, домен RING предполагает, что белок может обладать ДНК-связывающей активностью. Заболеванием, связанным с *TRIM26*, является простой герпес.

TRIM15 – белок, кодируемый этим геном, является членом семейства трехчастных мотивов (TRIM). Мотив TRIM включает три цинксвязывающих домена: RING, В-бок типа 1 и В-бок типа 2, а также область спиральной спирали. Белок локализуется в цитоплазме. С геном *TRIM15* связано такое заболевание, как веноокклюзионная болезнь печени с иммунодефицитом.

TRIM10 – белок, кодируемый этим геном, является членом семейства трехчастных мотивов (TRIM). Мотив TRIM включает три цинксвязывающих домена: RING, В-бок типа 1 и В-бок типа 2, а также область спиральной спирали. Этот белок локализуется в цитоплазматических тельцах. Исследования на мышах показывают, что он играет роль в терминальной дифференцировке эритроидных клеток

Ген *TRIM40* кодирует член семейства белков трехчастного мотива (TRIM). Кодируемый белок может играть роль негативного регулятора воспаления и канцерогенеза в желудочно-кишечном тракте.

Ген *TRIM31* кодирует белок, который функционирует как убиквитин-белковая лигаза E3. Он демонстрирует измененную экспрессию в некоторых опухолях и может быть негативным регулятором роста клеток. Заболеванием, связанным с *TRIM31*, является болезнь мойя-мойя.

Ген *PPP1R11* кодирует специфический ингибитор протеинфосфатазы-1 (PP1) с различной чувствительностью к металлозависимой и независимой формам PP1.

Ген *ZNRD1* кодирует субъединицу ДНК-направленной РНК-полимеразы I. Кодируемый белок содержит два потенциальных цинксвязывающих мотива и может играть роль в регуляции пролиферации клеток. Кодируемый белок может участвовать в развитии рака и вируса иммунодефицита человека.

ZFP57 кодирует белок «цинковых пальцев», содержащий домен KRAB, действующий как репрессор транскрипции. Мутации в гене *ZFP57* ассоциированы с транзиторным неонатальным сахарным диабетом I типа.

MOG – продукт этого гена представляет собой мембранный белок, экспрессируемый на поверхности клеток олигодендроцитов и на внешней поверхности миелиновых оболочек. Благодаря такой локализации он является основным антигеном-мишенью, участвующим в иммуноопосредованной демиелинизации. Этот белок может участвовать в

формировании и поддержании миелиновой оболочки, а также в межклеточной коммуникации.

GABBR1 кодирует рецептор гамма-аминомасляной кислоты (ГАМК), являющейся основным тормозным нейромедиатором в центральной нервной системе млекопитающих. Он функционирует как гетеродимер с рецептором ГАМК(B) 2. Дефекты этого гена могут лежать в основе заболеваний головного мозга, таких как шизофрения и эпилепсия. Заболевания, связанные с *GABBR1*, включают расстройства нервного развития с задержкой речи и различными когнитивными нарушениями, а также аутосомно-доминантную несиндромальную умственную отсталость.

Ген *UBD* кодирует белок, который содержит два убиквитиноподобных домена и, по-видимому, имеет функцию, аналогичную убиквитину. Посредством ковалентного присоединения кодируемый белок нацеливается на другие белки для деградации 26S протеасомы. Этот белок задействован в широком спектре клеточных процессов, таких как образование агрегатов, каспазозависимый апоптоз, митотическая регуляция и созревание дендритных клеток.

Гаплоглоки на 24-й хромосоме содержат всего три гена: *ZFP161*, *EPB41L3*, *TMEM200C*.

Ген *ZFP161* обеспечивает активность ДНК-связывающего транскрипционного фактора и активность связывания цис-регуляторной области транскрипции. Участвует в негативной регуляции транскрипции. Заболевания, связанные с

ZFP161, включают голопрозэнцефалию и тератому взрослых.

EPB41L3 – предполагается, что этот ген обеспечит активность якоря цитоскелетных белков и мембран, является структурным компонентом цитоскелета и участвует в нескольких процессах, включая развитие нервной системы, обслуживание паранодального соединения, и локализация белка в паранодальной области аксона. Расположен в межклеточных соединениях и плазматической мембране. Биомаркер менингиомы. Заболеванием, связанным с *EPB41L3*, является доброкачественная менингиома.

TMEM200C – ген белка, который является частью мембраны.

Исследования показали, что многие гены на данном этапе развития нашей работы не имеют полностью доказанного влияния на репродуктивные функции коров голштинской породы. Дальнейшее изучение гаплоглоков покажет их значимость в селекции крупного рогатого скота.

Поиск и отбор генов, которые могут быть ассоциированы с ранней эмбриональной смертностью и фертильностью крупного рогатого скота, – одна из важнейших задач генетиков и селекционеров в условиях динамично меняющегося мира. Повышение выхода телят и получение здорового молодняка крупного рогатого скота является первостепенной целью при создании конкурентноспособного поголовья для обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации.

Библиографический список

1. Гетманцева Л. В., Шевцова В. С., Колосова М. А., Романенкова О. С., Костюнина О. В. Исследование гаплотипов фертильности у голштинских коров голландского происхождения в условиях ростовской области // Главный зоотехник. 2020. № 4. С. 36–40. DOI: 10.33920/sel-03-2004-05.
2. Форнара М. С., Костюнина О. В., Филипченко А. А., Сермягин А. А., Зиновьева Н. А. Система определения полиморфизма *SUGT1*, ассоциированного с гаплотипом фертильности симментальского скота FH4 // Ветеринария, зоотехния и биотехнология. 2019. № 3. С. 92–97. DOI: 10.26155/vet.zoo.bio.201903015.
3. Исупова Ю. В., Ачкасова Е. В. Перспективы использования оценки геномной племенной ценности в селекции молочного скота в условиях Удмуртской Республики // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 4 (90). С. 307–311.
4. Нарышкина Е. Н., Сермягин А. А. Оценка генетической и геномной вариабельности признаков фертильности быков-производителей на основе локусов в геноме, ассоциированных с давлением отбора (обзор) // Достижения науки и техники АПК. 2020. № 9. С. 64–72. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10912
5. Романенкова О. С., Волкова В. В., Костюнина О. В., Зиновьева Н. А. Исследование Российской популяции голштинского и голштинизированного черно-пестрого купного рогатого скота на наличие мутации в гене *TFB1M*, ассоциированного с гаплотипом HH5 // Биотехнология в растениеводстве, животноводстве и сельскохозяйственной микробиологии: сборник тезисов докладов 19-й Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной памяти академика РАСХН Георгия Сергеевича Муромцева. Москва, 2019. С. 119–120.
6. Кузнецова М. К., Кислякова Е. М., Исупова Ю. В. Достоверность учёта данных как один из способов повышения точности при оценке племенной ценности // Аграрная Россия. 2022. № 1. С. 27–30. DOI: 10.30906/1999-5636-2022-1-27-30.
7. Лукьянов А. А., Тюлебаев С. Д., Косилов В. И. Использование возможностей геномной оценки крупного рогатого скота в РФ // Актуальные проблемы ветеринарной медицины и зоотехнии: сборник материалов Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной

80-летию доктора сельскохозяйственных наук, профессора кафедры ветеринарно-санитарной экспертизы и фармакологии ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ Ляпина Олега Абдулхаковича. Оренбург, 2022. С. 132–137.

8. Абдельманова А. С., Сермягин А. А., Доцев А. В., Родионов А. Н., Столповский Ю. А., Зиновьева Н. А. Полногеномные исследования структуры популяций российских локальных пород черно-пестрого корня // Генетика. 2022. Т. 58, № 7. С. 786–797. DOI: 10.31857/S0016675822070025.

9. Ганиев А. С., Сибатуллин Ф. С., Шайдуллин Р. Р., Фаизов Т. Х. Сервис-период и молочная продуктивность коров с разными генотипами CSN3 и DGAT1 // Ученые записки КГАВМ им. Н. Э. Баумана. 2018. № 2. С. 67–72.

10. Иванова И. П., Троценко И. В. Применение селекционно-генетических параметров в племенной работе с молочным скотом // Вестник КрасГАУ. 2019. № 3 (144). С. 65–70.

11. Яковлев А. Ф. Вклад гаплотипов в формирование племенных и воспроизводительных качеств животных (обзор) // Проблемы биологии продуктивных животных. 2019. № 2. С. 5–18. DOI: 10.25687/1996-6733.

12. Недашковский И. С., Контэ А. Ф., Сермягин А. А. Параметры генетической взаимосвязи по STR- и SNP-маркерам недостатков экстерьера дочерей голштинских быков-производителей с уровнем гомозиготности и геномного инбридинга отцов // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38, № 2. С. 46–52.

13. Лешонок О. И., Ткаченко И. В., Севостьянов М. Ю. Особенности экстерьера и продолжительность хозяйственного использования потомков голштинских быков-производителей в Свердловской области // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38, № 1. С. 52–56.

14. Модоров М. В., Файрушина К. Р., Клещева А. А. Воспроизводство племенного голштинизированного черно-пестрого скота в Свердловской области // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36, № 8. С. 67–71.

15. Guarini A. R., Lourenco D. A. L., Brito L. F., Sargolzaei M., Baes C. F., Miglior F., Misztal I., Schenkel F. S. Genetics and genomics of reproductive disorders in Canadian Holstein cattle // Journal of Dairy Science. 2019. No. 102, Iss. 2. Pp. 1341–1353. DOI: 10.3168/jds.2018-15038.

16. Garcia A. O., Otto P. I., Glatzl Junior L. A., Rocha R. F. B., Dos Santos M. G., de Oliveira D. A., da Silva M. V. G. B., Panetto J. C. D. C., Machado M. A., Verneque R. D. S., Guimarães S. E. F. Pedigree reconstruction and population structure using SNP markers in Gir cattle // Journal of Applied Genetics. 2023. Vol. 64. Pp. 329–340. DOI: 10.1007/s13353-023-00747-x.

17. Ma L., Cole J. B., Da Y., VanRaden P. M. Genetics, genome-wide association study, and genetic improvement of dairy fertility traits // Journal of Dairy Science. 2019. Vol. 102, Iss. 4. Pp. 3735–3743. DOI: 10.3168/jds.2018-15269.

18. Huang M., Liu X., Zhou Y., Summers R. M., Zhang Z. BLINK: a package for the next level of genome-wide association studies with both individuals and markers in the millions // Gigascience. 2019. Vol. 8, No. 2. Article number g154. DOI: 10.1093/gigascience/giy154.

19. Pausch H., Schwarzenbacher H., Burgstaller J., Flisikowski K., Wurmser K., Jansen S., Jung S., Schnicke A., Wittek T., Rudy K. Homozygous haplotype deficiency reveals deleterious mutations compromising reproductive and rearing success in cattle // BMC Genomics. 2015. No. 16. Article number 312. DOI: 10.1186/S12864-015-1483-7.

20. Wang J., Zhou Z., Zhang Z., Li H., Liu D., Zhang Q., Bradbury P. J., Buckler E. S., Zhang Z. Expanding the BLUP alphabet for genomic prediction adaptable to the genetic architectures of complex traits // Heredity. 2018. Vol. 121. Pp. 648–662. DOI: 10.1038/s41437-018-0075-0.

21. Sahana G., Nielsen U. S., Aamand G. P., Lund M. S., Guldbrandtsen B. Novel Harmful Recessive Haplotypes Identified for Fertility Traits in Nordic Holstein Cattle // PLoS ONE. 2013. Vol. 8, Iss. 12. Article number 82909. DOI: 10.1371/journal.pone.0082909.

22. Sugimoto M., Gotoh Y., Kawahara T., Sugimoto Y. Molecular Effects of Polymorphism in the 3'UTR of Unc5 homolog C Associated with Conception Rate in Holsteins // PLoS ONE. 2015. Vol. 10, Iss. 7. Article number 0131283. DOI: 10.1371/journal.pone.0131283.

23. VanRaden M., Olson K. M., Null D. J., Hutchison J. L. Harmful recessive effects on fertility detected by absence of homozygous haplotypes // Journal of Dairy Science. 2011. Vol. 94, Iss. 12. Pp. 6153–6161. DOI: 10.3168/JDS.2011-4624.

Об авторах:

Олег Александрович Шевкунов, специалист по работе с РИНЦ, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0003-2975-0633, AuthorID 956848.

E-mail: Xoshyn@gmail.com

Ольга Васильевна Костюнина, доктор биологических наук, профессор кафедры биотехнологии и пищевых продуктов, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0001-8206-3221, AuthorID 147325. *E-mail: kostolan@yandex.ru*

Ольга Александровна Быкова, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры биотехнологии и пищевых продуктов, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-0753-1539, AuthorID 663503. *E-mail: olbyk75@mail.ru*

Анастасия Андреевна Зырянова, аспирант кафедры биотехнологии и пищевых продуктов, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия; ORCID 0009-0008-1435-8210, AuthorID 1123090. *E-mail: agata.lis.00@mail.ru*

References

1. Getmantseva L. V., Shevtsova V. S., Kolosova M. A., Romanenkova O. S., Kostyunina O. V. An investigation of fertility haplotypes in Holstein cows of Dutch origin under environments of the Rostov region. *Head of Animal Breeding*. 2020; 4: 36–40. DOI: 10.33920/sel-03-2004-05. (In Russ.)
2. Fornara M. S., Kostyunina O. V., Filipchenko A. A., Sermyagin A. A., Zinov'eva N. A. System for determining SUGT1 polymorphism associated with fertility of simutal cattle FH4 happtotype. *Veterinary, Zootechnics and Biotechnology*. 2019; 3: 92–97. DOI: 10.26155/vet.zoo.bio.201903015. (In Russ.)
3. Isupova Yu. V., Achkasova E. V. Prospects for the use of assessment of genomic breeding value in the selection of dairy cattle in the conditions of the Udmurt Republic. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021; 4 (90): 307–311. (In Russ.)
4. Naryshkina E. N., Sermyagin A. A. Assessment of genetic and genomic variability of fertility traits in stud bulls based on loci associated with selection pressure (review) *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2020; 9: 64–72. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10912. (In Russ.)
5. Romanenkova O. S., Volkova V. V., Kostyunina O. V., Zinov'eva N. A. Study of the Russian population of Holstein and Holsteinized black-and-white cattle for the presence of a mutation in the TFB1M gene associated with the HH5 haplotype. *Biotechnology in crop production, livestock production and agricultural microbiology: a collection of abstracts of the 19th All-Russian Conference of Young Scientists, dedicated to the memory of Academician of the Russian Academy of Sciences Georgy Sergeevich Muromtsev*. Moscow, 2019. Pp. 119–120. (In Russ.)
6. Kuznetsova M. K., Kislyakova E. M., Isupova Yu. V. Reliability of data accounting as one of the ways to increase accuracy in assessing breeding value *Agrarian Russia*. 2022; 1: 27–30. DOI: 10.30906/1999-5636-2022-1-27-30. (In Russ.)
7. Luk'yanov A. A., Tyulebaev S. D., Kosilov V. I. Using the possibilities of genomic assessment of cattle in the Russian Federation. *Current problems of veterinary medicine and animal science: a collection of materials from the National Scientific and Practical Conference with international participation, dedicated to the 80th anniversary of Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Veterinary and Sanitary Expertise and Pharmacology Orenburg GAU Lyapina Olega Abdulkhakovicha*. Orenburg, 2022. Pp. 132–137. (In Russ.)
8. Abdel'manova A. S., Sermyagin A. A., Dotsev A. V., Rodionov A. N., Stolpovskiy Yu. A., Zinov'eva N. A. Genome-Wide Studies of the Population Structure of Russian Local Black-and-White Root Breed. *Russian Journal of Genetics*. 2022; 58 (7): 786–797. DOI: 10.31857/S0016675822070025. (In Russ.)
9. Ganiev A. S., Sibagatullin F. S., Shaydullin R. R., Faizov T. Kh. Service period and milk productivity of cows of different genotypes CSN3 and DGAT1. *Academic Notes of Kazan State Academy of Veterinary Medicine named after N. E. Bauman*. 2018; 2: 67–72. (In Russ.)
10. Ivanova I. P., Trotsenko I. V. The application of selection and genetic parameters in breeding work with dairy cattle. *Bulletin of KrasSAU*. 2019; 144 (3): 65–70. (In Russ.)
11. Yakovlev A. F. Contribution of haplotypes in the formation of breeding and reproductive traits of animals. *Problems of Productive Animal Biology*. 2019; 2: 5–18. DOI: 10.25687/1996-6733. (In Russ.)
12. Nedashkovskiy I. S., Konte A. F., Sermyagin A. A. Parameters of genetic correlation by STR and SNP markers of defects in the exterior of daughters of holstein sires with the level of homozygosity and genomic inbreeding of fathers. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2024; 38 (2): 46–52. (In Russ.)
13. Leshonok O. I., Tkachenko I. V., Sevostyanov M. Yu. Features of the exterior and duration of economic use of the descendants of holstein bulls in the Sverdlovsk region. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2024; 38 (1): 52–56. (In Russ.)
14. Modorov M. V., Fairushina K. R., Kleshcheva A. A., Tkachenko I. V., Leshonok O. I., Sevostyanov M. Yu. Reproduction of breeding holsteinized black-and-white cattle of the Sverdlovsk region. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2022; 36 (8): 67–71. (In Russ.)

15. Guarini A. R., Lourenco D. A. L., Brito L. F., Sargolzaei M., Baes C. F., Miglior F., Misztal I., Schenkel F. S. Genetics and genomics of reproductive disorders in Canadian Holstein cattle. *Journal of Dairy Science*. 2019; 102 (2): 1341–1353. DOI: 10.3168/jds.2018-15038.
16. Garcia A. O., Otto P. I., Glatzl Junior L. A., Rocha R. F. B., Dos Santos M. G., de Oliveira D. A., da Silva M. V. G. B., Panetto J. C. D. C., Machado M. A., Verneque R. D. S., Guimarães S. E. F. Pedigree reconstruction and population structure using SNP markers in Gir cattle. *Journal of Applied Genetics*. 2023; 64: 329–340. DOI: 10.1007/s13353-023-00747-x.
17. Ma L., Cole J. B., Da Y., VanRaden P. M. Genetics, genome-wide association study, and genetic improvement of dairy fertility traits. *Journal of Dairy Science*. 2019; 102 (4): 3735–3743. DOI: 10.3168/jds.2018-15269.
18. Huang M., Liu X., Zhou Y., Summers R. M., Zhang Z. BLINK: a package for the next level of genome-wide association studies with both individuals and markers in the millions. *GigaScience*. 2019; 8 (2): giy154. DOI: 10.1093/gigascience/giy154.
19. Pausch H., Schwarzenbacher H., Burgstaller J., Flisikowski K., Wurmser K., Jansen S., Jung S., Schnicke A., Wittek T., Rudy K. Homozygous haplotype deficiency reveals deleterious mutations compromising reproductive and rearing success in cattle. *BMC Genomics*. 2015; 16: 312. DOI: 10.1186/S12864-015-1483-7.
20. Wang J., Zhou Z., Zhang Z., Li H., Liu D., Zhang Q., Bradbury P. J., Buckler E. S., Zhang Z. Expanding the BLUP alphabet for genomic prediction adaptable to the genetic architectures of complex traits. *Heredity*. 2018; 121: 648–662. DOI: 10.1038/s41437-018-0075-0.
21. Sahana G., Nielsen U. S., Aamand G. P., Lund M. S., Guldbandsen B. Novel Harmful Recessive Haplotypes Identified for Fertility Traits in Nordic Holstein Cattle. *PLoS ONE*. 2013; 8 (12): 82909. DOI: 10.1371/journal.pone.0082909.
22. Sugimoto M., Gotoh Y., Kawahara T., Sugimoto Y. Molecular Effects of Polymorphism in the 3'UTR of Unc5 homolog C Associated with Conception Rate in Holsteins. *PLoS ONE*. 2015; 10 (7): 0131283. DOI: 10.1371/journal.pone.0131283.
23. VanRaden M., Olson K. M., Null D. J., Hutchison J. L. Harmful recessive effects on fertility detected by absence of homozygous haplotypes. *Journal of Dairy Science*. 2011; 94 (12): 6153–6161. DOI: 10.3168/JDS.2011-4624.

Authors' information:

Oleg A. Shevkunov, RSCI specialist, Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0003-2975-0633, AuthorID 956848. *E-mail: Xoshyn@gmail.com*

Olga V. Kostyunina, doctor of biological sciences, professor of the department of biotechnology and food products, Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0001-8206-3221, AuthorID 147325. *E-mail: kostolan@yandex.ru*

Olga A. Bykova, doctor of agricultural sciences, professor of the department of biotechnology and food products, Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0002-0753-1539, AuthorID 663503. *E-mail: olbyk75@mail.ru*

Anastasiya A. Zyryanova, graduate student of the department of biotechnology and food products, Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0009-0008-1435-8210, AuthorID 1123090. *E-mail: agata.lis.00@mail.ru*

Прогнозирование агропродовольственных экономических систем с использованием искусственных нейронных сетей

А. А. Дубовицкий[✉], Э. А. Климентова

Мичуринский государственный аграрный университет, Мичуринск, Россия

[✉]E-mail: daa1-408@yandex.ru

Аннотация. Цель – обоснование применимости использования искусственных нейронных сетей к прогнозированию агропродовольственных экономических систем. **Методы.** Исследование основано на использовании элементов интерпретативного метода в сочетании генетического, структурного, функционального, комплексного, системного и эмпирического подходов. **Научная новизна** заключается в систематизации алгоритмов реализации искусственных нейронных сетей и обосновании их применимости для прогнозирования агропродовольственных экономических систем, разработке алгоритма и архитектуры построения нейронной сети на основе множественных данных о рынках сельскохозяйственной продукции, обосновании направлений совершенствования информационной инфраструктуры на уровне фирмы. **Результаты.** Авторами систематизированы интуитивные и формализованные методы прогнозирования, обосновано в этой системе место методов, построенных на машинном обучении. Подробно рассмотрены преимущества и недостатки использования искусственных нейронных сетей для прогнозирования агропродовольственных экономических систем, обоснована целесообразность их использования с точки зрения соответствия принципам прогнозирования. Анализ основных видов искусственных нейронных сетей позволил сделать вывод, что наиболее перспективными для реализации задач прогнозирования являются рекуррентные нейронные сети с алгоритмом обратного распространения (LSTM и GRU). Сформулированы основные цели построения моделей на основе нейронных сетей для использования в прогнозировании экономических систем, разработаны базовые положения последовательности и методики развертывания нейронных сетей в процессе прогнозирования на агропродовольственном рынке, ключевые элементы организации процесса прогнозирования в отдельных экономических субъектах, рассмотрены практические аспекты возможности использования математического алгоритма для моделирования агропродовольственных систем, а также условия совершенствования информационной инфраструктуры на уровне фирмы в целях обеспечения доступности источников данных, и технологий их обработки.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, нейронные сети, сельское хозяйство, агропродовольственный рынок, прогнозирование, методология, методы

Благодарности. Авторы выражают благодарность М. А. Рогову за содействие в исследовании и техническую поддержку в проведении экспериментального тестирования модели машинного обучения.

Для цитирования: Дубовицкий А. А., Климентова Э. А. Прогнозирование агропродовольственных экономических систем с использованием искусственных нейронных сетей // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 08. С. 1093–1105. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1093-1105>.

Дата поступления статьи: 11.04.2024, **дата рецензирования:** 31.05.2024, **дата принятия:** 14.06.2024.

Forecasting of agri-food economic systems using artificial neural networks

A. A. Dubovitskiy✉, E. A. Klimentova

Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russia

✉E-mail: daa1-408@yandex.ru

ЭКОНОМИКА

Abstract. The purpose of the study was to substantiate the applicability of the use of artificial neural networks to the forecasting of agro-food economic systems. **Methods.** The research is based on the use of elements of the interpretative method in a combination of genetic, structural, functional, complex, systemic, and empirical approaches. **The scientific novelty** it consists in systematization of algorithms for the implementation of artificial neural networks and substantiation of their applicability for forecasting agro-food economic systems, development of an algorithm and architecture for building a neural network based on multiple data on agricultural markets, substantiation of directions for improving information infrastructure at the firm level. **Results.** The authors systematized intuitive and formalized forecasting methods, justified the place of methods based on machine learning in this system. The advantages and disadvantages of using artificial neural networks for forecasting agri-food economic systems are considered in detail, the expediency of their use from the point of view of compliance with the principles of forecasting is justified. The analysis of the main types of artificial neural networks allowed us to conclude that the most promising for the implementation of forecasting tasks are competitive neural networks with a back propagation algorithm (LSTM and GRU). The main objectives of building models based on neural networks for use in forecasting economic systems are formulated, the basic provisions of the sequence and methods of deploying neural networks in the forecasting process in the agri-food market are developed, the key elements of the organization of the forecasting process in individual economic entities are considered, practical aspects of the possibility of using a mathematical algorithm for modeling agri-food systems are considered, as well as the conditions for improving the information infrastructure at the firm level in order to ensure the availability of data sources and technologies for their processing.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, neural networks, agriculture, agri-food market, forecasting, principles and methods of forecasting

Acknowledgements. The authors express their gratitude to M. A. Rogov for his assistance in the research and technical support in conducting experimental testing of the machine learning model.

For citation: Dubovitskiy A. A., Klimentova E. A. Forecasting of agri-food economic systems using artificial neural networks. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (08): 1093–1105. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1093-1105>. (In Russ.)

Date of paper submission: 11.04.2024, **date of review:** 31.05.2024, **date of acceptance:** 14.06.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

За последние десятилетия в теории и методах прогнозирования произошли кардинальные изменения, существенным образом сказавшиеся на реформировании системы управления экономикой многих стран. Широко признано, что эти изменения основаны на распространении новых идей и подходов, одновременно являющихся частью более широкой общественной дискуссии о цифровой трансформации, экономическом процветании и устойчивом развитии. Одним из ключевых вопросов, который обсуждается, является применимость искусственного интеллекта (Artificial Intelligence – AI) в прогнозировании социально-экономических систем. Одни авторы утверждают, что для решения насущных и сложных вопросов прогнозирования

требуются соответствующие подходы к управлению, которые могут способствовать повышению надежности прогнозирования и, как следствие, обоснованности принятия решений [3; 5]. Другие указывают на непредсказуемость развития AI как на неконтролируемую площадку, из которой могут возникнуть риски, генерирующие новые угрозы для устойчивого развития [11], или подчеркивают необходимость критически относиться к предубеждениям технологического развития, порождающим обширную утопическую и антиутопическую риторику [15]. Хотя многие из этих утверждений оспариваются или критикуются, стремление к более широкому использованию AI становится все более активной тенденцией в прогнозировании.

Путей использования моделей машинного обучения достаточно много. На сегодняшний день достигнут огромный прогресс в понимании возможностей моделирования в различных областях знаний – от медицины до индустрии развлечений – путем построения искусственных нейронных сетей с использованием различных алгоритмов машинного обучения. В агропродовольственном секторе это оценка площади загрязненности сорными растениями, оценка и картирование однородности всходов, выявления сортовой принадлежности семян и многих других задач. Однако по исследованию вопросов прогнозирования с использованием искусственных нейронных сетей (Artificial Neural Networks – ANN) существует все еще ограниченное количество публикаций [5; 7; 9] и практически нет публикаций, посвященных методологическим аспектам организации прогнозирования на основе ANN в сельском хозяйстве.

Данная статья стала попыткой устранения отмеченных пробелов и направлена на систематизацию алгоритмов реализации искусственных нейронных сетей и обоснование их применимости к прогнозированию агропродовольственных экономических систем. Основное внимание в ней уделяется методологическим вопросам использования искусственного интеллекта для прогнозирования параметров агропродовольственных систем, реализуемых путем построения ANN с использованием различных алгоритмов машинного обучения.

Методология и методы исследования (Methods)

В процессе написания данной статьи авторы опирались на результаты российских и зарубежных научных исследований в области развития искусственных нейронных сетей, прогнозирования агропродовольственных экономических систем и управления отраслями агропромышленного комплекса. Данное исследование основано на использовании элементов интерпретативного метода в сочетании генетического, структурного, функционального, комплексного, системного и эмпирического подходов. В процессе работы над данной статьей авторы оперировали основными дефинициями данной тематики, получившим широкое распространение в научной среде и практике прогнозирования. Экспериментальное тестирование модели машинного обучения при решении задачи прогнозирования основано на использовании открытых данных Службы экономических исследований Министерства сельского хозяйства США, содержащих информацию о региональных социально-демографических и социально-экономических характеристиках населения, включая показатели доступности продовольствия и торговой инфраструктуры, распространенности домохозяйств с низким уровнем доходов, участия домохозяйств в программах государственной поддержки [8].

Результаты (Results)

1. Методологические аспекты прогнозирования агропродовольственных экономических систем

Прогнозирование представляет возможности для улучшения способностей человека принимать обоснованные решения. Прогнозирование параметров агропродовольственных экономических систем в качестве одной из составляющих управления материальными потоками может обеспечить получение информации, представляющей собой количественные и качественные характеристики процессов формирования, транспортировки, торговли и удовлетворения потребностей конечных потребителей в определенных товарах как на определенную дату, так и на перспективу. Основными показателями, характеризующими состояние агропродовольственного рынка, являются потребности в том или ином товаре, объем предложения этих товаров и цена, являющаяся результатом рыночного взаимодействия потребностей и предложения [6; 7].

Прогнозирование имеет очень важное значение для производителей продукции, посредников и продавцов товара при планировании продаж. В условиях развитой рыночной системы потребность выступает двигателем развития рынка, а предложение всегда стремится к его удовлетворению. Достоверный прогноз уровня рыночных цен является одним из основных индикаторов эффективности сбыта и выступает в качестве предела возможного расширения производства того или иного товара, а также предикторов расширения экспорта.

Прогнозирование должно способствовать повышению предсказуемости агропродовольственных систем, обеспечивая актуальность, определенность, точность прогноза, а также ряд стратегических требований, выдвигаемых отдельными субъектами агробизнеса. В силу объективной сложности данных требований, связанных в том числе с многообразием направлений применения, задач надежности и факторов, влияющих на его результаты, существуют различные подходы к реализации этих задач.

С точки зрения возможности верификации результатов прогнозирования в практике хозяйствования используются как интуитивные (эвристические), так и формализованные методы с более точным, математическим выражением прогноза. Интуитивные методы применяются преимущественно в ситуациях, когда необходим субъективный взгляд эксперта или экспертов на возможности решения той или иной проблемы.

В отличие от интуитивных формализованные методы принято использовать в случаях, когда требуются более точные количественные оценки с привязкой к срокам реализации прогноза. Подобные прогнозы могут быть реализованы с использованием различных методов экстраполяции и модели-

рования. Экстраполяция, как правило, строится на анализе одномерных временных рядов и применима к решению задач прогнозирования процессов в случаях, когда тенденции их развития сохраняются в долгосрочной перспективе. Методы прогнозирования, основанные на построении статистико-экономических и экономико-математических моделей, более сложные в использовании, но при этом позволяют обеспечить понимание характера взаимодействия различных элементов социально-экономических систем, отдельных процессов и явлений, выраженных многомерными временными рядами, что позволяет достичь высокого уровня определенности и интерпретируемости результатов.

При этом общим для всех традиционных формализованных методов прогнозирования является линейный характер генерирования результата. Однако в экономической литературе последних лет отмечается, что макроэкономические параметры сложных экономических систем являются нелинейными, и судить о них в рамках традиционных линейных подходов достаточно трудно [10]. Кроме того, в последние годы участились масштабные колебания национальных и мировых цен на продовольствие, которые несут неконтролируемые риски снижения эффективности и оказывают существенное влияние на социально-экономическое развитие сельского хозяйства во многих регионах и странах. Современная волатильность параметров экономических систем такова, что традиционные формализованные методы прогнозирования (прежде всего методы экстраполяции и статистико-экономические методы) перестают обеспечивать желаемый уровень надежности.

Новые возможности в прогнозировании агропродовольственных систем открываются с развитием современных цифровых технологий, связанных с использованием ANN. В публикациях многих авторов доказано, что модели на основе ANN способны значительно повысить точность прогнозирования

в условиях высокой экономической неопределенности и ограниченной доступности данных для анализа крупномасштабных систем [1; 14]. Кроме того, отмечается, что подобные методы выигрывают с точки зрения таких факторов анализа данных, как скорость обработки, производительность и объем обработки исходной информации [9].

2. Применимость моделей машинного обучения с использованием нейронной сети для прогнозирования агропродовольственных экономических систем

В общем виде искусственные нейронные сети представляют собой вычислительные системы, схожие по своей структуре с биологическими нейронными сетями. Основу ANN составляют соединения блоков, или модулей, называемых искусственными нейронами, каждый из которых может получать, обрабатывать и передавать сигнал другим нейронам. Упрощенно нейрон в такой сети представляет собой пороговую систему, которая получает входные сигналы от других нейронов, суммирует их и, если эта сумма превышает некий порог, генерирует выходной сигнал. Нейроны объединяются в слои, которые могут выполнять различные преобразования входных данных. Сигналы передаются от первого слоя (входного) к последнему (выходному) с многократным преобразованием (рис. 1).

Сеть с одним скрытым слоем представляет собой гибкий аппроксиматор функций, которые связывают входные данные с желаемыми выходными данными. Наиболее распространенный тип модуля вычисляет взвешенную сумму входных данных и нелинейно преобразует результат. Взвешенная сумма нескольких нелинейных импульсов дает качественно другую непрерывную функцию в выходном пространстве. Таким образом, скрытый слой линейно-нелинейных единиц позволяет аппроксимировать функции, сильно отличающиеся по форме.

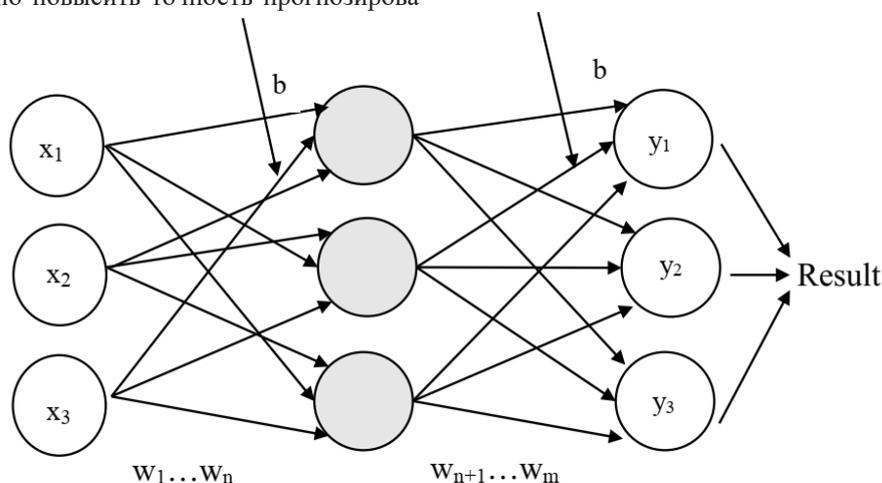


Рис. 1. Нейронная сеть с прямой связью, тремя модулями и одним скрытым слоем
 Fig. 1. A neural network with direct communication, three modules and one hidden

Математическая модель сети в общем виде представляет собой вычисление алгебраической суммы исходных сигналов (точек) с учетом их значимости (веса) и свободного члена при оценке соответствия какому-то критерию по системе включен/выключен:

$$Y = \sum_{i=1}^N x_i w_i + b, \quad (1)$$

где x – входные сигналы;

w – значимость входных сигналов;

b – свободный член (bias neuron), значение которого фиксированное.

Параметры значимости (w) задают силу связи между нейронами. Подбираются они в процессе тестирования модели таким образом, чтобы ошибка обучения (error training) была минимальной ($\rightarrow 0$). Совокупность этих параметров составляет матрицу синаптических связей, которая медленно меняется в процессе машинного обучения, что и позволяет реализовать функцию долговременного хранения информации.

Функционально значение b используется для повышения степени свободы и соответствует нейрону смещения (склонности).

Существует возможность аппроксимировать любую непрерывную функцию с любым желаемым уровнем точности, допуская достаточное количество единиц в одном скрытом слое. Пороговая система активации нейрона может быть построена на основе сигмовидной функции, которая формирует возможности обучения сети с использованием градиентного спуска:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + b^{-x}}, \quad (2)$$

где x – амплитуда входного сигнала, который получает нейрон от других нейронов;

σ – выходной сигнал нейрона.

Главным преимуществом данной функции является ее небинарный и нелинейный характер, что позволяет строить сеть из нескольких слоев. Когда мы переходим от одной входной области к другой, сеть будет плавно переходить между различными выходными значениями. Точность такой аппроксимации всегда можно повысить, используя большее количество скрытых слоев. Если нейронная сеть имеет более одного скрытого слоя, то она называется глубокой.

Существует несколько основных видов ANN в зависимости от того, как данные передаются от входного слоя к выходному. Нейронные сети с прямой связью (Feedforward Neural Network – FFNN) обрабатывают данные в одном направлении, от входного модуля к выходному модулю. Блоки могут быть собраны в сети во многих различных конфигурациях. Каждый модуль одного слоя связан с каждым модулем следующего слоя. Эти связи слоев не все равнозначны, потому что каждое соединение может иметь различный вес или силу. Обработка

информации в сети включает в себя ввод данных от входных блоков и проходит через сеть, перетекая с одного уровня на другой, пока не попадет к выходным блокам [17]. Примерами FFNN являются однослойный перцептрон (Single-Layer Perceptron – SLP) и многослойный перцептрон (Multilayer Perceptron – MLP), сети радиальных базисных функций (Radial Basis Functions – RBF) и машины опорных векторов (Support Vector Machines – SVM). FFNN применяются для решения двух категорий задач: управления динамическими системами и классических задач определения репрезентативного сходства.

Одной из наиболее распространенных глубоких NN является сверточная (Convolutional Neural Networks – CNN). CNN основаны на реализации функций суммирования и фильтрации, называемых свертками. CNN состоят из одного или более сверточных слоев, полностью соединенными между собой. CNN имеет несколько уровней, включая полносвязный слой, слой пула, сверточный и нелинейный слой. Через эти слои сети преобразуют визуально-пространственное представление изображения в семантическое представление его содержимого, последовательно уменьшая пространственную детализацию карт и увеличивая количество семантических измерений [12]. По сравнению с другими глубокими архитектурами сверточные нейронные сети показали превосходные результаты в обработке изображений и речевых приложениях. Данный вид ANN чаще всего используется для решения задач классификации изображений, поскольку скрытый слой может извлекать из них соответствующие признаки, полезные для распознавания и классификации.

Искусственные нейронные сети с алгоритмом обратного распространения (Feed-Backward Neural Network – FBNN) основаны на передаче информации не только на следующий слой, но и на следующий временной шаг, возможно, с возвратом одновременно на другие модули и слои. FBNN способны к корректировке весовых коэффициентов признаков для компенсации каждой ошибки, обнаруженной во время обучения. Это позволяет сети повторно использовать свои вычислительные ресурсы с течением времени и выполнять более глубокую последовательность нелинейных преобразований. В результате FBNN могут выполнять более сложные вычисления, чем это было бы возможно при одном проходе с прямой связью через то же количество блоков и соединений [12].

Примером FBNN является рекуррентная нейронная сеть (Recurrent Neural Network – RNN). RNN относится к стандартному типу нейронной сети, где активность распространяется циклически, как в случае с мозгом (рис. 2).

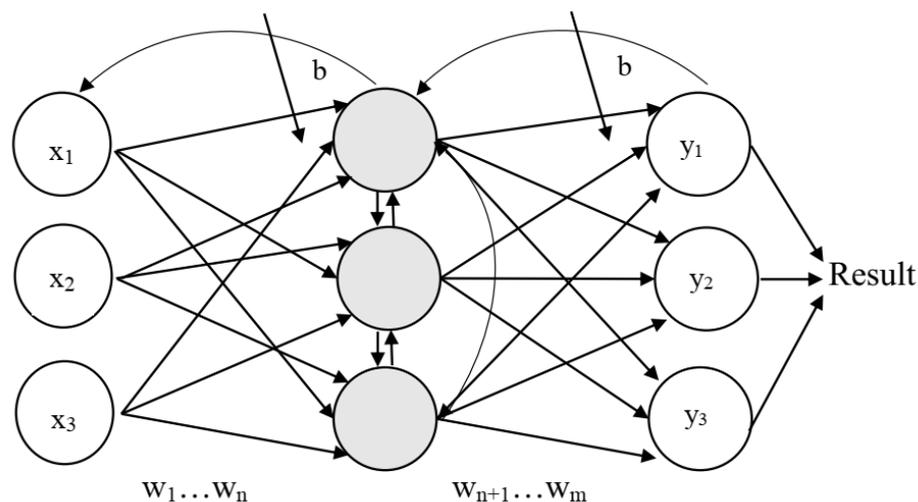


Рис. 2. Модель рекуррентной нейронной сети с тремя модулями и одним скрытым слоем
 Fig. 2. A recurrent neural network model with three modules and one hidden layer

Именно это позволяет решать широкий круг задач, связанных с машинным обучением. Это один из самых современных алгоритмов глубокого обучения. Его преимущество основано на возможности сохранения информации при перемещении ее между слоями сети, что особенно важно для прогнозирования. В RNN информация проходит через внутренний цикл. Когда RNN вычисляет выходной слой, он учитывает не только предыдущий слой, но и слой перед ним.

В рекуррентных нейронных сетях невозможно выделить отдельные слои. Сигналы могут циркулировать по сети во всех направлениях, образуя сложную пространственно-временную структуру (pattern). Такие сети обладают колоссальными возможностями. Так, отмечается, что они могут моделировать любую динамическую систему [2].

Наиболее мощными алгоритмами RNN являются LSTM и GRU. Сеть с долговременной и кратковременной памятью (Long Short-Term Memory – LSTM) представляет собой сеть, которая строится на основе LSTM-модулей, обладающих способностью запоминать информацию как на короткие, так и на длинные промежутки времени [4; 16]. Основана данная возможность на отсутствии функции активации внутри своих рекуррентных компонентов. Реализация функции обучения происходит посредством достаточно интеллектуального обновления памяти в каждый момент времени. Для этого используется механизм формирования выхода (Gating Mechanism) с «памятью выхода», «сохранением выхода» и «фокусировкой выхода», с помощью которых сеть определяет, какие элементы информации необходимо забыть, какие добавить, а на каких необходимо сфокусировать внимание. Наличие функции памяти и механизма фильтрации информации являются важными преимуществами LSTM, а недостатком – слабо реализуемый принцип обрат-

ной связи. Этот недостаток устраняется в процессе построения сети на основе управляемых рекуррентных блоков (Gated Recurrent Units – GRU) с алгоритмом обратного распространения, используемого при обучении для прогнозирования недостающих точек в совокупности данных [13]. Архитектура GRU не предусматривает наличия явного модуля памяти за счет чего количество слоев уменьшается. При этом сеть достаточно проста и представлена двумя рекуррентными блоками, разворачивающимися в противоположных направлениях.

Сами по себе математические алгоритмы сформированной нейронной сети ANN изначально не несут сколько-нибудь важных практических решений. Использование построенной сети для моделирования агропродовольственных систем и прогнозирования их изменения возможно в результате обучения сети для лучшего решения задачи с учетом выборочных наблюдений. Обучение включает в себя настройку весов (и необязательных пороговых значений) сети для повышения точности результата.

Основная концепция машинного обучения заключается не в изучении уровней событий (абстракции), а в повышении качества обработки данных, в результате чего становится возможным понимание поведения сложных экономических систем на основе анализа необработанных данных. Машинное обучение позволяет реализовать функцию прогнозирования в ANN на основе оптимизации модели, которая является математически обобщенным представлением самих данных, позволяющим спрогнозировать соответствующий ответ.

Обычные методы машинного обучения делятся на две группы: контролируемые и неконтролируемые. Категория обучения с подкреплением позволяет системе учиться посредством взаимодействия с человеком и наблюдения за результатами этого взаимодействия. Эта группа методов обучения ис-

кусственных нейронных сетей применима к FFNN, в том числе SLP, MLP и SVM, а также часто к сетям SVM. Неконтролируемые методы (k-means, максимизация ожидания, автоэнкодеры и т. д.) применимы для обучения рекуррентных сетей, в том числе LSTM и GRU.

3. Этапы прогнозирования агропродовольственных экономических систем с использованием алгоритма машинного обучения

В процессе прогнозирования формируется размерность входных переменных в количестве n , по числу выборок N . При этом задаются входные переменные как вектора $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ наблюдаемых значений при $i = 1, 2, \dots, N$. Проводится предобработка данных, выстраивается архитектура нейронной сети, проводится обучение, анализируются полученные результаты.

При реализации модели основными целями выступают удовлетворительная точность прогнозирования, стремление к уменьшению времени вычислений и уменьшение потребности в памяти, достаточная интерпретируемость. Степень достижения поставленных целей является критерием качества построенной модели.

Ниже приведены конкретные этапы прогнозирования на агропродовольственном рынке на примере цен с использованием алгоритма машинного обучения.

Шаг 1. Получить доступ к источнику данных.

Шаг 2. Обеспечить сбор данных, отражающих характеристики, которые могут быть прямо или косвенно связаны с прогнозируемым параметром (ценой).

Шаг 3. Провести предобработку данных, поиск аномалий и снижение размерности.

Шаг 4. Сформировать базу данных обучения (N_t) и прогнозирования (N_p).

Шаг 5. Сформировать архитектуру нейронной сети.

Шаг 6. Выбрать функцию активации скрытого нейрона и метод инициализации весов.

Шаг 7. Провести обучение нейронной сети.

Шаг 8. Компилировать результаты и сохранить их в базу данных.

Шаг 9. Обеспечить доступность и наглядность результатов работы алгоритма.

Длительность обучения модели и результаты выхода напрямую зависят от качества, количества и дифференциации данных на входе модели. Обучение модели должно проводиться регулярно, но не непрерывно, поскольку в противном случае возможно переобучение модели, что в дальнейшем негативно отразится на результатах прогнозирования. При развертывании сетей в целях снижения вероятности избыточного переобучения в нейронных сетях может быть использован алгоритм Dropout, а для повышения интерпретируемо-

сти – механизм Attention с методом оптимизации адаптивного обнаружения объектов предметной области – Skip-Layers.

4. Экспериментальное тестирование модели машинного обучения при решении задачи прогнозирования цен

На основе широкого перечня данных Службы экономических исследований, имеющих в открытом доступе, выбраны факторы, отражающие характеристики, которые могут быть прямо или косвенно связаны с ценой. Их общее количество составило 63 значения по 3200 населенным пунктам городского типа [7; 8].

Для предобработки данных, поиска аномалий и снижения размерности использовались методы Soft Ensemble из моделей AdaBoost, Logistic Regression, SVM. В результате удалось снизить размерность входного вектора до 10 признаков, которые можно считать наиболее значимыми (таблица 1).

Проведенная систематизация основных видов ANN с учетом их назначения, сравнительного анализа основных положительных и отрицательных сторон позволила выбрать оптимальную архитектуру нейронной сети для использования субъектами агробизнеса в целях прогнозирования параметров агропродовольственных экономических систем. Была сформирована гибридная ANN прогнозирования с использованием моделей GRU и LSTM. Такое сочетание позволяет максимизировать положительные стороны и минимизировать недостатки каждой из них. Предотвращение переобучения ставилось одним из приоритетов, для чего использовалась регуляризация elastic-net, повышенный Dropout.

В итоге получена структура сети на основе двух RNN:

- 1) Bi-directional GRU + Dropout;
- 2) LSTM + Dropout + Attention со skip-layers.

Интеграция двух результатов обеспечена посредством реализации слоя активации за счет функций Dense и Activation. Настройка параметров проводилась на модели Bayesian GridSearch.

Функция активации моделей – selu, метод инициализации веса – lecun_normal. Результаты прошли валидацию по методу Cross-validation.

Приемлемый результат получен в процессе обучения модели в течение 80 эпох (рис. 3).

Реализованный алгоритм позволил сформировать модель прогнозирования на агропродовольственном рынке с достаточно удовлетворительным результатом. Величина дисперсии данных, которая объясняется моделью, составила 87 % ($R^2 = 0,87$), что свидетельствует об успешном обнаружении искомых параметров с использованием ANN на агропродовольственном рынке и может считаться достаточно удовлетворительным результатом с учетом полученных данных.

Таблица 1

Переменные базы данных обучения и прогнозирования

База данных обучения (N_t)	
1. Количество в расчете на 1000 жителей	1.1. Продуктовых магазинов
	1.2. Супермаркетов
	1.3. Круглосуточных магазинов
	1.4. Ресторанов быстрого питания
2. Доля в общей численности, %	2.1. Участников программы студенческих обедов
	2.2. Участников программы школьных завтраков
	2.3. Участников летней программы общественного питания
3. Число фермерских рынков – участников программ помощи семей с низким доходом, ед.	3.1. Программа дополнительной помощи в области питания (SNAP)
	3.2. Специальная программа дополнительного питания для женщин, младенцев и детей (WIC)
База данных прогнозирования (N_p)	
4. Параметры функционирования агропродовольственного рынка	4.1. Потребительские цены на рынке молока

Источник: составлено авторами на основе данных [8].

Экономика

Table 1
Training and prediction database variables

Training database (N_t)	
1. Number per 1000 inhabitants	1.1. Grocery stores
	1.2. Supermarkets
	1.3. Convenience stores
	1.4. Fast food restaurants
2. Share in the total number, %	2.1. Student Lunch Program Participants
	2.2. School Breakfast Program Participants
	2.3. Summer Catering Program Participants
3. The number of farmers' markets participating in low-income family assistance programs, units	3.1. Supplemental Nutrition Assistance Program (SNAP)
	3.2. Special Supplemental Nutrition Program for Women, Infants, and Children (WIC)
Forecasting database (N_p)	
4. Parameters of the functioning of the agri-food market	4.1. Consumer prices on the milk market

Source: compiled by the authors according [8].

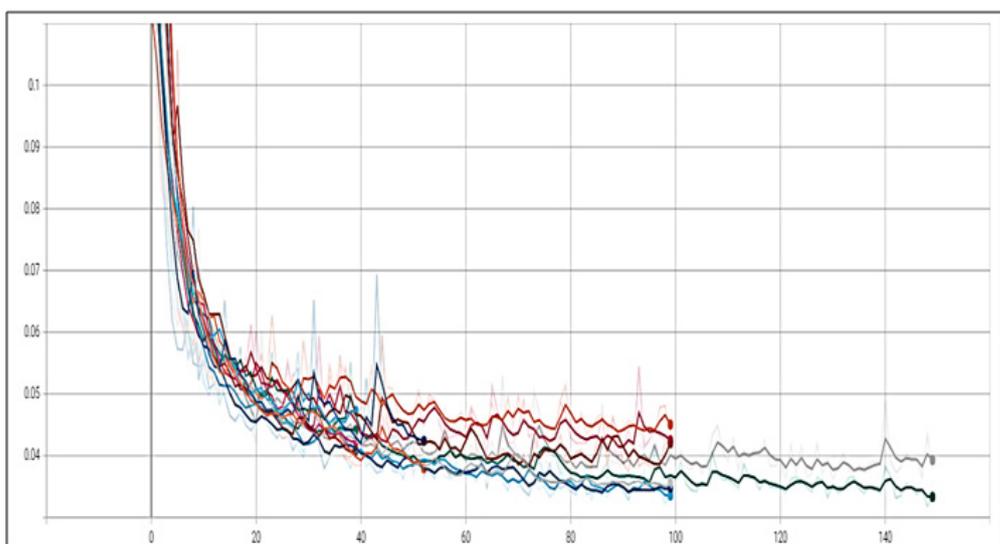


Рис. 3. График кривой обучения в зависимости от количества эпох

Источник: составлено авторами с использованием данных [7, 8]

Fig. 3. Graph of the learning curve depending on the number of epochs

Source: compiled by the authors using data [7, 8]

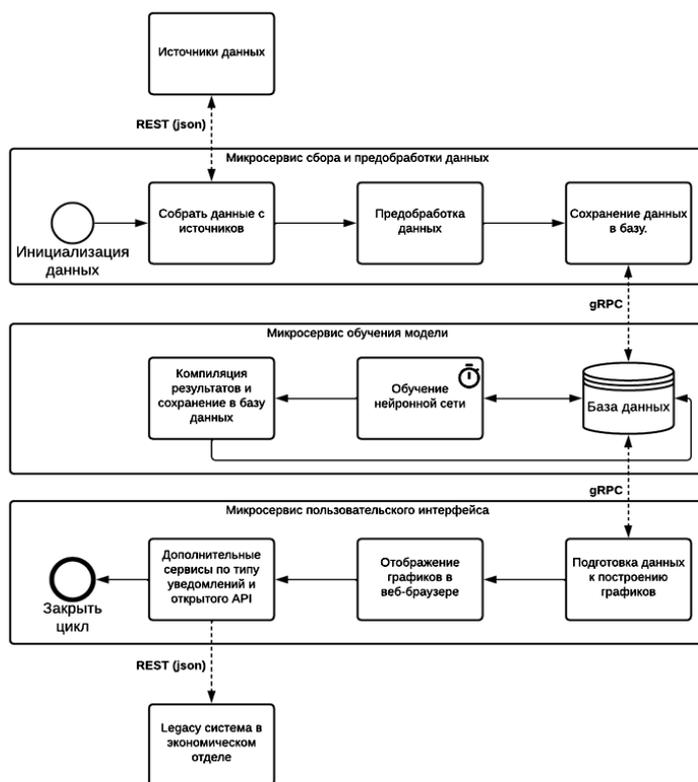


Рис. 4. BPMN-схема построения информационной инфраструктуры на уровне субъектов агробизнеса
 Источник: по данным [7]

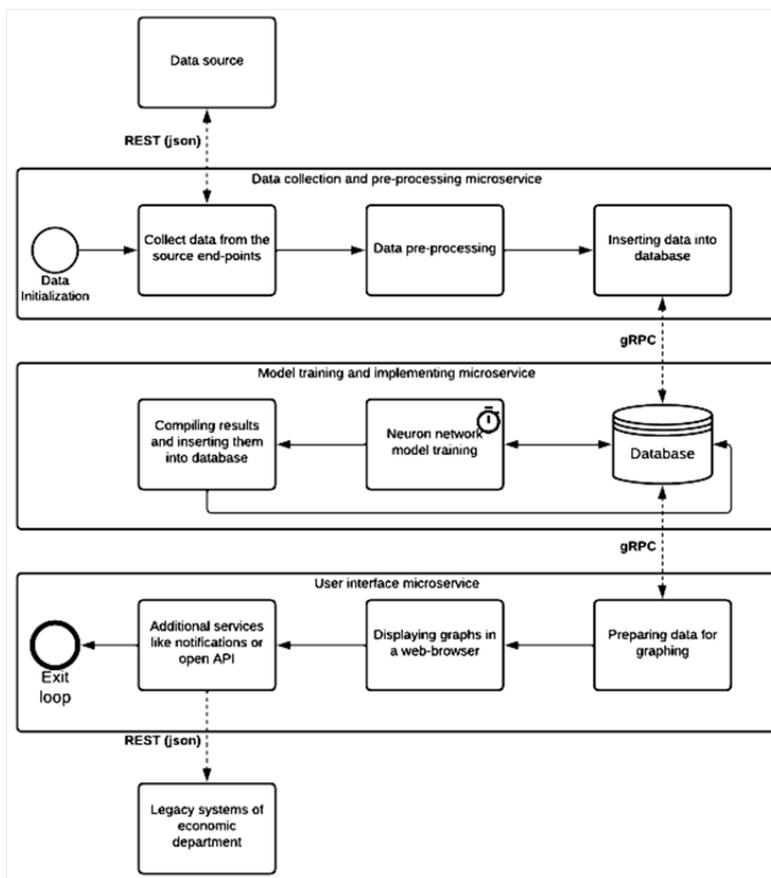


Fig. 4. BPMN scheme of building information infrastructure at the level of agribusiness entities
 Source: according to [7]

Надо понимать, что после разработки модели результатом будет плохо читаемый обычным пользователем алгоритм на уровне кода. Пользоваться таким алгоритмом на практике сможет только хорошо обученный специалист – по большей части тот, кто и создал этот алгоритм. Для дальнейшего внедрения модели в систему прогнозирования сельскохозяйственной организации требуется создание информационной инфраструктуры на уровне самого предприятия.

5. Применимость ANN на уровне фирмы

Внедрение использования ANN в АПК обуславливает наличие больших объемов данных, генерируемых в данном направлении деятельности, которые должны оперативно систематизироваться, обрабатываться и представляться менеджменту компаний. В целях обеспечения практического использования полученного алгоритма разработанной модели в подразделениях экономических агентов агропродовольственной системы требуется обеспечить соответствующую инфраструктуру.

Создание модели и ее развертывание в организациях АПК может быть реализовано двумя путями. Первый предполагает привлечение команды компетентных специалистов, которая получив доступ к информационным ресурсам сможет развернуть платформу сбора и обработки данных, обеспечить построение ANN и интегрировать ее в систему управления. Решение этих задач предлагается многими коммерческими организациями, включая бывшее подразделение Сбера – ООО «СберБизнесСофт». Этот вариант подразумевает немалые финансовые затраты при индивидуальном подходе к организации прогнозирования, что доступно лишь крупным компаниям.

Второй возможен при наличии собственного персонала, способного самостоятельно аккумулировать и анализировать данные, осуществлять построение моделей машинного обучения. Здесь возможна экономия затрат, но предполагается наличие необходимых навыков сбора и обработки информации у сотрудников организации.

Мы будем рассматривать случай внедрения ANN в экономический отдел сельскохозяйственной организации. Предполагается, что отдел экономики уже обладает стандартным набором в виде любой клиент-серверной платформы и базы данных. В таком случае требуется интеграция построенной сети с данной системой для информативного отображения графиков и диаграмм.

Практическое решение задач прогнозирования экономических систем возможно с использованием сервисов облачных вычислений, создаваемых в последнее время многими цифровыми операторами. Организовать работу с нейронными сетями глубокого обучения можно с помощью Microsoft Distributed Learning Machine Toolkit, Google Prediction

API, Amazon Machine Learning и ряда других. Условием их использования в субъектах агробизнеса является развертывание микросервисной облачной инфраструктуры. Сервисы должны обладать API в виде gRPC с использованием протокола HTTP/2.0 с подключением мультиплексирования для ускоренной передачи данных. Целесообразно создание трех микросервисов: для предобработки данных, для обучения нейронной сети и для подготовки данных к интеграции и создания интерактивных графиков (рис. 4).

Микросервисная архитектура является наиболее приемлемой в данном случае в связи с легкостью масштабирования и доступностью данных на любом этапе обработки информации. Сервис сбора и предобработки данных отвечает за поиск и сбор данных, валидацию, верификацию и классификацию данных. Сервис должен проводить первичный анализ полученных данных, выполнять нормализацию, стандартизацию, компоновку и векторизацию данных для передачи на вход алгоритму.

Сервис обучения модели непосредственно отвечает за обучение модели и сохранение прогнозных результатов в базу данных. На данном этапе предполагается использование вышеописанной ANN. Длительность обучения модели и результаты прогнозирования критически зависят от качества, количества и дифференциации данных на входе модели. Обучение модели должно проводиться регулярно, но не непрерывно, не допуская ее переобучения. Таким образом, второй микросервис должен запускаться согласно графику, формируемому в зависимости от объема поступающей информации на первый микросервис.

Микросервис пользовательского интерфейса оптимально может быть представлен в виде веб-страницы с отображением результатов работы алгоритма. Наиболее эффективным способом представления прогнозируемых значений является графическое отражение полученных результатов поверх фактических данных. В таком случае прогнозируемые значения подкрепляются фактическими данными из первого микросервиса, что сразу показывает уровень корреляции между прогнозируемыми и фактическими показателями. Дополнительно данный микросервис может использоваться как точка интеграции с другими системами организации, а также дополнительных функций, таких как отправка уведомлений руководству, формирование отчета, взаимосвязь с маркетинговыми инструментами и т. д.

Хотелось бы отметить, что созданием модели и ее развертыванием на предприятии разработка не заканчивается. Высоконагруженные системы, особенно подразумевающие использование алгоритмов машинного обучения, малоустойчивы и склонны к проявлению дефектов в процессе эксплуатации. Более того, в процессе построения подобной

системы постепенно будут появляться новые требования к результатам ее использования, что потребует дополнительных ресурсов для доработки системы и алгоритмов. Однако практика больших организаций, связанных с аналитикой рынка сбыта, показывает, что такие системы способны значительно повысить эффективность сбыта продукции за счет своевременной корректировки цен на продукцию. Также данные, полученные в результате сбора и предобработки, можно на коммерческой основе предоставлять другим субъектам агробизнеса.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Проведенная систематизация основных видов ANN с учетом их назначения, сравнения основных положительных и отрицательных сторон позволила выбрать наиболее перспективную с точки зрения применимости в прогнозировании сельскохозяйственных организаций архитектуру с использованием совокупности рекуррентных сетей с алгоритмом обратного распространения: GRU + LSTM. Сформулированные в работе базовые положения методики развертывания нейронных сетей и организации процесса прогнозирования в отдельных экономических субъектах, а также условия совершенствования информационной инфраструктуры на уровне сельскохозяйственных организаций могут быть положены в основу совершенствования системы прогнозирования в сельском хозяйстве.

Искусственные нейронные сети не обязательно являются панацеей и не исключают применение

традиционных методов прогнозирования. Но использование ANN создает новые возможности для экономических агентов, стремящихся решать управленческие задачи, такие как стратегическое управление развитием, оптимизация продаж, улучшение логистики, услуг и многих других, с помощью новых средств. Подобные модели могут быть полезны для повышения объективности, оперативности, точности прогнозов, а также повышения скорости и производительности работ в процессе прогнозирования. Лучшее понимание происходящих на агропродовольственных рынках процессов будет способствовать принятию взвешенных управленческих решений при планировании производственной программы, формированию и реализации оптимальной ценовой стратегии, принятию решений по своевременной дифференциации и оперативной корректировке уровня цен, улучшению работы с потребителями.

Отдельные организационные аспекты безусловно требуют дополнительных усилий в данном направлении, что может быть реализовано в дальнейшем, посредством новых исследований этой темы. При этом следует констатировать, что с развитием цифровых технологий именно методы машинного обучения постепенно становятся основой прогнозирования будущего состояния различных экономических систем, в том числе агропродовольственных.

Библиографический список

1. Булыгина О. В., Емельянов А. А., Росс Г. В., Яшин Е. С. Инвестиции, инновации, импортозамещение: имитационное моделирование с элементами искусственного интеллекта в управлении проектными рисками // Прикладная информатика. 2020. Т. 15, № 1 (85). С. 63–102. DOI: 10.24411/1993-8314-2020-10006.
2. Тормозов В. С., Кулпейс Е. А., Смагулова К. К. [и др.] Метод автоматизированного краткосрочного прогнозирования временного ряда в онлайн-режиме // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 7. С. 32–40. DOI: 10.25791/asu.7.2021.1296.
3. Самыгин Д. Ю., Барышников Н. Г., Мизюркина Л. А. Модели сценарного прогнозирования развития сельского хозяйства региона // Экономика региона. 2019. Т. 15, № 3. С. 865–879. DOI: 10.17059/2019-3-18.
4. Abbasimehr H., Shabani M., Yousefi M. An optimized model using LSTM network for demand forecasting // Computers and Industrial Engineering. 2020. Vol. 143. Article number 106435. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106435.
5. Blühdorn I., Deflorian M. The Collaborative Management of Sustained Unsustainability: on the performance of participatory forms of environmental governance // Sustainability. 2019. Vol. 11, No. 4. Article number 1189. DOI: 10.3390/su11041189.
6. Dubovitski A. A., Yakovleva E. A., Smyslova O. Y., Kochyan G. A., Zelenkina E. V. Assessment of export prospects of Russian agricultural producers // Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes. 2022. Pp. 167–180. DOI: 10.1007/978-981-16-8731-0_17.
7. Dubovitski A., Klimentova E., Rogov M. Applicability of machine learning models using a neural network for predicting the parameters of the development of food markets // Journal of Process Management and New Technologies. 2022. Vol. 10, No. 3–4. Pp. 93–105. DOI: 10.5937/jpmnt10-41317.
8. Food Access Research Atlas. Economic Research Service, Department of Agriculture USA [Электронный ресурс]. URL: <https://catalog.data.gov/dataset/food-access-research-atlas> (дата обращения: 10.11.2020).
9. Guo Y., Tang D., Tang W., Yang S., Tang Q., Feng Y., Zhang F. Agricultural Price Prediction Based on Combined Forecasting Model under Spatial-Temporal Influencing Factors // Sustainability. 2022. Vol. 14, No. 17. Article number 10483. DOI: 10.3390/su141710483.

10. Haynes P., Alemna D. A Systematic literature review of the impact of complexity theory on applied economics // *Economies*. 2022. Vol. 10, No. 8. Article number 192. DOI: 10.3390/economies10080192.
11. Karpunina E. K., Kosorukova I. V., Dubovitski A. A., Galieva G. F., Chernenko E. M. State policy of transition to Society 5.0: Identification and assessment of digitalisation risks // *International Journal of Public Law and Policy*. 2021. Vol. 1, No. 7. Pp. 334–350. DOI: 10.1504/IJPLAP.2021.118895.
12. Kriegeskorte N., Golan T. Neural Network Models and Deep Learning // *Current Biology*. 2019. Vol. 29, No. 7. R231–R236. DOI: 10.1016/j.cub.2019.02.034.
13. Kumar P., Suresh S. DeepTransHAR: a novel clustering-based transfer learning approach for recognizing the cross-domain human activities using GRUs (Gated Recurrent Units) Networks // *Internet of Things*. 2023. Vol. 21. Article number 100681. DOI: 10.1016/j.iot.2023.100681.
14. Molnar C. *Interpretable Machine Learning: A Guide for Making Black Box Models Explainable* (2nd ed.) [Электронный ресурс]. 2022. URL: <https://christophm.github.io/interpretable-ml-book> (дата обращения: 15.01.2023).
15. Paskins M. History of science and its utopian reconstructions // In: *Studies in History and Philosophy of Science*. Part A. 2020. Vol. 81. Pp. 82–95. DOI: 10.1016/j.shpsa.2019.08.001.
16. Sabzipour B., Arsenault R., Troin M., Martel J., Brissette F., Brunet F., Mai J. Comparing a long short-term memory (LSTM) neural network with a physically-based hydrological model for streamflow forecasting over a Canadian catchment // *Journal of Hydrology*. 2023. Vol. 627, Part A. Article number 130380. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130380.
17. Zhou H., Zhu H., Wang X. Change point detection via feedforward neural networks with theoretical guarantees // *Computational Statistics & Data Analysis*. 2024. Vol. 193. Article number 107913. DOI: 10.1016/j.csda.2023.107913.

Об авторах:

Александр Алексеевич Дубовицкий, доктор экономических наук, доцент кафедры экономики и коммерции, Мичуринский государственный аграрный университет, Мичуринск, Россия; ORCID 0000-0003-4542-1119, AuthorID 315247. E-mail: daa1-408@yandex.ru

Эльвира Анатольевна Климентова, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и коммерции, Мичуринский государственный аграрный университет, Мичуринск, Россия; ORCID 0000-0001-7628-7181, AuthorID 343886. E-mail: klim1-408@yandex.ru

References

1. Bulygina O. V., Emelyanov A. A., Ross G. V., Yashin E. S. Investments, innovations, import substitution: simulation modeling with elements of artificial intelligence in project risk management. *Journal of Applied Informatics*, 2020; 15 (1): 63–102. DOI: 10.24411/1993-8314-2020-10006. (In Russ.)
2. Tormozov V. S., Kulpeys E. A., Smagulova K. K., et al. Method of automated short-term forecasting of a time series in online mode. *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*. 2021; 7: 32–40. DOI: 10.25791/asu.7.2021.1296. (In Russ.)
3. Samygin D. Yu., Baryshnikov N. G., Mizyurkina L. A. Models of Scenario Forecasting of the Region's Agriculture. *Economy of Regions*. 2019; 15 (3): 865–879. DOI: 10.17059/2019-3-18. (In Russ.)
4. Abbasimehr H., Shabani M., Yousefi M. An optimized model using LSTM network for demand forecasting. *Computers and Industrial Engineering*. 2020; 143: 106435. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106435.
5. Blühdorn I., Deflorian M. The Collaborative Management of Sustained Unsustainability: on the performance of participatory forms of environmental governance. *Sustainability*. 2019; 11 (4): 1189. DOI: 10.3390/su11041189.
6. Dubovitski A. A., Yakovleva E. A., Smyslova O. Y., Kochyan G. A., Zelenkina E. V. Assessment of export prospects of Russian agricultural producers. *Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes*. 2022: 167–180. DOI: 10.1007/978-981-16-8731-0_17.
7. Dubovitski A., Klimentova E., Rogov M. Applicability of machine learning models using a neural network for predicting the parameters of the development of food markets. *Journal of Process Management and New Technologies*. 2022; 10 (3–4): 93–105. DOI: 10.5937/jpmnt10-41317.
8. *Food Access Research Atlas*. Economic Research Service, Department of Agriculture USA [Internet] [cited 2020 Nov 10]. Available from: <https://catalog.data.gov/dataset/food-access-research-atlas>.
9. Guo Y., Tang D., Tang W., Yang S., Tang Q., Feng Y., Zhang F. Agricultural Price Prediction Based on Combined Forecasting Model under Spatial-Temporal Influencing Factors. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 17. Article number 10483. DOI: 10.3390/su141710483.
10. Haynes P., Alemna D. A Systematic literature review of the impact of complexity theory on applied economics. *Economies*. 2022; 10 (8): 192. DOI: 10.3390/economies10080192.

11. Karpunina E. K., Kosorukova I. V., Dubovitski A. A., Galieva G. F., Chernenko E. M. State policy of transition to Society 5.0: Identification and assessment of digitalisation risks. *International Journal of Public Law and Policy*. 2021; 1 (7): 334–350. DOI: 10.1504/IJPLAP.2021.118895.
12. Kriegeskorte N., Golan T. Neural Network Models and Deep Learning. *Current Biology*. 2019; 29 (7): R231–R236. DOI: 10.1016/j.cub.2019.02.034.
13. Kumar P., Suresh S. DeepTransHAR: a novel clustering-based transfer learning approach for recognizing the cross-domain human activities using GRUs (Gated Recurrent Units) Networks. *Internet of Things*. 2023; 21: 100681. DOI: 10.1016/j.iot.2023.100681.
14. Molnar C. *Interpretable Machine Learning: A Guide for Making Black Box Models Explainable* (2nd ed.) [Internet]. 2022 [cited 2023 Jan 15]. Available from: <https://christophm.github.io/interpretable-ml-book>.
15. Paskins M. History of science and its utopian reconstructions. *Studies in History and Philosophy of Science. Part A*. 2020; 81: 82–95. DOI: 10.1016/j.shpsa.2019.08.001.
16. Sabzipour B., Arsenault R., Troin M., Martel J., Brissette F., Brunet F., Mai J. Comparing a long short-term memory (LSTM) neural network with a physically-based hydrological model for streamflow forecasting over a Canadian catchment. *Journal of Hydrology*. 2023; 627 (A): 130380. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130380.
17. Zhou H., Zhu H., Wang X. Change point detection via feedforward neural networks with theoretical guarantees. *Computational Statistics & Data Analysis*. 2024; 193: 107913. DOI: 10.1016/j.csda.2023.107913.

Authors' information:

Aleksandr A. Dubovitskiy, doctor of economic sciences, associate professor of the department of economics and commerce, Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russia; ORCID 0000-0003-4542-1119, AuthorID 315247. *E-mail: daal-408@yandex.ru*

Elvira A. Klimentova, candidate of economic sciences, associate professor of the department of economics and commerce, Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russia; ORCID 0000-0001-7628-7181, AuthorID 343886. *E-mail: klim1-408@yandex.ru*

Применение методов интернет-маркетинга для стимулирования агротуризма на сельских территориях

Е. С. Куликова¹✉, О. А. Рущицкая², Т. И. Кружкова²

¹ Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

✉ E-mail: e.s.kulikova@mail.ru

Аннотация. В условиях развития цифровых технологий и увеличения числа пользователей интернета по всему миру интернет-маркетинг становится мощным инструментом для привлечения и удержания целевой аудитории. В контексте сельских территорий применение интернет-маркетинга может значительно усилить привлекательность и доступность агротуристических направлений и предложений. **Цель статьи** – определить эффективные методы интернет-маркетинга для стимулирования агротуризма на сельских территориях. **Методы.** В исследовании применены аналитические и эмпирические методы, включающие обзор и анализ существующих методов интернет-маркетинга, таких как SEO, контент-маркетинг, социальные медиа и email-маркетинг, и их адаптация к агротуризму. Включен анализ успешных кейсов, предоставлены практические рекомендации по интеграции интернет-маркетинга в стратегию развития агротуризма. **Результаты.** Выявлены стратегии, направленные на создание уникального и привлекательного туристического продукта, который удовлетворяет запросы современных туристов и поддерживает устойчивое развитие сельских территорий. Рассмотрены аспекты разработки контента, который отражает уникальность и аутентичность сельских регионов, включая создание визуальных и текстовых материалов, видеороликов и виртуальных туров. Особое внимание уделено роли социальных медиа в продвижении агротуристических продуктов, что позволяет наладить прямую коммуникацию с потенциальными туристами, создавая лояльное сообщество и улучшая репутацию туристических направлений. Также анализируется влияние отзывов и рейтингов на принятие решений туристами, предлагаются методы управления онлайн-репутацией. **Научная новизна.** В статье представлена новая концепция интеграции интернет-маркетинга в агротуризм, что может стать ценным вкладом в практику региональных управляющих структур и предпринимателей. Рассмотрены уникальные подходы к созданию и продвижению агротуристических продуктов, подчеркивается значимость интеграции интернет-маркетинга в общую стратегию развития агротуризма на сельских территориях, что способствует привлечению большего числа туристов, поддержке местных сообществ, созданию рабочих мест и сохранению культурного наследия. Особое внимание уделено использованию аналитики данных и персонализации предложений для повышения вовлеченности туристов и улучшения их опыта.

Ключевые слова: агротуризм, интернет-маркетинг, сельская территория, стратегия развития, цифровые технологии, устойчивое развитие, привлечение туристов

Для цитирования: Куликова Е. С., Рущицкая О. А., Кружкова Т. И. Применение методов интернет-маркетинга для стимулирования агротуризма на сельских территориях // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 08. С. 1106–1114. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1106-1114>.

Дата поступления статьи: 19.06.2024, **дата рецензирования:** 10.07.2024, **дата принятия:** 17.07.2024.

Analysis of the implementation of digital marketing in the agro-industrial complex

E. S. Kulikova¹✉, O. A. Rushchitskaya², T. I. Kruzhkova²

¹ Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russia

² Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia

✉E-mail: e.s.kulikova@mail.ru

Abstract. In the context of the development of digital technologies and the increasing number of internet users worldwide, internet marketing becomes a powerful tool for attracting and retaining the target audience. For rural areas, the application of internet marketing can significantly enhance the attractiveness and accessibility of agritourism destinations and offerings. **Purpose of article** is to identify effective internet marketing methods for stimulating agritourism in rural areas. **Methods.** The study employs analytical and empirical methods, including a review and analysis of existing internet marketing methods such as SEO, content marketing, social media, and email marketing, and their adaptation to agritourism. The study also includes the analysis of successful cases and provides practical recommendations for integrating internet marketing into the development strategy of agritourism. **Results.** Strategies are identified for creating unique and attractive tourism products that meet the demands of modern tourists and support the sustainable development of rural areas. The study examines aspects of content development that reflect the uniqueness and authenticity of rural regions, including the creation of visual and textual materials, videos, and virtual tours. Special attention is given to the role of social media in promoting agritourism products, which allows for direct communication with potential tourists, creating a loyal community, and improving the reputation of tourism destinations. The impact of reviews and ratings on tourists' decision-making is also analyzed, and methods for managing online reputation are proposed. **Scientific novelty.** The article presents a new concept for integrating internet marketing into agritourism, which can become a valuable contribution to the practices of regional management structures and entrepreneurs. Unique approaches to the creation and promotion of agritourism products are considered, the importance of integrating Internet marketing into the overall strategy for the development of agritourism in rural areas is emphasized, which helps attract more tourists, support local communities, create jobs and preserve cultural heritage. Special attention is given to the use of data analytics and offer personalization to increase tourist engagement and improve their experience.

Keywords: marketing perspectives, agribusiness, pace, agriculture, agribusiness marketing

For citation: Kulikova E. S., Rushchitskaya O. A., Kruzhkova T. I. Analysis of the implementation of digital marketing in the agro-industrial complex. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (08): 1106–1114. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-08-1106-1114>. (In Russ.)

Date of paper submission: 19.06.2024, **date of review:** 10.07.2024, **date of acceptance:** 17.07.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

Современное общество стоит перед множеством вызовов и возможностей, особенно в контексте глобализации и цифровизации всех сфер жизни. Интернет-маркетинг как один из наиболее быстро развивающихся и многообещающих направлений оказывает все более заметное воздействие на различные отрасли, включая сферу агротуризма и развитие сельских территорий. Сфера агротуризма имеет огромный потенциал для развития, особенно в регионах, где сохраняются уникальные природные, культурные и исторические ресурсы. Однако, несмотря на это, она часто сталкивается с рядом проблем и трудностей, среди которых слабая информационная доступность и видимость предложений на широком туристическом рынке, ограниченные возможности по маркетингу и продвижению, а

также конкуренция с более популярными и известными туристическими направлениями.

Цифровые технологии предоставляют эффективные инструменты для преодоления многих из вышеупомянутых трудностей, позволяя оптимизировать маркетинговые стратегии, усилить онлайн-присутствие и донести информацию о предложениях агротуризма до широкой аудитории. Применение интернет-маркетинга для стимулирования развития агротуризма на сельских территориях является актуальной и практически значимой задачей, так как в условиях повышенной конкуренции и динамичных изменений потребительских предпочтений эффективное онлайн-продвижение становится ключевым фактором успеха.

Несмотря на высокую степень исследованности интернет-маркетинга в общем и его примене-

ния в отдельных отраслях, аспекты использования онлайн-стимулирования в контексте агротуризма и развития сельских территорий требуют дополнительного внимания. Ключевые вопросы, которые выдвигаются на передний план, включают не только выбор и адаптацию инструментов интернет-маркетинга, но и особенности их воздействия на целевую аудиторию, а также взаимосвязь с общими стратегиями развития территорий и сферы агротуризма в частности.

Основная проблема заключается в необходимости разработки комплексных стратегий интернет-маркетинга, которые были бы адаптированы к специфике и потребностям сельских территорий и учитывали бы особенности местного населения, культуры и природных ресурсов. С одной стороны, необходимо разрабатывать стратегии, способные привлекать туристов и стимулировать их интерес к агротуризму. С другой стороны, такие стратегии должны обеспечивать устойчивое развитие территорий, поддерживать и сохранять местные традиции и ценности, а также обеспечивать выгоду для местных сообществ.

Таким образом, перед исследователями и практиками в области интернет-маркетинга и агротуризма стоит задача разработки и тестирования моделей и стратегий, которые смогут гармонично сочетать в себе потребности и интересы всех заинтересованных сторон: туристов, предпринимателей, местных сообществ и органов управления туризмом на сельских территориях.

В контексте изучения взаимосвязи интернет-маркетинга и развития агротуризма на сельских территориях, основное внимание уделяется двум ключевым аспектам: применению интернет-маркетинга в туристической индустрии в целом и его специфическому использованию в рамках агротуризма на сельских территориях.

Рассмотрение многочисленных исследований, посвященных использованию интернет-маркетинга в туризме, позволяет выделить ключевые тренды и вызовы отрасли. Так, работы А. Смита¹, К. Мейерс² и др. акцентируют внимание на значимости электронного сарафанного радио (eWOM), социальных сетей и SEO в привлечении и удержании клиентов. В целом исследования подчеркивают неотъемлемую роль интернет-маркетинга в современной туристической практике.

В отношении агротуризма на сельских территориях анализировались исследования, сконцентрированные на особенностях данного сегмента и его специфических потребностях в продвижении. В ра-

ботах Л. Брауна³ и Т. Фернандеса⁴ подчеркивается значимость локальности и сохранения уникальности в продвижении агротуристического продукта, а также акцентируется внимание на социально-экономическом влиянии агротуризма на сельские сообщества.

Особенно интересным представляется исследование Х. Ли⁵, которое обращает внимание на необходимость сбалансированного подхода к интернет-маркетингу в агротуризме, учитывающего как требования туристического рынка, так и потребности и ценности местного населения. При этом становится очевидной проблема: многие исследования касаются лишь отдельных аспектов проблемы, недостаточно объединяя тему интернет-маркетинга и агротуризма в одном контексте.

Так, анализируя вышеуказанные работы и ряд других исследований, можно выделить несколько ключевых проблемных зон. Во-первых, многие работы фокусируются либо на общих подходах к интернет-маркетингу в туризме, либо на специфике агротуризма, при этом углубленного анализа их взаимодействия и синергии не проводится. Во-вторых, несмотря на огромное количество работ по обеим тематикам, существует дефицит комплексных исследований, объединяющих теоретические и практические аспекты применения интернет-маркетинга специфически в области агротуризма.

В рамках библиографического анализа проблемы взаимосвязи интернет-маркетинга и агротуризма на сельских территориях необходимо обратить внимание и на отечественные исследования в данной области.

Отечественные ученые также активно изучают проблематику развития агротуризма и использование для этого различных инструментов маркетинга. В частности, работа А. В. Сергеева⁶ фокусируется на проблеме формирования концепции маркетинга территорий в контексте развития регионального агротуризма. Автор акцентирует внимание на значимости стратегического подхода и использовании инновационных технологий маркетинга для продвижения агротуристических услуг.

Е. В. Смолина⁷ исследует вопросы применения цифровых технологий в продвижении туристического продукта сельских территорий. Она выделяет

³ Brown L. Importance of locality and uniqueness in agritourism marketing // *The Annals of Regional Science*. 2017. Vol. 59, No. 1. Pp. 123–140.

⁴ Fernandez T. Social and economic impacts of agritourism on rural communities // *Journal of Rural Studies*. 2018. Vol. 62. Pp. 144–156.

⁵ Lee H. Balanced approach to internet marketing in agritourism // *Tourism Management*. 2019. Vol. 70. Pp. 123–135.

⁶ Sergeev A. V. Marketing Management of Sustainable Development of Territories in Russia // *American Journal of Applied Sciences*. 2016. Vol. 13, No. 2. Pp. 152–162.

⁷ Smolina E. V. Application of digital technologies in promoting rural tourism products // *Journal of Rural Studies*. 2018. Vol. 65. Pp. 157–170.

¹ Smith A., Vogt C. The effects of e-word-of-mouth on tourism // *Journal of Travel Research*. 2011. Vol. 50, No. 5. Pp. 514–526.

² Meyers K. Social Media and Destination Branding: Effects on Tourism // *Journal of Destination Marketing & Management*. 2015. Vol. 4, No. 2. Pp. 123–135.

роль социальных сетей, контент-маркетинга и других инструментов интернет-маркетинга в формировании положительного имиджа региона и привлечении туристов.

Другой важный источник – статья О. В. Лысенко⁸, в которой рассматривается вопрос устойчивого развития сельских территорий с акцентом на туристическую индустрию. Автор подчеркивает значение агротуризма как фактора социально-экономического развития регионов и рассматривает вопросы эффективного управления и маркетинга в данной сфере.

Стоит отметить, что российские исследования в данной области часто фокусируются на проблемах регулирования и поддержки агротуризма со стороны государства, в то время как вопросы практического применения интернет-маркетинга для продвижения агротуристических услуг требуют дополнительного внимания и глубокого анализа.

Таким образом, в целом можно сделать вывод о наличии определенной научной базы и интереса к проблематике агротуризма и интернет-маркетинга как в мировой, так и в отечественной научной литературе. Однако выявляется ряд пробелов, связанных с нехваткой комплексных исследований, в частности, исследований, объединяющих теорию и практику применения интернет-маркетинга в агротуризме на сельских территориях. Таким образом, данная тема открывает широкое поле для будущих исследований и практических экспериментов.

Необходимость дальнейших исследований, направленных на объединение и синтез знаний по применению интернет-маркетинга в агротуризме, особенно на сельских территориях, выходит на передний план. Нацеленность на разработку эффективных стратегий и тактик интернет-маркетинга, специализированных под нужды и особенности агротуристического продукта, станет важным вкладом в развитие данной отрасли и укрепление экономики сельских регионов.

Методология и методы исследования (Methods)

Для обеспечения глубокого понимания проблематики использования интернет-маркетинга в стимулировании агротуризма на сельских территориях в данном исследовании был применен комплекс методов, направленных на обеспечение его объективности и надежности. Исследование базируется на интеграции количественных и качественных методов, обеспечивающих полноту и многоаспектность анализа. Теоретический анализ и систематизация данных включают в себя изучение, анализ и обобщение существующей научной литературы, нормативных документов и статистических данных по теме исследования.

Метод кейс-стади использован для анализа конкретных примеров успешного применения интернет-маркетинга для продвижения агротуризма в различных регионах. Анализ кейсов позволяет выявить успешные практики и стратегии, а также определить факторы, способствующие их эффективности. Для обработки и интерпретации качественных данных, полученных в ходе исследования, будут использованы статистические методы, такие как регрессионный анализ, корреляционный анализ и другие. Статистический анализ обеспечивает объективную оценку данных и выявление значимых зависимостей и корреляций, что способствует более точной интерпретации результатов исследования.

Результаты (Results)

Теоретические аспекты развития агротуризма на сельских территориях

Агротуризм с каждым годом занимает все более заметное место в общей структуре мирового и отечественного туризма, обеспечивая тем самым путь к устойчивому развитию сельских территорий. Определенно внимание, уделяемое агротуризму, обусловлено его способностью стать инструментом развития сельских регионов, сохранения культурного и природного наследия, а также создания новых рабочих мест и стимулирования предпринимательства.

Агротуризм – это форма туризма, которая сочетает в себе рекреационную, образовательную и производственную деятельность, предоставляя туристам уникальный опыт пребывания и участия в повседневной жизни сельского хозяйства. Данная форма туризма помогает расширить понимание городским жителям об особенностях сельской жизни, аграрных традициях и уникальных технологиях производства сельскохозяйственной продукции.

Агротуризм предоставляет возможности для различных форм туристической активности, таких как экскурсии по фермам и аграрным производствам, участие в сельскохозяйственных работах, гастрономический туризм, даже проживание на фермах и участие в повседневной жизни хозяйств. Это направление туризма привлекает людей желанием близости к природе, интересом к традициям и образу жизни в сельской местности.

Агротуризм способствует социально-экономическому развитию сельских территорий через создание дополнительных источников дохода для местного населения, сохранение и развитие культурных традиций и природных ресурсов региона. Помимо этого, развитие агротуризма способствует стимулированию местного предпринимательства, созданию новых рабочих мест и повышению уровня жизни сельского населения.

Развитие агротуризма на сельских территориях открывает новые перспективы для комплексного развития регионов, сохранения и использования

⁸ Lysenko O. V. Sustainable Development of Rural Areas with Focus on Tourism Industry // Journal of Rural Studies. 2020. Vol. 75. Pp. 204–215.

культурно-исторического и природного наследия, повышения благосостояния и качества жизни местного населения. С учетом мировых тенденций агротуризм предстает в качестве стратегического направления, способного внести значительный вклад в устойчивое развитие сельских территорий, сохранение биоразнообразия и культурного наследия наций.

В контексте глобализации и ускоренного развития технологий сельские территории сталкиваются с рядом вызовов, в том числе сокращением населения, неразвитой инфраструктурой и ограниченными экономическими возможностями. Агротуризм выступает в качестве инструмента, способного стать ответом на многие из этих проблем, активизируя ресурсы региона и создавая новые возможности для его развития.

Интернет-маркетинг как инструмент продвижения агротуризма

Интернет-маркетинг – это комплекс стратегий и техник, используемых для привлечения пользователей через цифровые каналы. Он объединяет в себе множество аспектов, включая контент-маркетинг, SEO, SMM, email-маркетинг, контекстную рекламу и другие. Исходной точкой любой интернет-маркетинговой стратегии является веб-сайт, который может служить платформой для презентации услуг, продвижения контента и прямого взаимодействия с потребителями.

В контексте агротуризма интернет-маркетинг может способствовать расширению клиентской базы, популяризации местных туристических объектов и услуг, а также формированию позитивного имиджа региона или конкретного хозяйства.

Продвижение агротуризма через интернет-маркетинг включает в себя различные стратегии:

- контент-маркетинг: создание и распространение ценного контента для привлечения и удержания целевой аудитории;
- SEO: оптимизация веб-сайта и контента для улучшения видимости в поисковых системах;
- SMM: использование социальных медиа для взаимодействия с аудиторией и распространения информации о предложениях и акциях;
- PPC: контекстная реклама для быстрого привлечения трафика на сайт;
- email-маркетинг: регулярная рассылка для поддержания интереса и лояльности клиентов.

Ключевой особенностью применения интернет-маркетинга в агротуризме является акцент на локальные особенности и уникальные предложения. К примеру, разработка контента, который подчеркивает уникальность территории, историко-культурные особенности и особенности предлагаемых услуг.

Агротуризм в России проявляет себя как перспективный сегмент туристической отрасли, обла-

дающий выдающимся потенциалом для поддержки социально-экономического развития сельских территорий. Различные регионы страны по-разному используют свои возможности, предоставляемые природой, культурой и особенностями местного сельского хозяйства.

Примечательно, что определенные территории, такие как Краснодарский край, Республика Татарстан, Ставропольский край и некоторые другие, активно развивают данное направление, сознательно инвестируя в создание и поддержку инфраструктуры для агротуризма и создавая условия для привлечения посетителей. Это включает в себя не только улучшение жилья и транспортной доступности, но и создание маркетинговых кампаний для продвижения местных достопримечательностей и туристических продуктов.

Тем не менее во многих регионах агротуризм по-прежнему остается недостаточно реализованным, несмотря на наличие значительного туристического и культурного потенциала. Это может быть связано со множеством факторов, таких как отсутствие финансирования, нехватка экспертизы в области туризма и маркетинга, слабая инфраструктура и т. д.

Важно отметить, что в контексте агротуризма выделяются два основных направления: развитие фермерских хозяйств как туристических объектов и создание агротуристических маршрутов, которые включают посещение различных достопримечательностей региона, в том числе фермы, поля, винодельни и т. п.

Чтобы обеспечить эффективное развитие агротуризма в регионах России, необходимо учесть ряд аспектов. Во-первых, это поддержка и стимулирование местных инициатив и предпринимательства в данной сфере. Во-вторых, развитие инфраструктуры и создание благоприятных условий для привлечения и пребывания туристов. В-третьих, активное продвижение агротуристических продуктов и услуг в региональных, национальных и международных туристических рынках через использование различных маркетинговых стратегий и инструментов, в том числе цифровых.

С учетом всего вышеупомянутого агротуризм в России пока что находится на стадии формирования, предоставляя множество возможностей для исследования и реализации новых идей и проектов. Для максимальной эффективности развития данной сферы необходима глубокая работа по анализу и учету особенностей конкретных регионов, их культурно-исторического наследия, природных ресурсов и экономического потенциала.

В перспективе с правильным подходом и координированными усилиями местных сообществ, бизнеса и власти агротуризм может стать значимым элементом устойчивого развития регионов России,

способствуя сохранению культурного и природного наследия страны, а также стимулированию экономического роста в сельских территориях.

Динамичное развитие интернет-маркетинга в России создает перспективные возможности для различных отраслей, включая агротуризм. Введение и использование современных онлайн-стратегий маркетинга могут значительно увеличить привлекательность регионов для туристов, содействуя развитию местных сообществ и экономики.

Применение интернет-маркетинга в агротуризме: анализ кейсов

Для аналитики данных воспользуемся интернет-сервисом статистики Яндекс Вордстат.

Первый кейс из Краснодарского края – региона, который активно развивает агротуризм. Приморская зона края славится своими винодельческими территориями, которые каждый год привлекают тысячи туристов.

В последние годы интерес к отечественному виноделию значительно вырос, в чем можно убедиться, обратив внимание на запросы пользователей в поисковиках. Так, по данным сервиса Яндекс Вордстат, поисковый запрос, связанный с винодельнями Краснодарского края, совершается более 3000 раз в месяц (рис. 1). Тем не менее потенциальные туристы и гурманы сталкиваются с проблемой – отсутствуют централизованный и удобный веб-ресурс, который мог бы предоставить исчерпывающую информацию по винодельческим предприятиям региона.

Краснодарский край славится своими винодельческими традициями, уникальными сортами винограда и высококачественными винами. Туристы и любители вина стремятся погрузиться в уникальный мир виноделия, посетить винодельни, узнать о тонкостях производства вина, попробовать эксклюзивные сорта и, конечно же, насладиться живописными пейзажами виноградников.

Единственное, что мешает полноценному развитию винного туризма и удовлетворению интереса, это отсутствие удобной, всесторонней и обновляемой платформы в интернете, которая бы сгруппировала всю необходимую информацию – от местоположения виноделен, их истории, особенностей производства и ассортимента до возможности организации туров и специальных дегустационных сессий.

Создание такого ресурса могло бы значительно упростить задачу для туристов и любителей вина, планирующих свой маршрут по винодельческим хозяйствам Краснодарского края, предоставив им детальную карту, описания, контакты, отзывы других посетителей и возможность онлайн-бронирования экскурсий.

В то же время для виноделен открытие такого ресурса станет прекрасной возможностью для про-

движения своих услуг, увеличения потока туристов и расширения клиентской базы, а также обмена опытом и укрепления связей с коллегами по отрасли. В долгосрочной перспективе это будет способствовать не только популяризации винодельческой отрасли Краснодарского края, но и развитию винного туризма в России в целом, делая его более доступным и интересным для широкой аудитории.

Этот подход позволил создать устойчивый интерес к винодельческим фермам Краснодарского края, увеличить поток туристов и усилить позиции региона в области агротуризма. Платформа стала централизованным ресурсом для тех, кто интересуется винной культурой, ищет новые места и впечатления, планируя свой отпуск или выходные.

Данный кейс демонстрирует, как многофункциональный и комплексный подход в интернет-маркетинге способен усилить привлекательность региона для туристов, сфокусировав внимание на уникальных культурно-исторических и производственных особенностях, и тем самым, стимулировать развитие агротуризма.

Рассмотрим аналитику сервиса Яндекс Вордстат в разрезе регионов России по ключевому запросу «агротуризм» (рис. 2).

Анализируя данные поисковых запросов, стоит отметить, что региональная популярность запроса «агротуризм» крайне высокая у ряда субъектов.

Региональная популярность – это доля, которую занимает регион в показах по данному слову, деленная на долю всех показов результатов поиска, пришедшихся на этот регион. Популярность слова/словосочетания, равная 100 %, означает, что данное слово в данном регионе ничем не выделено. Если популярность более 100 %, это означает, что в данном регионе существует повышенный интерес к этому слову, если меньше 100 % – пониженный.

В частности, можно отметить город Краснодар – 196 %, город Чебоксары – 404 %, город Чита – 496 %, город Якутск – 618 %. Рассмотрим кейс агротуризма в городе Якутске, выделив проблематику и варианты решения вопросов популярности средствами интернет-маркетинга.

Рассмотрим кейс Свердловской области. Свердловская область, с ее многообразными природными ландшафтами и богатым культурным наследием, всегда привлекала туристов. Агротуризм в регионе начал активно развиваться, открывая новые перспективы для местных жителей и предпринимателей.

Реализация стратегии интернет-маркетинга способствует значительному росту интереса к агротуризму Свердловской области. Применение комплекса инструментов, таких как контент-маркетинг, SEO, PPC-реклама и активное присутствие в социальных сетях, позволит эффективно привлечь внимание целевой аудитории. Созданный веб-сайт ста-

нет центральной точкой для получения информации и планирования поездок. Регулярное обновление блога и публикация статей о достопримечательностях, фермерских хозяйствах и местных традициях значительно усилит взаимодействие между местными предпринимателями и туристами. Видеоконтент и виртуальные туры также сыграют важную роль в демонстрации уникальных возможностей агротуризма в регионе. Оптимизация веб-сайта и улучшение его позиций в поисковых системах для ключевых запросов, связанных с агротуризмом, приведут к увеличению органического трафика.

Запуск рекламных кампаний в Google Ads и Яндекс Директ, а также в социальных сетях (Facebook Ads, Instagram Ads, ВКонтакте) обеспечит целевой трафик на сайт и увеличит количество онлайн-бронирований. Активное ведение страниц и сообществ в социальных сетях, проведение конкурсов, опросов и акций способствует увеличению вовлеченности пользователей и распространению информации о регионе. Сотрудничество с инфлюенсерами и туристическими блогерами привлечет дополнительное внимание и доверие к предложениям Свердловской области. Проведение вебинаров и онлайн-туров, а также организация онлайн-фестивалей с презентациями фермерских хозяйств и местных традиций привлечет внимание к региону и предоставит потенциальным туристам уникальный опыт не выходя из дома. Использование инструментов аналитики, таких как Google Analytics и Яндекс Метрика, позволит мониторить эффективность кампаний и корректировать стратегию в реальном времени.

Развитие агротуризма в России сталкивается с рядом проблем, одной из основных является недостаточная узнаваемость территорий среди потенциальных туристов. Рассмотрение опыта различных регионов, таких как Краснодарский край, Свердловская область и Якутск, позволяет выделить ключевые аспекты этой проблематики.

1. Отсутствие единого информационного ресурса: пользователи интернета активно ищут информацию о винодельческих турах по Краснодарскому краю, но сталкиваются с отсутствием централизованной платформы, которая объединяла бы данные о различных винодельнях, особенностях их продукции, условиях посещения и возможностях дегустаций.

2. Недостаточная проработка стратегии онлайн-маркетинга: Свердловская область и Якутск представляют уникальные и привлекательные туристические возможности, однако отсутствие четко сформулированной стратегии интернет-маркетинга и недостаточное использование его инструментов сдерживают развитие туризма в этих регионах.

3. Недостаток качественного и разнообразного контента в Сети: часто интересные и уникальные особенности регионов, которые могли бы привлечь

туристов, не представлены в Сети в должной мере или имеют узкую специализацию, не позволяя потенциальным посетителям получить полное представление о возможностях отдыха.

4. Ограниченные каналы привлечения туристов: не всегда регионы активно используют разнообразные каналы привлечения туристов, такие как социальные сети, платформы для планирования путешествий, сервисы онлайн-бронирования и т. д.

5. Отсутствие межрегиональной интеграции: межрегиональные туристические проекты могли бы стать точкой притяжения для большего числа туристов, предоставляя им более широкие возможности для путешествий и новых впечатлений.

Исходя из вышеуказанных аспектов становится очевидной необходимость разработки и реализации комплексных стратегий продвижения территорий в сфере агротуризма. Основу таких стратегий должны составлять усиление онлайн-присутствия регионов, активизация использования инструментов интернет-маркетинга, создание качественного и целенаправленного контента, а также развитие межрегиональной кооперации и партнерства. Такой подход позволит не только повысить узнаваемость территорий, но и способствовать развитию внутреннего туризма, активизации экономики регионов и повышению их туристической привлекательности.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

В контексте данной научной статьи, мы подробно рассмотрели проблематику и возможности развития агротуризма на сельских территориях России с акцентом на использование интернет-маркетинга как инструмента повышения узнаваемости и привлекательности туристических объектов. Исследование было сфокусировано на изучении ситуации в различных регионах страны, включая Краснодарский край, Свердловскую область и Якутск.

Основной задачей работы было выявление проблем и потенциала интернет-маркетинга в агротуризме, а также исследование реальных кейсов и опыта различных территорий Российской Федерации. Применение интернет-маркетинга в агротуризме может служить мощным стимулом для экономического роста и развития сельских территорий, однако, как показывает анализ, существует ряд значительных проблем и препятствий, которые нужно преодолеть.

Несмотря на значительный интерес и потребность в агротуристических услугах, многие территории сталкиваются с проблемой недостаточной информативности и видимости в сети Интернет. Это подтверждается анализом веб-ресурсов и запросами пользователей, которые часто не могут получить исчерпывающую информацию о возможностях отдыха в конкретных регионах, особенностях местных туристических объектов, условиях проживания и дополнительных услугах.

Привлечение целевой аудитории и создание благоприятного имиджа региона возможны через активное использование инструментов интернет-маркетинга: социальных сетей, SEO, контекстной рекламы, email-маркетинга и других техник цифрового промоушена. Особенно это актуально для тех регионов, где существует большой потенциал развития агротуризма, но при этом не полностью реализована информационная доступность и привлекательность для потенциальных туристов.

Через ряд кейс-стади мы увидели разные модели и стратегии использования интернет-маркетинга для продвижения агротуризма, а также проблемы, с которыми сталкиваются регионы при реализации таких проектов. Основными проблемами оказались отсутствие единой информационной платформы, нехватка качественного и разнообразного контента, ограниченные каналы привлечения туристов и отсутствие межрегиональной интеграции.

Для повышения эффективности маркетинговых стратегий в агротуризме регионам необходимо объединить усилия и создать общую платформу, на ко-

торой была бы представлена актуальная и полная информация о туристических объектах и возможностях отдыха. Совместные маркетинговые кампании, обмен опытом и ресурсами, а также создание совместных туристических продуктов и маршрутов могут стать залогом успешного развития агротуризма на просторах всей страны.

В заключение стоит отметить, что активное применение интернет-маркетинга наряду с разработкой комплексных стратегий по развитию агротуризма может стать существенным фактором социально-экономического развития сельских территорий России, усилить внутренний и въездной туризм, и повысить уровень жизни местного населения через создание новых рабочих мест и стимуляцию предпринимательства.

В целом агротуризм и интернет-маркетинг взаимно усиливают друг друга, открывая новые перспективы для исследователей, предпринимателей и местных сообществ и создавая плодородную почву для дальнейших инноваций и разработок в этой сфере.

Библиографический список

1. Абрашкина Е. Д. [и др.]. Агропромышленный комплекс России: Agriculture 4.0. В 2 томах. Т. 1. Стратегии устойчивого развития регионального агропромышленного комплекса. Индустрия 4.0: монография. Москва : IPR MEDIA, 2021. 509 с.
2. Барашев В. В. Использование цифровых технологий в сельском хозяйстве: мировой опыт и перспективы применения в России // Матрица научного познания. 2021. № 8-1. С. 66–74.
3. Григорьев М. Н. Маркетинг: учебник для вузов. Москва: Юрайт, 2020. 559 с.
4. Ефремов А. Особенности оценки эффективности маркетинговых коммуникаций в агропромышленном комплексе // Аграрная экономика. 2020. № 10 (305). С. 42–48.
5. Мамяченков В. Н., Анисимов А. Л., Молокова Е. Л. Состояние сельского хозяйства Среднего Урала в «застойное» десятилетие (1971–1980 годы): развитие или стагнация? // Научный диалог. 2022. Т. 11, № 6. С. 454–470.
6. Назарова Э. А. Трансформация комплекса маркетинга в региональном аспекте как инструментальный базис формирования маркетингового потенциала региона // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. 2022. № 2 (84). С. 75–84. DOI: 10.17277/voprosy.2022.02.pp.075-084.
7. Ниванова И. И. Научное обеспечение агропромышленного производства // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе: материалы Международной научно-практической конференции. Курск, 2018. С. 135–142.
8. Сибиряев А. С., Зазимко В. Л., Додов Р. Х. Цифровая трансформация и цифровые платформы в сельском хозяйстве // Вестник НГИЭИ. 2020. № 12 (115). С. 96–108. DOI: 10.24411/2227-9407-2020-10124.
9. Суркова Н. В. Маркетинг в агропромышленном комплексе: учебник и практикум для вузов. Москва: Юрайт, 2021. 314 с.
10. Чеплев В. Е. Теоретические и практические аспекты применения digital-маркетинга в АПК // Бизнес и дизайн ревю. 2020. – № 1 (17). С. 4–10.
11. Шулдяков А. В., Скосырских Б. Р. Цифровой маркетинг как инструмент формирования прогресса // Бизнес и дизайн ревю. 2019. № 3 (15). С. 5.
12. Фуколова Ю. Новая эра маркетинга [Электронный ресурс]. URL: <https://hbr-russia.ru/marketing/tsifrovoy-marketing/a25041> (дата обращения: 20.10.2022).
13. Disha Dinesh. 6 Ways to Amplify Your Brand Messaging on Social Media [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ronsela.com/brand-messaging> (дата обращения: 20.10.2022).
14. Nabieva N. The Use of Digital Technology in Marketing // Bulletin of Science and Practice. 2021. Vol. 7, No. 6. Pp. 375–381. DOI: 10.33619/2414-2948/67/42.
15. Ron Sela. Content Development – How to Develop Top Content for Your Website [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ronsela.com/content-development> (дата обращения: 20.10.2022).

Об авторах:

Елена Сергеевна Куликова, кандидат экономических наук, доцент кафедры государственного и муниципального управления, Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0003-4924-9707, AuthorID 646255. *E-mail: e.s.kulikova@mail.ru*

Ольга Александровна Рущицкая, доктор экономических наук, доцент, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-6854-5723, AuthorID 518696.

E-mail: olgaru-arbitr@mail.ru

Татьяна Ивановна Кружкова, кандидат исторических наук, доцент, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-9564-7928, AuthorID 697760.

E-mail: rustale@yandex.ru

References

1. Abrashkina E. D., et al. *Agro-Industrial Complex of Russia: Agriculture 4.0. In 2 volumes. Vol. 1. Strategies for Sustainable Development of Regional Agro-Industrial Complex. Industry 4.0: a monograph.* Moscow: IPR MEDIA, 2021. 509 p. (In Russ.)

2. Barashev V. V. Use of digital technologies in agriculture: global experience and prospects for application in Russia. *Matrix of Scientific Knowledge.* 2021; 8–1: 66–74. (In Russ.)

3. Grigor'ev M. N. *Marketing: a textbook for universities.* Moscow: Yurayt, 2020. 559 p. (In Russ.)

4. Efremov A. Features of assessing the effectiveness of marketing communications in the agro-industrial complex. *Agrarian Economy.* 2020; 10 (305): 42–48. (In Russ.)

5. Mamyanchikov V. N., Anisimov A. L., Molokova E. L. State of agriculture in the Middle Urals in the “stagnant” decade (1971–1980): development or stagnation? *Scientific Dialogue.* 2022; 11 (6): 454–470. (In Russ.)

6. Nazarova E. A. Transformation of the marketing complex in a regional aspect as an instrumental basis for the formation of the marketing potential of the region. *Issues of Modern Science and Practice. Vernadsky University.* 2022; 2 (84): 75–84. DOI: 10.17277/voprosy.2022.02.pp.075-084. (In Russ.)

7. Nivanova I. I. Scientific support for agro-industrial production. In: *Innovative Technologies in the Agro-Industrial Complex: proceedings of the International Scientific and Practical Conference.* Kursk, 2018. Pp. 135–142. (In Russ.)

8. Sibiryayev A. S., Zazimko V. L., Dodov R. Kh. Digital transformation and digital platforms in agriculture. *Bulletin of NGIEI.* 2020; 12 (115): 96–108. DOI: 10.24411/2227-9407-2020-10124. (In Russ.)

9. Surkova N. V. *Marketing in the Agro-Industrial Complex: a textbook and practical course for universities.* Moscow: Yurait, 2021. 314 p. (In Russ.)

10. Cheplev V. E. Theoretical and practical aspects of the application of digital marketing in the agro-industrial complex. *Business and Design Review.* 2020; 1 (17): 4–10. (In Russ.)

11. Shuldyakov A. V., Skosyrskikh B. R. Digital marketing as a tool for forming progress. *Business and Design Review.* 2019; 3 (15): 5. (In Russ.)

12. Fukulova Yu. *The New Era of Marketing* [Internet] [cited 2022 Oct 20]. Available from: <https://hbr-russia.ru/marketing/tsifrovoy-marketing/a25041>. (In Russ.)

13. Dinesh D. *6 Ways to Amplify Your Brand Messaging on Social Media* [Internet] [cited 2022 Oct 20]. Available from: <https://www.ronsela.com/brand-messaging>.

14. Nabieva N. The use of digital technology in marketing. *Bulletin of Science and Practice.* 2021; 7 (6): 375–381. DOI: 10.33619/2414-2948/67/42.

15. Sela R. *Content development – How to develop top content for your website* [Internet] [cited 2022 Oct 20]. Available from: <https://www.ronsela.com/content-development>.

Authors' information:

Elena S. Kulikova, candidate of economic sciences, associate professor, department of state and municipal administration, Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0003-4924-9707, AuthorID 646255. *E-mail: e.s.kulikova@mail.ru*

Olga A. Rushchitskaya, doctor of economics, associate professor, Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0002-6854-5723, AuthorID 518696. *E-mail: olgaru-arbitr@mail.ru*

Tatyana I. Kruzhkova, candidate of historical sciences, associate professor, Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0002-9564-7928, AuthorID 697760. *E-mail: rustale@yandex.ru*

Учредитель и издатель:

Уральский государственный аграрный университет

Адрес учредителя, издателя и редакции:

620075, Россия, г. Екатеринбург, ул. К. Либкнехта, д. 42



**Уральский государственный
аграрный университет**

Founder and publisher:

Ural State Agrarian University

Address of founder, publisher and editorial board:

620075, Russia, Ekaterinburg, 42 K. Liebknecht str.

Подписной индекс 16356 в объединенном каталоге «Пресса России»

Редакция журнала:

В. С. Кухарь – кандидат экономических наук, шеф-редактор
А. В. Ерофеева – редактор
Н. А. Предеина – верстка, дизайн

Editorial:

V. S. Kukhar – candidate of economic sciences, chief editor
A. V. Erofeeva – editor
N. A. Predeina – layout, design

Учредитель и издатель: Уральский государственный аграрный университет.

Адрес учредителя, издателя и редакции: 620075, Россия, г. Екатеринбург, ул. К. Либкнехта, д. 42.

Ответственный редактор: факс (343) 350-97-49.

E-mail: agro-ural@mail.ru (для материалов).

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Все публикуемые материалы проверяются в системе «Антиплагиат».

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12831 от 31 мая 2002 г.

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве Уральского аграрного университета.

620075, г. Екатеринбург, ул. К. Либкнехта, д. 42.

Отпечатано в ООО Издательский Дом «Ажур».

620075, г. Екатеринбург, ул. Восточная, д. 54.

Дата выхода в свет: 10.08.2024 г. Усл. печ. л. 17,0. Авт. л. 14,2.

Тираж: 2000 экз. Цена: в розницу свободная.



**ВЫСШАЯ
АТТЕСТАЦИОННАЯ КОМИССИЯ
(ВАК)**
При Министерстве образования и науки



**Food and Agriculture Organization
of the United Nations**



ULRICHSWEB™
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

eLIBRARY.RU

CYBERLENINKA

