

Ежемесячный
теоретический
и научно-практический
журнал

Учрежден Министерством
сельского хозяйства РФ
и ООО «Редакция журнала
«Достижения науки и техники АПК»

Основан в июле 1987 года

Достижения науки и техники АПК

4, апрель, 2026, том 40

**Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации
на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.**

**Журнал входит в базу данных российских научных журналов
Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science**

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
Коршунов А. В.

доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН (Москва, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
Алфёров А. А.
Балакирев Н. А.

доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, зам. академика-секретаря Отделения сельскохозяйственных наук РАН (Москва, Россия)
доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, зав. кафедрой Московской государственной академии ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА им. К.И. Скрябина (Москва, Россия)

Баталова Г. А.

доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, заместитель директора Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого (Киров, Россия)

Бунин М. С.
Васенев И. И.
Ганиева И. А.

доктор сельскохозяйственных наук, научный руководитель ЦНСХБ (Москва, Россия)
доктор биологических наук, заведующий кафедрой РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева
доктор экономических наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского института аграрных проблем и информатики имени А. А. Никонова (Москва, Россия)

Гостев А. В.
Гудковский В. А.
Гулюкин М. И.
Завалин А. А.
Завражнов А. И.
Зиновьева Н. А.
Каличкин В. К.

доктор сельскохозяйственных наук, директор Курского федерального аграрного научного центра (Курск, Россия)
доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, зав. отделом Федерального научного центра им. И.В. Мичурина (Мичуринск, Россия)
доктор ветеринарных наук, академик РАН, зав.отделом ВНИИ экспериментальной ветеринарии (ВИЭВ) (Москва, Россия)
доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, зав. лабораторией ВНИИ агрохимии (Москва, Россия)
доктор технических наук, академик РАН, главный научный сотрудник Мичуринского ГАУ (Мичуринск, Россия)
доктор биологических наук, академик РАН, директор ВИЖ имени Л.К. Эрнста (Москва, Россия)
доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН (Новосибирск, Россия)

Лачуга Ю. Ф.
Лебедев С. В.

доктор технических наук, академик РАН, член президиума РАН (Москва, Россия)
доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, директор Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий РАН (Оренбург, Россия)

Лобачевский Я. П.
Лукин Н. Д.

доктор технических наук, академик РАН, академик-секретарь Отделения сельского хозяйства РАН (Москва, Россия)
доктор технических наук, заместитель директора ВНИИ крахмалопроductов – филиала Федерального исследовательского центра картофеля имени А.Г. Лорха (Москва, Россия)

Лукин С. В.

доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН, профессор Белгородского государственного национального исследовательского университета (Белгород, Россия)

Лукомец В. М.
Мазитов Н. К.
Надежкин С. М.
Синеговская В. Т.
Солошенко В. А.

доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, директор Национального центра зерна имени П.П. Лукьяненко (Краснодар, Россия)
доктор технических наук, член-корреспондент РАН, профессор Казанского ГАУ (Казань, Россия)
доктор биологических наук, зав. лабораторией ВНИИ селекции и семеноводства овощных культур (Москва, Россия)
доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, главный научный сотрудник Дальневосточного НИИСХ (Хабаровск, Россия)
доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, главный научный сотрудник Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН (Новосибирск, Россия)

Сысуев В. А.

доктор технических наук, академик РАН, научный руководитель Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого (Киров, Россия)

Тютюнов С. И.
Харченко П. Н.
Шкиль Н. А.

доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, директор Белгородского Федерального аграрного научного центра РАН (Белгород, Россия)
доктор биологических наук, академик РАН, научный руководитель ВНИИ сельскохозяйственной биотехнологии (Москва, Россия)
доктор ветеринарных наук, заведующий лабораторией Института экспериментальной ветеринарии Сибири и Дальнего Востока СФНЦА РАН (Новосибирск, Россия)

Шоба С. А.
Юлдашбаев Ю. А.

доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, зав. кафедрой МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)
доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, профессор РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева (Москва, Россия)

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Полные тексты статей доступны на сайте электронной научной библиотеки eLIBRARY.RU: <http://elibrary.ru>.

Адрес редакции:
107996, ГСП-6, Москва, Б-78,
Садовая-Спасская, 18
«Достижения науки и техники АПК»
Почтовый адрес:
101000, г.Москва, Моспочтамт, а/я 166
<http://www.agroaprk.ru>
E-mail: agroaprk@mail.ru

Журнал зарегистрирован
в Министерстве печати
и информации
Российской Федерации
регистрационный номер
ПИ №77-7665 от 30 марта 2001 года

Отпечатано в типографии
ООО «САМ Полиграфист»
109316, г. Москва, Волгоградский проспект,
42, корп. 5.
Заказ
Перепечатка материалов
только с письменного разрешения редакции

Monthly theoretical
and scientific practical journal

“Achievements of Science and Technology
in Agribusiness” was founded by the
Ministry of Agriculture of Russian
Federation and OOO “Editorial Board of
the Journal “Achievements of Science and
Technology in Agro-Industrial Complex”

“Achievements of Science and Technology
in Agribusiness”
was founded in July 1987.

Achievements of Science and Technology in Agribusiness

4, April, 2026, vol. 40

**The journal is included in the List of Leading Reviewed Scientific Journals
and Publications, where the main scientific results of doctoral
and Ph.D. theses must be published.**

**The journal is indexed in the Russian Science Citation Index (RSCI) database
on the Web of Science platform**

EDITOR-IN-CHIEF Korshunov A. V.

Doctor of Sciences (agriculture), corresponding member of the Russian Academy of Sciences

EDITORIAL BOARD Alferov A. A.

Doctor of Sciences (biology), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, deputy academician-secretary of the Department of Agriculture of the RAS (Moscow, Russia)

Balakirev N. A.

Doctor of Sciences (agriculture), member of the Russian Academy of Sciences, head of department of the K. I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology – K. I. Skryabin MVA (Moscow, Russia)

Batalova G. A.

Doctor of Sciences (agriculture), member of the Russian Academy of Sciences, deputy director of the N.V. Rudnitsky Federal Agrarian Scientific Center of the North-East (Kirov, Russia)

Bunin M. S.

Doctor of Sciences (agriculture), scientific supervisor of the Central Scientific Agricultural Library (Moscow, Russia)

Ganieva I. A.

Doctor of Sciences (economics), leading research fellow of the A. A. Nikonov All-Russian Institute of Agrarian Problems and Informatics (Moscow, Russia)

Gostev A. V.

Doctor of Sciences (agriculture), director of the Federal Agricultural Kursk Research Center (Kursk, Russia)

Gudkovskii V. A.

Doctor of Sciences (agriculture), member of the Russian Academy of Sciences, head of division of the I. V. Michurin Federal Scientific Center (Michurinsk, Russia)

Gulyukin M. I.

Doctor of Sciences (veterinary science), member of the Russian Academy of Sciences, director of the All-Russian Research Institute of Experimental Veterinary Science (Moscow, Russia)

Kalichkin V. K.

Doctor of Sciences (agriculture), chief research fellow of the Siberian Federal Research Center of Agrobiotechnology of the RAS (SFRCA of the RAS) (Novosibirsk, Russia)

Kharchenko P. N.

Doctor of Science (biology), member of the Russian Academy of Sciences, scientific supervisor of the All-Russian Research Institute of Agricultural Biotechnology (Moscow, Russia)

Lachuga Yu. F.

Doctor of Sciences (engineering), member of the Russian Academy of Sciences, member of the presidium RAS (Moscow, Russia)

Lebedev S. V.

Doctor of Science (biology), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, director of the Federal Scientific Center of Biological Systems and Agrotechnologies, Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia)

Lobachevskii Ya. P.

Doctor of Sciences (engineering), member of the Russian Academy of Sciences, academician-secretary of the Department of Agriculture of the RAS (Moscow, Russia)

Lukin N. D.

Doctor of Sciences (engineering), deputy director of the All-Russian Research Institute of Starch Products, the branch of the Lorkh Federal Research Center of Potato Breeding (Moscow, Russia)

Lukin S. V.

Doctor of Sciences (agriculture), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor of Belgorod State National Research University (Belgorod, Russia)

Lukomets V. M.

Doctor of Sciences (agriculture), member of the Russian Academy of Sciences, director Luk'yanenko National Center for Grain Breeding (Krasnodar, Russia)

Mazitov N. K.

Doctor of Sciences (engineering), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor of Kazan State Agrarian University (Kazan, Russia)

Nadezhkin S. M.

Doctor of Science (biology), head of laboratory of the All-Russian Research Institute of Vegetable Breeding and Seed Production (Moscow, Russia)

Shkil' N. A.

Doctor of Sciences (veterinary science), deputy director, Institute of Experimental Veterinary Science of Siberia and the Far East of the Siberian Federal Science Center of Agricultural Biotechnology of the RAS (Novosibirsk, Russia)

Shoba S. A.

Doctor of Sciences (biology), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, head of department of the Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

Sinegovskaya V. T.

Doctor of Sciences (agriculture), member of the Russian Academy of Sciences, chief research fellow of the Far Eastern Research Institute of Agriculture (Khabarovsk, Russia)

Soloshenko V. A.

Doctor of Sciences (agriculture), member of the Russian Academy of Sciences, chief research fellow of the Siberian Federal Research Center of Agricultural Biotechnology of the RAS (Novosibirsk, Russia)

Sysuev V. A.

Doctor of Sciences (engineering), member of the Russian Academy of Sciences, scientific supervisor of the N.V. Rudnitsky Federal Agrarian Scientific Center of the North-East (FASC of the North-East) (Kirov, Russia)

Tyutyunov S. I.

Doctor of Sciences (agriculture), member of the Russian Academy of Sciences, director of the Belgorod Federal Agrarian Scientific Center of the RAS (Belgorod, Russia)

Vasenev I. I.

Doctor of Science (biology), head of department, of Russian State Agrarian University – Ti-miryazev Moscow Agricultural Academy (Moscow, Russia)

Yuldashbaev Yu. A.

Doctor of Sciences (agriculture), member of the Russian Academy of Sciences, professor of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)

Zavalin A. A.

Doctor of Sciences (agriculture), member of the Russian Academy of Sciences, head of laboratory of the All-Russian Research Institute of Agrochemistry (Moscow, Russia)

Zavrazhnov A. I.

Doctor of Sciences (engineering), member of the Russian Academy of Sciences, chief research fellow of Michurinsk State Agrarian University (Michurinsk, Russia)

Zinov'eva N. A.

Doctor of Science (biology), member of the RAS, director of the L.K. Ernst All-Russian Research Institute of Animal Husbandry (Moscow, Russia)

The journal is included in the Russian Science Citation Index (RSCI).

Full texts of articles are available on the site of electronic scientific library eLIBRARY.RU: <http://elibrary.ru>.

Editorial Office:

The “Achievements of Science and Technology
in Agro-Industrial Complex” Editorial Office
18 Sadovaya-Spasskaya, B78,
Moscow, GSP6, 107996

Address for the correspondence:

POB 166, Moscow post office, Moscow, 101000
<http://www.agroapk.ru>
Email: agroapk@mail.ru

The journal is registered
in Ministry of Press
and Information
of Russian Federation,
the registration number
№777665 of March 30, 2001

It was printed in typography OOO “SAM Poligrafist”,
Volgogradskii prospekt, 42, korp. 5, Moscow, 109316
Order
Reprinting of materials is allowed
only by written authorization of the Editorial Board

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО

- Н. П. Масютенко, А. А. Дюкарева, М. Н. Масютенко, А. В. Кузнецов.** Особенности содержания и состава подвижных гумусовых веществ в агрономически ценных агрегатах чернозема типичного при применении агробiotехнологий 5
- А. Н. Золотухин, О. Г. Чуян, Г. П. Глазунов, Л. Н. Караулова, О. А. Митрохина, В. В. Двойных.** Влияние агроэкологических условий на продуктивность озимой пшеницы в лесостепной зоне ЦЧР 12
- Ж. Н. Минченко, В. И. Лазарев.** Влияние микроэлементных удобрений на симбиотическую деятельность и продуктивность сои в условиях ЦЧР 19
- Т. А. Асеева, О. Л. Шепель, М. П. Хорняк, А. Ю. Шевченко.** Результаты изучения коллекции сои в условиях Среднего Приамурья 25
- А. А. Холодков, А. С. Степанов, М. П. Разгонова.** Сравнительный анализ антиоксидантной активности семян и надземных частей сортов сои хабаровской селекции 34
- Л. В. Омелянюк, А. М. Асанов, А. Ж. Саурбаев.** Селекция чечевицы в ФГБНУ «Омский аграрный научный центр» 41
- М. А. Фоменко, Т. А. Олейникова, Е. А. Бабровская.** Комплексная оценка сортов озимой мягкой пшеницы на основе параметров адаптивности и селекционных индексов 48

ЗООТЕХНИЯ И ВЕТЕРИНАРИЯ

- А. Н. Стефутин, Н. В. Сивкин.** Совершенствование технологии дорастивания молодняка зубров (*Bison bonasus* L.) на естественных пастбищах в центральном зубровом питомнике 55
- А. Н. Фролов, О. А. Завьялов, А. С. Копылов.** Оценка качества говядины, полученной от молодняка разных сезонов рождения и убоя, по комплексу физико-химических и питательных показателей 62
- Е. И. Тарасова, Е. В. Яушева, Е. А. Сизова.** Влияние полиморфизма CSN2 на молочную продуктивность и минеральный статус коров красной степной породы Оренбургской области 69
- Л. Г. Коршунова, Е. И. Куликов, Д. М. Дмитренко, Р. В. Карапетян, А. К. Кравченко, В. Н. Мартынова.** Ассоциация полиморфиз-

AGRICULTURE AND CROP PRODUCTION

- N. P. Masyutenko, A. A. Dyukareva, M. N. Masyutenko, A. V. Kuznetsov.** Features of the content and composition of mobile humic substances in agronomically valuable aggregates of typical chernozem using agrobiotechnology 5
- A. N. Zolotukhin, O. G. Chuyan, G. P. Glazunov, L. N. Karaulova, O. A. Mitrokhina, V. V. Dvoynikh.** The influence of agroecological conditions on the productivity of winter wheat in the forest-steppe zone of the Central Chernozem Region .. 12
- Zh. N. Minchenko, V. I. Lazarev.** The influence of microelement fertilizers on the symbiotic activity and productivity of soybeans in the Central Chernozem Region 19
- T. A. Aseeva, O. L. Shepel, M. P. Khornyak, A. Yu. Shevchenko.** Results of the study of soybean collection under the conditions of the Middle Amur region 25
- A. A. Kholodkov, A. S. Stepanov, M. P. Razgonova.** Comparative analysis of antioxidant activity of seeds and aerial parts of soybean varieties bred in Khabarovsk 34
- L. V. Omel'yanuk, A. M. Asanov, A. Zh. Saurbaev.** Lentil breeding at the FSBSI «Omsk Agricultural Scientific Center» 41
- M. A. Fomenko, T. A. Oleinikova, E. A. Babrovskaya.** Comprehensive assessment of winter soft wheat varieties based on adaptability parameters and selection indices 48

ANIMAL AND VETERINARY SCIENCE

- A. N. Stefutin, N. V. Sivkin.** Improving the technology of rearing young bison (*Bison bonasus* L.) on natural pastures in the central bison nursery 55
- A. N. Frolov, O. A. Zavyalov, A. S. Kopylov.** Evaluation of the quality of beef obtained from young animals of different seasons of birth and slaughter based on a set of physical, chemical and nutritional indicators 62
- E. I. Tarasova, E. V. Yausheva, E. A. Sizova.** The influence of CSN2 polymorphism on milk productivity and mineral status of Red Steppe cows in the Orenburg region 69
- L. G. Korshunova, E. I. Kulikov, D. M. Dmitrenko, R. V. Karapetyan, A. K. Kravchenko, V. N. Martynova.** Association of polymorphisms in the

мов в генах GHRL, GAST, SCTR с конверсией корма и продуктивными показателями мясных кур селекции СГЦ «Смена»	76
Е. О. Кузнецова, А. И. Белоусов, О. Ю. Опарина, А. С. Красноперов, А. Е. Черницкий. Иммуногематологические показатели у коров в зависимости от функционального состояния печени и стадии производственного цикла	83
E. O. Kuznetsova, A. I. Belousov, O. Yu. Oparina, A. S. Krasnoperov, A. E. Chernitskiy. Immunohematological parameters in cows depending on the functional state of the liver and the stage of the production cycle	83

ПЕРЕРАБОТКА

Д. И. Титова, И. М. Меджидов, В. А. Харламов, А. Н. Павлов. Экспериментальное исследование интенсивности и временной стабильности ЭПР сигнала гаммаоблученных специй	91
---	----

PROCESSING

D. I. Titova, I. M. Medzhidov, V. A. Kharlamov, A. N. Pavlov. Experimental study of the intensity and temporal stability of the EPR signal of gamma-irradiated spices	91
--	----

Особенности содержания и состава подвижных гумусовых веществ в агрономически ценных агрегатах чернозема типичного при применении агробиотехнологий

Н. П. МАСЮТЕНКО, А. А. ДЮКАРЕВА, М. Н. МАСЮТЕНКО, А. В. КУЗНЕЦОВ

Курский федеральный аграрный научный центр, ул. Карла Маркса, 70 б, Курск, 305021, Российская Федерация

Резюме. Исследования проводили с целью изучения особенностей распределения содержания и состава подвижных гумусовых веществ в агрономически ценных агрегатах чернозема типичного слабоэродированного при применении агробиотехнологий. Работу выполняли в 2022–2024 гг. в Курской области. Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов: измельченная побочная продукция сельскохозяйственных культур (ПП); ПП + 10 кг д.в. N на 1 т ПП (ПП+N); ПП + микробиологические препараты (ПП+МБП); ПП+МБП+N. Контролем служил вариант без применения ПП, N и МБП. Побочную продукцию после обработки микробиологическими препаратами и внесения азота заделывали в слой почвы 10...12 см. Основную обработку проводили через 1,0...1,5 месяца. Основу МБП составляли грибы *Trichoderma longibrachiatum* и консорциум бактерий родов *Lactobacillus*, *Azotobacter* и др. В рамках изучаемых агробиотехнологий этими препаратами обрабатывали семена, почву, посевы и ПП. В варианте ПП+МБП выявлена тенденция к повышению содержания углерода подвижных гумусовых веществ (Спгв) в агрегатах 5...3, 2...1 и 1...0,5 мм, подвижных гуминовых кислот (Спгк) – в агрегатах 2...1 мм, подвижных фульвокислот (Спфк) – в агрегатах 5...3 и 1...0,5 мм, по отношению к контролю. Добавление N к ПП+МБП способствовало достоверному увеличению содержания и накоплению в агрегатах 5...3 мм Спгв, Спгк и Спфк, в агрегатах 2...1 и 1...0,5 мм – Спгв и Спфк, по сравнению с контролем. В варианте ПП+МБП+N установлена очень высокая положительная корреляция между содержанием Спгв и диаметром агрегатов ($r=0,99$). В контрольном варианте выявлена тенденция к повышению содержания Спгв в агрегатах 2...1 мм, Спгк – в агрегатах 1...0,5 мм, Спфк – в агрегатах 2...1 мм. Изученные агрономически ценные агрегаты отличаются большей обогащенностью Спгк (33,1...38,9 %) и лучшим качеством ПГВ, чем нефракционированная почва (31,7...34,7 %), особенно агрегаты 5...3 мм.

Ключевые слова: агробиотехнологии; микробиологические препараты; побочная продукция; азотные минеральные удобрения; чернозем типичный слабоэродированный; агрономически ценные агрегаты, подвижные гумусовые вещества, подвижные гуминовые кислоты, подвижные фульвокислоты.

Сведения об авторах: Н. П. Масютенко, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник (e-mail: vninp@mail.ru); А. А. Дюкарева, аспирант (e-mail: ok.anan@yandex.ru); М. Н. Масютенко, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник (e-mail: avatar_dark@mail.ru); А. В. Кузнецов, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник (e-mail: kuznecov.1983@mail.ru).

Для цитирования: Особенности содержания и состава подвижных гумусовых веществ в агрономически ценных агрегатах чернозема типичного при применении агробиотехнологий / Н. П. Масютенко, А. А. Дюкарева, М. Н. Масютенко и др. // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. № 4. С. 5–11. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_5.

Features of the content and composition of mobile humic substances in agronomically valuable aggregates of typical chernozem using agrobiotechnology

N. P. Masyutenko, A. A. Dyukareva, M. N. Masyutenko, A. V. Kuznetsov

Federal Agricultural Kursk Research Center, ul. Karla Marksa, 70 b, Kursk, 305021, Russian Federation

Abstract. The study was conducted to investigate the distribution characteristics of the content and composition of mobile humic substances in agronomically valuable aggregates of typical slightly eroded chernozem using agrobiotechnology. The work was carried out in 2022–2024 in the Kursk region. The experimental design involved studying the following options: crushed by-products of agricultural crops (CP); CP + 10 kg of active ingredient N per 1 ton of CP (CP + N); CP + microbiological preparations (CP + MBP); CP + MBP + N. The control option was without the use of CP, N, or MBP. After treatment with microbiological preparations and the application of nitrogen, the by-products were incorporated into the soil layer of 10–12 cm. The main treatment was carried out after 1.0–1.5 months. The MBP were based on *Trichoderma longibrachiatum* fungi and a consortium of bacteria of the *Lactobacillus*, *Azotobacter*, and other genera. Within the framework of the studied agrobiotechnologies, these preparations were used to treat seeds, soil, crops, and CP. In the CP+MBP variant, a tendency towards an increase in the carbon content of mobile humic substances (C_{mhs}) in aggregates of 5–3, 2–1, and 1–0.5 mm, mobile humic acids (C_{mha}) in aggregates of 2–1 mm, and mobile fulvic acids (C_{mfa}) in aggregates of 5–3 and 1–0.5 mm, compared to the control, was revealed. The addition of N to CP+MBP contributed to a reliable increase in the content and accumulation of C_{mhs} , C_{mha} , and C_{mfa} in aggregates of 5–3 mm, and C_{mhs} and C_{mfa} in aggregates of 2–1 and 1–0.5 mm, compared to the control. In the CP+MBP+N variant, a very high positive correlation was established between the C_{mhs} content and aggregate diameter ($r=0.99$). In the control variant, a tendency towards an increase in the C_{mhs} content was revealed in aggregates of 2–1 mm, C_{mha} – in aggregates of 1–0.5 mm, C_{mfa} – in aggregates of 2–1 mm. The studied agronomically valuable aggregates were characterised by a higher enrichment in C_{mha} (33.1–38.9%) and better quality of the mobile humic substances than the unfractionated soil (31.7–34.7%), especially in aggregates of 5–3 mm.

Keywords: agrobiotechnology; microbiological preparations; by-products; nitrogen mineral fertilizers; typical slightly eroded chernozem; agronomically valuable aggregates, mobile humic substances, mobile humic acids, mobile fulvic acids.

Author Details: N. P. Masyutenko, D. Sc. (Agr.), chief research fellow (e-mail: vninp@mail.ru); A. A. Dyukareva, post graduate student (e-mail: ok.anan@yandex.ru); M. N. Masyutenko, Cand. Sc. (Agr.), senior research fellow (e-mail: avatar_dark@mail.ru); A. V. Kuznetsov, Cand. Sc. (Agr.), senior research fellow (e-mail: kuznecov.1983@mail.ru).

For citation: Masyutenko NP, Dyukareva AA, Masyutenko MN, et al. [Features of the content and composition of mobile humic substances in agronomically valuable aggregates of typical chernozem using agrobiotechnology]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(4):5–11. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_5.

Агрегатобразование выступает одним из важнейших механизмов физической стабилизации и связывания органического углерода в почве, при котором создаётся её сложная структура [1, 2]. Почвенная структура защищает органическое вещество, ограничивая его доступность для редуцентов, и влияет на скорость его оборачиваемости и плодородие почв [3, 4]. В то же время содержание органического углерода в почве служит одним из основных факторов, контролирующих устойчивость её агрегатов [5, 6, 7]. По мнению исследователей, основная часть органического углерода ($C_{орг}$) сосредоточена в макроагрегатах [7, 8]. Потери $C_{орг}$ почвой больше связаны с разрушением макроагрегатов, нежели микроагрегатов [9]. Их разрушение становится ведущей причиной потерь $C_{орг}$ в результате землепользования. При сокращении доли крупных агрегатов в распахиваемых почвах происходит их обеднение потенциально-минерализуемыми формами гумусовых веществ.

Особую роль в формировании почвенной структуры играет активная часть гумуса – подвижные гумусовые вещества [10, 11, 12]. Они выступают молодой и наиболее трансформируемой фракцией почвенного органического вещества, непрочно связанной с минеральной частью и обогащенной азотом ($C:N < 12$) [13]. Н. Л. Кураченко в своих исследованиях подтверждает роль подвижных гумусовых соединений в процессах возникновения, развития, стабилизации и деградации структурных элементов в агрегатах [14]. Однако участие новообразованных гумусовых веществ в формировании агрономически ценной и водопрочной структуры изучено еще недостаточно.

С другой стороны, современная агроэкологическая концепция воспроизводства почвенного органического вещества предполагает закрепление в почве углерода органических субстратов (секвестрацию) со снижением их минерализации [15, 16, 17]. Следует подчеркнуть, что образование крупных агрегатов служит необходимым условием секвестрации (связывания) органического углерода в почвах [18, 19, 20]. К крупным относят агрегаты размером $> 0,25$ мм.

В последние годы актуальна разработка агробиотехнологий, способствующих увеличению секвестрации углерода (C sequestration), то есть переводу CO_2 атмосферы в живое органическое вещество растений (фотосинтез) с последующей трансформацией формирующейся мортмассы в гумус с периодом полного разложения (минерализации) составляющих его новообразованных компонентов от 10 до 100 лет [14]. Агробиотехнологии необходимы для технологического обеспечения биоэкономики.

Нами предложены агробиотехнологии, включающие применение микробиологических препаратов (МБП) (на основе почвенного гриба и спор *Trichoderma longibrachiatum* и консорциума бактерий рода *Lactobacillus* и др.) и измельченной побочной продукции (ПП) сельскохозяйственных культур без или с азотными минеральными удобрениями [21, 22, 23]. МБП обрабатывают семена, почву перед посевом, посевы во время вегетации, измельченную побочную продукцию сельскохозяйственных культур перед заделкой в почву, компостируют в течение 1,0...1,5 месяца, затем проводят основную обработку. При применении этих агробиотехнологий проис-

ходит улучшение структурного состояния почвы [22, 23].

Исходя из сказанного, изучение содержания подвижных гумусовых веществ и их состава в агрономически ценных макроагрегатах различного диаметра при применении агробиотехнологий, актуально и перспективно. Это особенно важно для выяснения механизмов секвестрации органического углерода и стабилизации его в почвенных агрегатах. Эти вопросы сегодня недостаточно изучены.

Цель исследований – изучить особенности распределения содержания и состава подвижных гумусовых веществ в агрономически ценных агрегатах чернозема типичного слабоэродированного при применении агробиотехнологий.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в полевом стационарном опыте с агробиотехнологиями в 2022–2024 гг. на опытном поле Курского ФАНЦ (с. Панино, Медвенский р-н, Курская обл.), расположенном в середине склона северной экспозиции с уклоном $1,5...3,0^\circ$, в звене зернопропашного севооборота: овес посевной сорта Борец – люпин белый сорта Дега – ячмень сорта Суздавец. Схема опыта включала следующие варианты: 1) без ПП, N и МБП (контроль); 2) ПП; 3) ПП + 10 кг д.в. N на 1 т побочной продукции (ПП+N); 4) ПП + МБП; 5) ПП + МБП + N.

В опыте применяли микробиопрепараты на основе почвенного гриба и спор *Trichoderma longibrachiatum* (ПР-1) и консорциума бактерий *Lactobacillus plantarum* 34, *Lactobacillus fermentum* 27, *Lactobacillus lactis* subsp. *lactis* AMS, *Saccharomyces cerevisiae* (carlsbergensis), *Azotobacter chroococcum* A-41, *Bacillus megaterium* Ф-3 (ПР-2). Во избежание конфликта интересов марки препаратов и производители не указаны. Микробиопрепаратами проводили обработку семян (2 л/т ПР-1 + 1 л/т ПР-2), почвы перед посевом (5 л/га ПР-1 + 2 л/га ПР-2), посевов (2 л/га ПР-1 + 1 л/га ПР-2) 2 раза в течение вегетации (овса посевного – в фазе кущения и фазе трубкования; люпина белого – в фазе всходов и фазе ветвления; ячменя – в фазе кущения и через 2 недели после выхода в трубку), измельченной побочной продукции (5 л/га ПР-1 + 2 л/га ПР-2). Обработанную МБП или N измельченную побочную продукцию заделывали в почву на глубину 10...12 см, а через 1,0...1,5 месяца проводили основную обработку почвы.

Общая площадь опыта – 0,52 га, размер делянки – 240 м² (40 м × 6 м), учетная площадь – 152 м² (38 м × 4 м), количество вариантов – 5, повторность – 3-кратная, размещение вариантов – систематическое. Технология возделывания сельскохозяйственных культур – общепринятая для региона, за исключением изучаемых приемов.

В опыте в качестве азотных минеральных удобрений использовали аммиачную селитру, которую вносили навесным разбрасывателем РН-0,8. Обработку измельченных растительных остатков биопрепаратами после уборки культур проводили опрыскивателем ОП-2000/24, заделку измельченных растительных остатков в почву – дисковыми боронами на глубину 10...12 см.

Почва опытного участка – чернозем типичный среднеэродированный тяжелосуглинистый на лессовидном карбонатном суглинке. В слое почвы 0...20 см содержание гумуса (по Тюрину) составляло $5,24 \pm 0,07$ %;

подвижного фосфора (по Чирикову) – $11,4 \pm 0,3$ мг/100 г; подвижного калия (по Чирикову) – $9,9 \pm 0,3$ мг/100 г; обменного кальция – $21,1 \pm 0,3$ мг-экв./100 г, обменного магния – $5,2 \pm 0,1$ мг-экв./100 г (трилонометрическим методом); реакция среды слабокислая ($pH_{вод.} - 6,3 \pm 0,1$; $pH_{KCl} - 5,3 \pm 0,1$, потенциометрическим методом).

Для изучения содержания и состава подвижных гумусовых веществ в агрономически ценных фракциях в опыте отбирали ненарушенные образцы почвы массой по 2 кг по диагонали делянки из 3 точек лопатой в слое 0...20 см после уборки урожая перед заделкой в почву измельченной побочной продукции сельскохозяйственных культур и через 1,0...1,5 месяца перед основной обработкой почвы. Свежие образцы почвы просеивали через набор сит 5, 3, 2, 1, 0,5 мм. Оставляли для изучения три фракции агрономически ценных агрегатов: 5...3, 2...1, 1...0,5 мм. В выделенных почвенных фракциях и в нефракционированной почве определяли содержание и состав подвижных гумусовых веществ – в 0,1 н вытяжке NaOH без декальцирования в модификации Почвенного института им. В. В. Докучаева [12], влажность – общепринятым термостатно-весовым методом.

Оценку гидротермических условий проводили по авторской методике (*Методика проведения комплексной оценки воздействия агротехнологий на плодородие, здоровье и устойчивость черноземов* / Н. П. Масютенко, Н. А. Чуян, М. Н., Масютенко и др. Курск: ФГБНУ «Курский ФАНЦ», 2024. 37 с.). Установлено, что 2022 (ГТК=1,13) и 2023 (ГТК=1,15) годы характеризовались обеспеченным увлажнением, 2024 г. был засушливым (ГТК=0,78). Отклонения ГТК от среднепогодной в 2022 и 2023 гг. – низкие, а в 2024 г. – выше среднего. Неустойчивость ГТК по месяцам отмечена в 2022 и 2023 гг. как высокая, а в 2024 г. – средняя. Среднее многолетнее значение ГТК для территории опытного поля – 1,1 ед.

Экспериментальные данные обработаны методами дисперсионного и корреляционного анализов с использованием программных средств Microsoft office EXCEL, STATISTIKA, STATGRAF.

Результаты и обсуждение. Ранее нами показано, что агрегаты 5...3, 2...1 и 1...0,5 мм в черноземе типичном составляют 58...78 % от агрономически ценных агрегатов (10...0,25 мм) [22, 23].

За период с осени 2022 г. по осень 2024 г. (5 сроков) среднее содержание подвижных гумусовых веществ (Спгв) в агрономически ценных почвенных агрегатах 5...3 мм в слое почвы 0...20 см было наибольшим при применении ПП+МБП+N (табл. 1). Оно достоверно превышало содержание Спгв в контроле на 567 мг/кг. Также за этот период времени применение ПП+МБП+N способствовало повышению содержания подвижных гуминовых кислот в агрономически ценных агрегатах почвы 5...3 мм, его средние значения достоверно превышали таковое в контроле на 285 мг/кг.

При использовании с измельченной побочной продукцией микробиологических препаратов отмечена тенденция к увеличению содержания Спгв, по сравнению с контролем, в агрегатах 5...3 мм на 235 мг/кг при $HCP_{05} = 334$ мг/кг и содержания Спгк на 74 мг/кг при $HCP_{05} = 200$ мг/кг.

Достоверное влияние на содержание подвижных фульвокислот (Спфк) в агрегатах 5...3 мм почвы за изучаемый период оказало применение ПП+МБП+N

Таблица 1. Содержание и состав подвижных гумусовых веществ в агрономически ценных агрегатах чернозема типичного слабокислого (среднее за период с 01.09 2022 г. по 11.11.2024 г., $n=5$)

Вариант	Спгв, мг/кг	Спгк, мг/кг	Спфк, мг/кг	Спгк/ Спфк
5...3 мм				
Контроль	3776	1403	2372	0,61
ПП	3853	1410	2443	0,57
ПП + N	3692	1266	2426	0,52
ПП + МБП	4011	1477	2534	0,59
ПП + МБП + N	4343	1688	2655	0,64
HCP_{05}	334	200	144	0,05
2...1 мм				
Контроль	3852	1433	2399	0,60
ПП	3780	1364	2479	0,56
ПП + N	3697	1261	2479	0,52
ПП + МБП	3999	1501	2477	0,60
ПП + МБП + N	4226	1615	2661	0,63
HCP_{05}	270	186	131	0,05
1...0,5 мм				
Контроль	3791	1450	2341	0,63
ПП	3864	1379	2485	0,55
ПП + N	3668	1215	2453	0,49
ПП + МБП	3998	1422	2577	0,55
ПП + МБП + N	4201	1613	2587	0,63
HCP_{05}	266	186	131	0,06

и ПП+МБП. При этом содержание Спфк было выше, чем в контроле, при применении ПП+МБП+N на 283, а ПП+МБП – на 162 мг/кг.

При применении ПП + МБП + N выявлена тенденция к увеличению отношения углерода подвижных гуминовых кислот к углероду подвижных фульвокислот (Спгк/Спфк), характеризующего качество подвижных гумусовых веществ, в агрегатах 5...3 мм за период исследования на 0,03 при $HCP_{05} = 0,05$.

Содержание подвижных гумусовых веществ (Спгв) в агрономически ценных почвенных агрегатах 2...1 мм и 1...0,5 мм также было наибольшим в опыте при применении ПП+МБП+N, и достоверно превышало содержание в контроле соответственно на 374 и на 410 мг/кг (см. табл.1). Также за этот период времени применение ПП+МБП+N способствовало повышению содержания подвижных фульвокислот в рассматриваемых агрономически ценных агрегатах почвы. Их средние значения были достоверно выше, чем в контроле, в агрегатах 2...1 мм на 262 мг/кг и в агрегатах 1...0,5 мм – на 246 мг/кг.

При использовании ПП+МБП и ПП+МБП+N, по сравнению с контролем, отмечена лишь тенденция к увеличению содержания Спгк в агрегатах 2...1 мм (при $HCP_{05} = 186$ мг/кг): при ПП+МБП – на 68 мг/кг, ПП+МБП+N – на 182 мг/кг. В агрегатах 1...0,5 мм тенденция к увеличению содержания Спгк выявлена только при применении ПП+МБП+N, где оно было на 182 мг/кг больше, чем в контроле, при $HCP_{05} = 186$ мг/кг.

Следует отметить, что при применении ПП+N отмечена тенденция к снижению содержания Спгв и Спгк, по сравнению с использованием только ПП, в агрегатах 5...3 мм, соответственно на 161 мг/кг ($HCP_{05} = 334$ мг/кг) и на 144 мг/кг ($HCP_{05} = 200$ мг/кг), в агрегатах 2...1 мм – на 83 мг/кг ($HCP_{05} = 270$ мг/кг) и на 103 мг/кг ($HCP_{05} = 186$ мг/кг), в агрегатах 1...0,5 мм

на 196 мг/кг ($HCP_{05}=266$ мг/кг) и на 164 мг/кг ($HCP_{05}=186$ мг/кг). Содержание Спфк в агрегатах 5...3 мм и 2...1 мм в вариантах ПП и ПП+N примерно одинаково, различия составляют 2...16 мг/кг, а в агрегатах 1...0,5 мм незначимо больше на 32 мг/кг в варианте с ПП.

При использовании ПП+МБП+N отмечена слабая тенденция снижения отношения Спгк/Спфк от 0,64 до 0,63 в ряду агрегатов 5...3 мм → 2...1 мм → 1...0,5 мм. Тенденции снижения отношения Спгк/Спфк в ряду агрегатов 5...3 мм → 1...0,5 мм отмечены и в других вариантах, за исключением контроля, в котором выявлена тенденция к увеличению отношений Спгк/Спфк в агрегатах 1...0,5 мм.

В контроле установлена тенденция к повышению Спгв в агрегатах 2...1 мм, по сравнению с агрегатами размером 5...3 мм и 1...0,5 мм (рис. 1), соответственно на 77 и 61 мг/кг ($HCP_{05}=105$ мг/кг), тогда как при применении измельченной побочной продукции, напротив, наименьшее в опыте содержание Спгв отме-

нию с агрегатами 5...3 мм на 47 мг/кг и с агрегатами 2...1 мм на 17 мг/кг при $HCP_{05}=62$ мг/кг (рис. 2). В ряду агрегатов 5...3 мм → 2...1 мм → 1...0,5 мм отмечена тенденция к снижению в них содержания Спгк при применении ПП+МБП+N с 1688 до 1613 мг/кг ($HCP_{05}=111$ мг/кг), а ПП+N – с 1266 до 1215 мг/кг ($HCP_{05}=73$ мг/кг). В остальных вариантах изменения в содержании Спгк по агрегатам были незначительными.

Зависимости содержания подвижных фульвокислот от размера агрономически ценных агрегатов в слое 0...20 см чернозема типичного слабоэродированного в изучаемых вариантах различны (рис. 3). В контроле и варианте с применением ПП+N содержание Спфк в агрегатах 2...1 мм незначимо превышало таковое в агрегатах 5...3 мм на 27 мг/кг и на 58 мг/кг в агрегатах 1...0,5 мм ($HCP_{05}=75$ мг/кг).

При внесении измельченной побочной продукции отмечена тенденция к увеличению содержания Спфк с уменьшением диаметра изучаемых агрегатов на 42 мг/кг при $HCP_{05}=58$ мг/кг. При добавлении к измельченной побочной продукции N отмечена тенденция к снижению содержания Спфк в агрегатах 5...3 мм и 1...0,5 мм на 50 и 23 мг/кг ($HCP_{05}=65$ мг/кг). Содержание Спфк в агрегатах 2...1 мм такое же, как при применении ПП без N.

При использовании с ПП микробиологических препаратов, по сравнению с агрегатами 2...1 мм, выявлена тенденция к повышению содержания Спфк в агрегатах 5...3 мм на 43 мг/кг и достоверное повышение его в агрегатах 1...0,5 мм на

Рис. 1. Зависимость содержания подвижных гумусовых веществ от размера агрономически ценных агрегатов в слое 0...20 см чернозема типичного слабоэродированного:

■ – 5...3 мм, ■ – 2...1 мм, ■ – 1...0,5 мм.

чено в агрегатах 2...1 мм, а в агрегатах 5...3 мм и 1...0,5 мм – тенденция к повышению на 73 и 83 мг/кг ($HCP_{05}=118$ мг/кг).

При использовании измельченной побочной продукции с N и с МБП значимых различий в содержании Спгв в изучаемых почвенных агрегатах не установлено. Выявлено недостоверное снижение содержания Спгв от 4343 до 4226 мг/кг ($HCP_{05}=141$ мг/кг) при применении ПП+МБП+N в ряду агрегатов: 5...3 мм → 2...1 мм → 1...0,5 мм. Установлена очень высокая положительная корреляция содержания Спгв с диаметром изучаемых агрегатов ($r=0,99$).

В контроле отмечена тенденция к повышению содержания Спгк в агрегатах 1...0,5 мм, по сравне-

100 мг/кг ($HCP_{05}=100$ мг/кг). То есть отмечено накопление подвижных фульвокислот в агрегатах 5...3 мм и 1...0,5 мм.

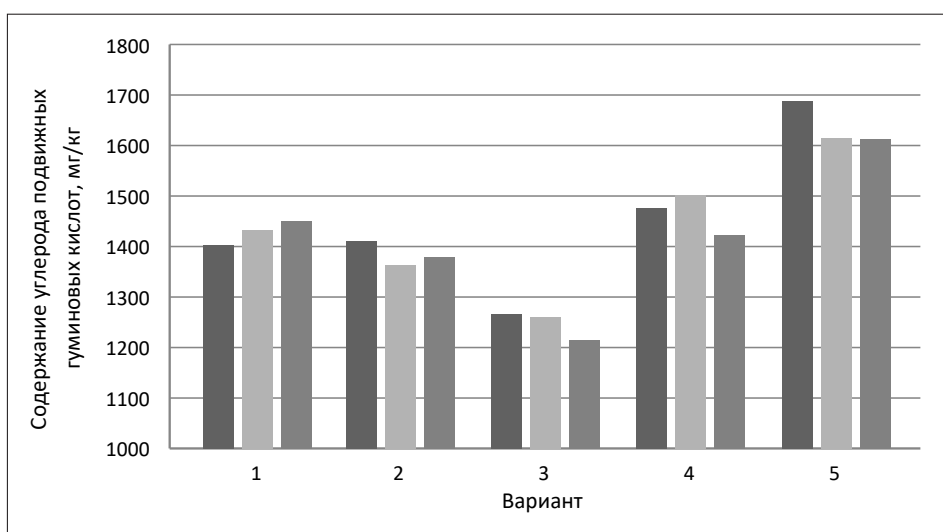
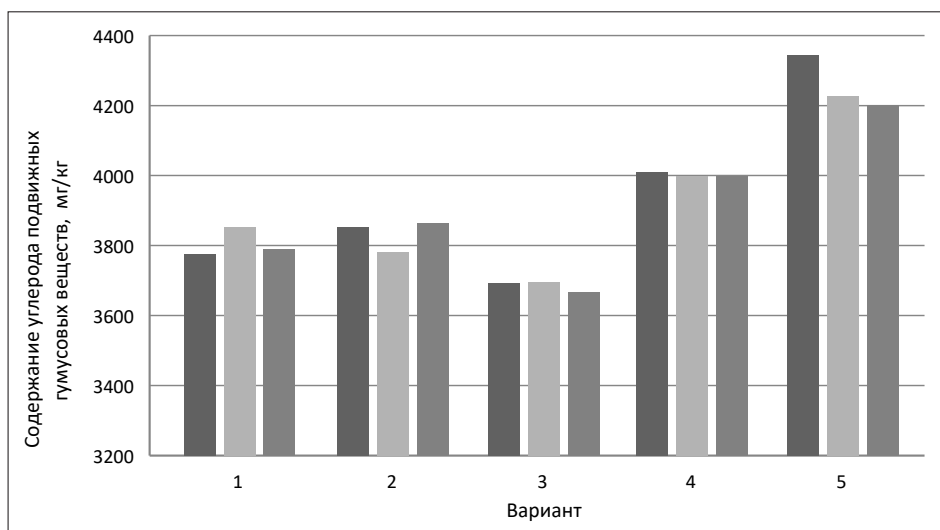


Рис. 2. Зависимость содержания подвижных гуминовых кислот от размера агрономически ценных агрегатов в слое 0...20 см чернозема типичного слабоэродированного:

■ – 5...3 мм, ■ – 2...1 мм, ■ – 1...0,5 мм.

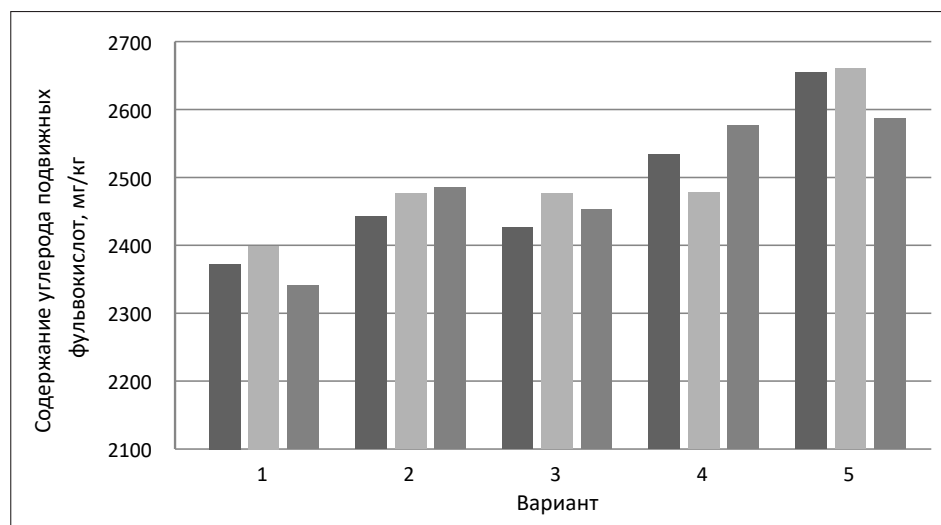


Рис. 3. Зависимость содержания подвижных фульвокислот от размера агрономически ценных агрегатов в слое 0...20 см чернозема типичного слабоэродированного: ■ – 5...3 мм, □ – 2...1 мм, ▒ – 1...0,5 мм.

При внесении ПП с N и МБП выявлена тенденция к накоплению Спфк в агрегатах 5...3 мм и 2...1 мм, по сравнению с агрегатами 1...0,5 мм на 68 и 74 мг/кг. Следует отметить, что содержание Спфк в агрегатах 5...3 мм и 2...1 мм превышает таковое в варианте ПП+МБП на 121 и 110 мг/кг, а его содержание в агрегатах 1...0,5 мм примерно одинаково при обеих технологиях.

Таблица 2. Содержание и состав подвижных гумусовых веществ в нефракционированном черноземе типичном слабоэродированном (среднее за период с 01.09.2022 г. по 11.11.2024 г., n=5)

Вариант	Спгв, мг/кг	Спгк, мг/кг	Спфк, мг/кг	Спгк/Спфк
Контроль	3862	1211	2651	0,46
ПП	4083	1354	2729	0,51
ПП + N	3496	1086	2410	0,45
ПП + МБП	3815	1312	2503	0,53
ПП + МБП + N	4404	1639	2765	0,59
НСР ₀₅	438	268	167	0,07

Особенности распределения Спфк по почвенным фракциям зависят от изучаемых факторов. Применение ПП способствует увеличению Спфк в агрегатах 1...0,5 мм, добавление N (ПП+N) – его снижению в агрегатах 5...3 мм и 1...0,5 мм. Применение ПП+МБП обеспечивает повышение Спфк в агрегатах 5...3 мм и 1...0,5 мм, а ПП+МБП+N – в агрегатах 5...3 мм и 2...1 мм.

Изучение содержания и состава подвижных гумусовых веществ в нефракционированной почве за этот период показало, что закономерности, выявленные

при исследовании агрегатов, по влиянию на содержание в них Спгв, Спгк, Спфк, изучаемых факторов, сохранились (табл. 2). Наибольшее в опыте влияние на содержание и состав подвижных гумусовых веществ в нефракционированной почве оказало применение ПП+МБП+N, выражающееся в значимом повышении величины изучаемых показателей, по сравнению с контролем.

Следует отметить, что в некоторых вариантах (контроле, ПП, ПП+МБП+N) содержание Спгв и Спфк в нефракционированной почве несколько превышает таковое в агрегатах. Из этого

следует, что их повышенное содержание может быть и в других неизучаемых фракциях.

С другой стороны, выявлено, что содержание Спгк выше в агрегатах 5...3, 2...1, 1...0,5 мм, чем в нефракционированной почве. Следовательно, изучаемые агрегаты отличаются большей обогащенностью Спгк, чем нефракционированная почва. Отсюда и более низкие значения отношения Спгк/Спфк в нефракционированной почве, и достоверное его увеличение, по сравнению с контролем, при применении ПП+МБП и ПП+МБП+N на 0,07 и 0,13 при $НСР_{05}=0,07$ ед.

Во всех вариантах опыта отмечено, что в составе подвижных гумусовых веществ агрономически ценных агрегатов за изучаемый период содержалось больше подвижных гуминовых кислот, чем в неразделенной на структурные отделности почве (табл. 3). Если в нефракционированной почве содержание Спгк составляло 31,7...34,7 % от Спгв, то в изучаемых структурных почвенных отделностях – от 33,1 до 38,9 %. Следовательно, агрономически ценные агрегаты обогащены подвижными гуминовыми кислотами, из них в большей степени агрегаты 5...3 мм (34,3...38,9 %).

В нефракционированной почве при применении ПП+МБП+N выявлено достоверное увеличение Спгк в составе подвижных гумусовых веществ, по сравнению с контролем, на 1,9 %. В агрегатах 5...3 мм и 2...1 мм установлена тенденция к увеличению Спгк в составе Спгв на 1,7 % при $НСР_{05}=2,5$ % и на 1,0 % при $НСР_{05}=2,5$ %, по сравнению с контролем, а в агрегатах 1...0,5 мм различия незначительны.

Таблица 3. Состав подвижных гумусовых веществ в нефракционированной почве и в агрономически ценных агрегатах (среднее за период с 01.09.2022 г. по 11.11.2024 г.), %

Вариант	Почва нефракционированная		Агрономически ценные агрегаты					
			5...3 мм		2...1 мм		1...0,5 мм	
	Спгк	Спфк	Спгк	Спфк	Спгк	Спфк	Спгк	Спфк
Контроль	32,8	67,2	37,2	62,8	37,2	62,3	38,3	61,7
ПП	31,7	68,3	36,6	63,4	36,1	65,5	35,7	64,3
ПП + N	32,4	67,6	34,3	65,7	34,1	67,0	33,1	66,9
ПП + МБП	33,3	66,7	36,8	63,2	37,5	61,9	35,6	64,4
ПП + МБП + N	34,7	65,3	38,9	61,1	38,2	63,0	38,4	61,6
НСР ₀₅	1,5	1,5	2,1	2,1	2,1	2,5	2,5	2,5

Выводы. Впервые выявлены особенности распределения содержания и состава подвижных гумусовых веществ в агрономически ценных агрегатах в слое 0...20 см чернозема типичного слабородированного при применении агробиотехнологий, необходимые для понимания механизмов связывания в них органического углерода молодой фракции лабильной части гумусовых веществ. При опрыскивании на протяжении трех лет измельченной побочной продукции после уборки сельскохозяйственных культур микробиологическими препаратами с последующей заделкой их в слой почвы 0...12 см на 1,0...1,5 месяца и дальнейшим проведением основной обработки почвы выявлено достоверное увеличение содержания Спфк в агрегатах 5...3 мм, по сравнению с контролем, на 162 мг/кг.

Добавление к МБП при обработке измельченной побочной продукции 10 кг д.в. N на 1 т обеспечило достоверное повышение содержания подвижных гумусовых веществ в агрономически ценных почвенных агрегатах 5...3 мм, по сравнению с контролем, на 567 мг/кг, подвижных гуминовых кислот – на 285 мг/кг; подвижных фульвокислот – на 283 мг/кг. При использовании сочетания ПП+МБП+N установлено, что очень высокая положительная корреляция между

содержанием Спгв и диаметром изучаемых агрегатов ($r=0,99$).

Агрономически ценные агрегаты (5...3, 2...1, 1...0,5 мм), особенно размером 5...3 мм, отличаются большей обогаченностью Спгк (от 33,1 до 38,9 %), чем нефракционированная почва (от 31,7 до 34,7 %). Наибольшее в опыте влияние на содержание и состав подвижных гумусовых веществ в нефракционированной почве оказало применение ПП+МБП+N.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансируется за счет средств бюджета Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Курский федеральный аграрный научный центр» по теме государственного задания № FGZU-2026-0002. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. *Microbial community structure varies across soil organic matter aggregate pools during tropical land cover change* / A. P. Smith, E. Marin-Spiotta, M.A. de Graaff, et al. // *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. Vol. 77. P. 292–303. doi: 10.1016/j.soilbio.2014.05.030.
2. Взаимосвязь размера агрегатов, содержания дисперсного органического вещества и разложения растительных остатков в почве / В. М. Семенов, Т. Н. Лебедева, Н. Б. Паутова и др. // *Почвоведение*. 2020. № 4. С. 430–443. doi: 10.31857/S0032180X20040139.
3. Elliott E.T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils // *Soil Science Society of America Journal*. 1986. Vol. 50. P. 627–633.
4. Компонентный состав органического вещества воздушно-сухих и водоустойчивых макроагрегатов 2–1 мм типичного чернозема в условиях контрастного земледелия / Б. М. Козут, З. С. Артемьева, Н. П. Кириллова и др. // *Почвоведение*. 2019. № 2. С. 161–170. doi: 10.1134/S0032180X19020084.
5. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility / S. Li, X. Gu, J. Zhuang, et al. // *Soil and Tillage Research*. 2016. Vol. 155. P. 199–206. doi: 10.1016/j.still.2015.08.009.
6. Carbon and nutrient mineralization dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues / J. R. Sarker, B. P. Singh, A. L. Cowie, et al. // *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. Vol. 116. P. 22–38. doi: 10.1016/j.soilbio.2017.09.030.
7. Carbon and nitrogen mineralization in hierarchically structured aggregates of different size / C. Bimüller, O. Kreyling, A. Kölbl, et al. // *Soil and Tillage Research*. 2016. Vol. 160. P. 23–33. doi: 10.1016/j.still.2015.12.011.
8. Семенов В. М., Лебедева Т. Н., Паутова Н. Б. Дисперсное органическое вещество в необрабатываемых и пахотных почвах // *Почвоведение*. 2019. № 4. С. 440–450. doi: 10.1134/S0032180X19040130.
9. Effect of soil aggregate size and long-term contrasting tillage, stubble and nitrogen management regimes on CO₂ fluxes from a Vertisol / S. H. Reeves, J. Somasundaram, W. J. Wang, et al. // *Geoderma*. 2019. Vol. 337. P. 1086–1096. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.11.022.
10. Масютенко Н. П., Дубовик Е. В. Связь содержания и состава органического вещества чернозема типичного с размером почвенных агрегатов и их водопрочностью // *Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации*. М.: Изд-во МГУ, 2003. С. 78–80.
11. Дубовик Е. В., Дубовик Д. В. Взаимосвязь содержания углерода органических соединений и структурного состояния чернозема типичного // *Почвоведение*. 2019. № 2. С. 171–183.
12. Связь структурно-агрегатного состава чернозема типичного слабородированного с содержанием и составом подвижных гумусовых веществ при разложении растительных остатков / М. Н. Масютенко, Н. П. Масютенко, А. В. Кузнецов и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 7. С. 5–11.
13. Рекомендации для исследования баланса и трансформации органического вещества при сельскохозяйственном использовании и интенсивном окультуривании почв / Сост. К. В. Дьяконова. М.: Почвенный институт им. В. В. Докучаева, 1984. 96 с.
14. Кураченко Н. Л., Александрова С. В. Подвижные гумусовые вещества в пространственной изменчивости агрегатного уровня структурной организации черноземов // *Вестник КрасГАУ*. 2012. № 8 (71). С. 29–34.
15. Деаэрация и почвенная секвестрация углерода / Б. М. Козут, В. М. Семёнов, З. С. Артемьева и др. // *Агрохимия*. 2021. № 5. С. 3–13. doi: 10.31857/S0002188121050070.
16. Soil Quality Refurbishment through Carbon Sequestration in Climate Change: A Review / V. Kumar, K. Sharma, V. Sharma, et al. // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017. Vol. 6. P. 1210–1223. doi: 10.20546/ijcmas.2017.605.131.
17. Семёнов В. М., Козут Б. М., Иванов А. Л. Почвенная секвестрация углерода в агроландшафтах: продовольственный императив климатической повестки // *Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева*. 2025. № 124. С. 11–69. doi: 10.19047/0136-1694-2025-124-10-69.
18. Šimansky V., Bajčan D. Stability of soil aggregates and their ability of carbon sequestration // *Soil Water Res.* 2014. Vol. 9. No. 3. P. 111–118. doi: 10.17221/106/2013-SWR.

19. Chemical structure of soil organic matter and its role in aggregate formation in haplic chernozem under the contrasting land use variants / Z. Artemyeva, N. Danchenko, B. Kogut, et al. // *Catena*. 2021. Vol. 204. P. 105403. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816221002629>. doi: 10.1016/j.catena.2021.105403.
20. Rice straw serves as additional carbon source for rhizosphere microorganisms and reduces root exudate consumption / S. A. Maarastawi, K. Frindte, P. L. E. Bodelier, et al. // *Soil Biology and Biochemistry*. 2019. Vol. 135. P. 235–238. doi: 10.1016/j.soilbio.2019.05.007.
21. Эффективность связывания органического углерода в черноземе типичном слабоэродированном при применении биопрепаратов / Н. П. Масютенко, А. В. Кузнецов, М. Н. Масютенко и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2023. № 2. С. 63–67.
22. Влияние биопрепаратов на почвенное органическое вещество, структурное и биологическое состояние чернозема типичного слабоэродированного: коллективная монография / Н. П. Масютенко, А. В. Кузнецов, Н. А. Чуйан и др. Курск: ФГБНУ «Курский ФАНЦ», 2022. 217 с.
23. Влияние агробиотехнологий на структурное состояние чернозема типичного слабоэродированного / М. Н. Масютенко, Н. П. Масютенко, А. А. Дюкарева и др. // *Земледелие*. 2026. № 1. С. 8–13. doi: 10.24412/0044-3913-2026-1-1-48.

References.

1. Smith AP, Marin-Spiotta E, de Graaff MA, et al. Microbial community structure varies across soil organic matter aggregate pools during tropical land cover change. *Soil Biol Biochem*. 2014;77:292-303. doi: 10.1016/j.soilbio.2014.05.030.
2. Semenov VM, Lebedeva TN, Pautova NB, et al. [Relationship between aggregate size, particulate organic matter content and plant residue decomposition in soil]. *Pochvovedenie*. 2020;(4):430-43. doi: 10.31857/S0032180X20040139. Russian.
3. Elliott ET. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci Soc Am J*. 1986;50:627-33.
4. Kogut BM, Artem'eva ZS, Kirillova NP, et al. [Component composition of organic matter in air-dry and water-stable macroaggregates (2-1 mm) of typical chernozem under contrasting land use]. *Pochvovedenie*. 2019;(2):161-70. doi: 10.1134/S0032180X19020084. Russian.
5. Li S, Gu X, Zhuang J, et al. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility. *Soil Tillage Res*. 2016;155:199-206. doi: 10.1016/j.still.2015.08.009.
6. Sarker JR, Singh BP, Cowie AL, et al. Carbon and nutrient mineralization dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues. *Soil Biol Biochem*. 2018;116:22-38. doi: 10.1016/j.soilbio.2017.09.030.
7. Bimüller C, Kreyling O, Kölbl A, et al. Carbon and nitrogen mineralization in hierarchically structured aggregates of different size. *Soil Tillage Res*. 2016;160:23-33. doi: 10.1016/j.still.2015.12.011.
8. Semenov VM, Lebedeva TN, Pautova NB. [Particulate organic matter in uncultivated and arable soils]. *Pochvovedenie*. 2019;(4):440-50. doi: 10.1134/S0032180X19040130. Russian.
9. Reeves SH, Somasundaram J, Wang WJ, et al. Effect of soil aggregate size and long-term contrasting tillage, stubble and nitrogen management regimes on CO₂ fluxes from a Vertisol. *Geoderma*. 2019;337:1086-96. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.11.022.
10. Masiutenko NP, Dubovik EV. [Relationship between the content and composition of organic matter of typical chernozem with the size of soil aggregates and their water stability]. In: *Fundamental'nye fizicheskie issledovaniia v pochvovedenii i melioratsii*. Moscow: Izd-vo MGU; 2003. p. 78-80. Russian.
11. Dubovik EV, Dubovik DV. [Relationship between the carbon content of organic compounds and the structural state of typical chernozem]. *Pochvovedenie*. 2019;(2):171-83. Russian.
12. Masiutenko MN, Masiutenko NP, Kuznetsov AV, et al. [Relationship between the structural-aggregate composition of slightly eroded typical chernozem and the content and composition of mobile humic substances during the decomposition of plant residues]. *Dostizh Nauki Tekh APK*. 2022;36(7):5-11. Russian.
13. D'iaconova KV, compiler. [Recommendations for studying the balance and transformation of organic matter under agricultural use and intensive cultivation of soils]. Moscow: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva; 1984. 96 p. Russian.
14. Kurachenko NL, Aleksandrova SV. [Mobile humic substances in the spatial variability of the aggregate level of the structural organization of chernozems]. *Vestn KrasGAU*. 2012;(8(71)):29-34. Russian.
15. Kogut BM, Semenov VM, Artem'eva ZS, et al. [Dehumification and soil carbon sequestration]. *Agrokimiia*. 2021;(5):3-13. doi: 10.31857/S0002188121050070. Russian.
16. Kumar V, Sharma K, Sharma V, et al. Soil Quality Refurbishment through Carbon Sequestration in Climate Change: A Review. *Int J Curr Microbiol Appl Sci*. 2017;6:1210-23. doi: 10.20546/ijcmas.2017.605.131.
17. Semenov VM, Kogut BM, Ivanov AL. [Soil carbon sequestration in agricultural landscapes: the food imperative of the climate agenda]. *Biull Pochv Inst im. V.V. Dokuchaeva*. 2025;(124):11-69. doi: 10.19047/0136-1694-2025-124-10-69. Russian.
18. Šimansky V, Bajčan D. Stability of soil aggregates and their ability of carbon sequestration. *Soil Water Res*. 2014;9(3):111-8. doi: 10.17221/106/2013-SWR.
19. Artemyeva Z, Danchenko N, Kogut B, et al. Chemical structure of soil organic matter and its role in aggregate formation in haplic chernozem under the contrasting land use variants. *Catena* [Internet]. 2021;204:105403. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816221002629>. doi: 10.1016/j.catena.2021.105403.
20. Maarastawi SA, Frindte K, Bodelier PLE, et al. Rice straw serves as additional carbon source for rhizosphere microorganisms and reduces root exudate consumption. *Soil Biol Biochem*. 2019;135:235-8. doi: 10.1016/j.soilbio.2019.05.007.
21. Masiutenko NP, Kuznetsov AV, Masiutenko MN, et al. [Efficiency of organic carbon binding in slightly eroded typical chernozem with the use of biological preparations]. *Ross S-kh Nauka*. 2023;(2):63-7. Russian.
22. Masiutenko NP, Kuznetsov AV, Chuyan NA, et al. [Influence of biological preparations on soil organic matter, structural and biological state of slightly eroded typical chernozem: collective monograph]. *Kursk: FGBNU "Kurskii FANTS"*; 2022. 217 p. Russian.
23. Masiutenko MN, Masiutenko NP, Diukareva AA, et al. [Influence of agrobio-technologies on the structural state of slightly eroded typical chernozem]. *Zemledelie*. 2026;(1):8-13. doi: 10.24412/0044-3913-2026-1-1-48. Russian.

Поступила в редакцию 16.03.2026 После доработки 02.04.2026 Принята к публикации 22.04.2026

Влияние агроэкологических условий на продуктивность озимой пшеницы в лесостепной зоне ЦЧР

А. Н. ЗОЛОТУХИН, О. Г. ЧУЯН, Г. П. ГЛАЗУНОВ, Л. Н. КАРАУЛОВА, О. А. МИТРОХИНА, В. В. ДВОЙНЫХ

Курский федеральный аграрный научный центр, ул. Карла Маркса, 70 б, Курск, 305021, Российская Федерация

Резюме. Исследования проводили с целью оценки влияния агроэкологических условий на продуктивность озимой пшеницы в лесостепной зоне ЦЧР. Работу выполняли в 2024–2025 гг. в Курской области. Учёт урожайности и оценку качества зерна озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) осуществляли в полевом опыте, заложенном на водоразделе и склонах южной и северной экспозиций крутизной 1...3° и >3° при ресурсосберегающей (No-Till), биологизированной и интенсивной технологиях. Почвы представлены тяжелосуглинистыми черноземами типичными и выщелоченными. Гидротермический коэффициент за период от возобновления вегетации до полной спелости характеризовал условия увлажнения как засушливые (0,87) в 2024 г. и слабозасушливые (1,20) в 2025 г. Урожайность в опыте изменялась соответственно от 1,72 до 4,81 т/га и от 4,03 до 7,63 т/га. При схожей роли рельефа (северные склоны и водораздел более предпочтительны) влияние технологий и их взаимодействия с рельефом на урожайность и показатели качества зерна существенно зависит от гидротермических условий. В засушливых условиях технология определяла 67,1 % различий по урожайности в опыте, тогда как при большей влагообеспеченности доля вклада этого фактора снижалась до 24,6 %, а влияние рельефа возрастало до 44,1 %. Содержание белка в зерне озимой пшеницы в годы исследования изменялось от 9,30 до 13,60 %. В засушливый год на величину этого показателя преимущественное влияние оказывали рельеф (34,1 %) и его взаимодействие с технологией (46,7 %). В более увлажненный вегетационный период доли влияния всех источников вариации были близки – 26,4...38,1 %. Регрессионный анализ подтвердил значимость гидротермических условий, рельефа и их взаимодействия с технологией в формировании продуктивности и качества зерна ($R^2 = 0,40...0,98$).

Ключевые слова: озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.), урожайность, качество зерна, элемент рельефа, технология, Центрально-Черноземный регион.

Сведения об авторах: А. Н. Золотухин, научный сотрудник (e-mail: alipij@rambler.ru); О. Г. Чуюн, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник; Г. П. Глазунов, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Л. Н. Караулова, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, О. А. Митрохина, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, В. В. Двойных младший научный сотрудник.

Для цитирования: Влияние агроэкологических условий на продуктивность озимой пшеницы в лесостепной зоне ЦЧР / А. Н. Золотухин, О. Г. Чуюн, Г. П. Глазунов и др. // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. № 4. С. 12–18. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_12.

The influence of agroecological conditions on the productivity of winter wheat in the forest-steppe zone of the Central Chernozem Region

A. N. Zolotukhin, O. G. Chuyan, G. P. Glazunov, L. N. Karaulova, O. A. Mitrokhina, V. V. Dvoynikh

Federal Agricultural Kursk Research Center, ul. Karla Marksa, 70 b, Kursk, 305021, Russian Federation

Abstract. The study was conducted to assess the impact of agroecological conditions on winter wheat productivity in the forest-steppe zone of the Central Chernozem Region. The work was conducted in 2024–2025 in the Kursk Region. Yield measurements and grain quality assessment of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) were conducted in a field trial established on a watershed and on southern and northern-facing slopes with inclinations of 1–3 degrees and >3 degrees using resource-saving (no-till), biologized, and intensive farming practices. The soils were heavy loamy typical and leached chernozems. The hydrothermal coefficient for the period from the resumption of vegetation to full maturity characterised moisture conditions as dry (0.87) in 2024 and slightly dry (1.20) in 2025. The yield in the experiment varied from 1.72 to 4.81 t/ha and from 4.03 to 7.63 t/ha, respectively. With a similar role of relief (northern slopes and watershed are more preferable), the influence of technologies and their interaction with relief on the yield and grain quality indicators significantly depends on hydrothermal conditions. Under dry conditions, the technology determined 67.1% of the yield differences in the experiment, whereas with greater moisture supply, the contribution of this factor decreased to 24.6%, and the influence of relief increased to 44.1%. The protein content in winter wheat grain during the study years varied from 9.30 to 13.60%. In a dry year, the value of this indicator was primarily influenced by topography (34.1%) and its interaction with technology (46.7%). During a wetter growing season, the contributions of all sources of variation were similar – 26.4–38.1%. Regression analysis confirmed the significance of hydrothermal conditions, topography, and their interaction with technology in shaping grain productivity and quality ($R^2 = 0.40–0.98$).

Keywords: winter wheat (*Triticum aestivum* L.); yield; grain quality; topography; technology; Central Chernozem Region.

Author Details: A. N. Zolotukhin, research fellow (e-mail: alipij@rambler.ru); O. G. Chuyan, D. Sc. (Biol.), leading research fellow; G. P. Glazunov, Cand. Sc. (Agr.), leading research fellow; L. N. Karaulova, Cand. Sc. (Agr.), senior research fellow, O. A. Mitrokhina, Cand. Sc. (Agr.), senior research fellow, V. V. Dvoynikh, junior research fellow.

For citation: Zolotukhin AN, Chuyan OG, Glazunov GP, et al. [The influence of agroecological conditions on the productivity of winter wheat in the forest-steppe zone of the Central Chernozem Region]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(4):12–8. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_12.

Влияние агрометеорологических условий года, особенно периода возобновления вегетации – цветения, на урожайность озимой пшеницы подтверждено в исследованиях [1, 2]. Показано [3], что влияние гидротермических условий на урожайность озимой пшеницы проявляется по-разному в зависимости от уровня влагообеспеченности года и распределения влаги в течение вегетационного периода.

Значительная изменчивость погоды обуславливает и непостоянство предпочтительности зерновых культур по отношению к ландшафтно-экологическим условиям [4]. Даже в пределах одного годового цикла возделывания культуры уровень урожайности на различных элементах агроландшафта зачастую неоднороден.

Морфометрические параметры элементов агроландшафта во многом определяют его микроклима-

тические и почвенные характеристики [5, 6], что, в свою очередь, влияет на урожайность и качество растениеводческой продукции [7]. Отмечено [8], что разница по урожайности между водораздельными частями и склонами может превышать 1 т/га. Установлена значимость индекса топографической позиции как важного предиктора урожайности [9]. В Центрально-Черноземном регионе преобладают пахотные земли с уклонами более 1°, на долю которых приходится более 50 % пашни, что значительно осложняет надёжное прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур. Средние потенциальные эрозионные потери почвы в ЦЧР с учетом почвозащитных коэффициентов агроценозов составляют 5,3 т/га в год [10].

Кроме того, важным научным вопросом остаётся оценка эффективности различных систем земледелия в конкретных ландшафтно-экологических условиях, поскольку способы обработки почвы напрямую влияют на стабильность урожайности озимой пшеницы в условиях неустойчивого увлажнения [11]. В лесостепной зоне ЦЧР сочетание таких факторов, как элемент рельефа, севооборот и система удобрений, может оказывать различное по силе и направлению влияние на урожайность озимой пшеницы и показатели её качества [12]. В работе Дубовик Д. В. и Чуян О. Г. показано, что содержание клейковины в зерне озимой пшеницы варьировало в зависимости от уровня увлажнения и способа основной обработки почвы [13]. Системный анализ агроэкологических и агротехнологических факторов, определяющих формирование ресурсов продуктивности пашни в склоновом агроландшафте, представляет собой актуальную научную задачу.

Цель исследований – оценка влияния агроэкологических условий в склоновом агроландшафте лесостепной зоны ЦЧР на урожайность и качество озимой пшеницы в зависимости от технологии возделывания.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в 2024–2025 гг. в полевом стационарном опыте по изучению оптимизации сельскохозяйственного природопользования и созданию адаптивных систем земледелия в условиях изменяющегося климата ФГБНУ «Курский ФАНЦ» (с. 1-е Панино, Медвенский район, Курская область). Сорт озимой пшеницы Алексеич. Опытный участок расположен на водораздельном плато (ВП) и прилегающих склонах северной (СЭ) и южной (ЮЭ) экспозиций различной крутизны.

Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов:

элемент мезорельефа по сочетанию экспозиции и крутизны склона (фактор А) – крутой южный склон (ЮЭ >3°) – А0; пологий южный склон (ЮЭ 1...3°) – А1; водораздельное плато (ВП 0...1°) – А2; пологий северный склон (СЭ 1...3°) – А3; крутой северный склон (СЭ >3°) – А4;

технология (фактор В) – ресурсосберегающая (No-till), отсутствие обработки почвы и применение гербицидов сплошного действия. Чередование культур: озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) – гречиха (*Fagopyrum esculentum* Moench) – соя (*Glycine max* L. Merr.) – яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) – горох (*Pisum sativum* L.). Норма минеральных удобрений под озимую пшеницу $N_{110}P_{72}K_{72}$ (В0); биологизированная, использование преимущественно поверхностной дисковой обработки почвы, внесение органических удобрений (20 т/га). Севооборот: озимая пшеница – кукуруза на зерно (*Zea mays* L.) – соя – яровой ячмень

– горох. Норма удобрений под культуру – $N_{88}P_{48}K_{48}$ (В1); интенсивная, использование глубоких приемов основной обработки почвы, норма вносимых питательных веществ под озимую пшеницу $N_{150}P_{97}K_{97}$. Севооборот включал следующее чередование культур: озимая пшеница – подсолнечник (*Helianthus annuus* L.) – яровой ячмень – кукуруза на зерно – соя (В2).

Площадь одной делянки под культурой составляет 1,17 га (18 м × 650 м). Начало ротации – 2024 г. Диапазон абсолютных высот составляет 195...225 м. На основании нивелирной съемки опытные участки дифференцированы на категории по крутизне поверхности: водораздел (0...1°), пологие склоны (1...3°) и крутые склоны (>3°). В регрессионном анализе использовали средние значения уклона на разных топографических позициях (переменная SL).

Почвы опытного участка представлены черноземами типичными (*Haplic Chernozems*) и выщелоченными (*Luvic Chernozems*), гранулометрический состав обоих подтипов – тяжелосуглинистый. Реакция почвенной среды находилась в диапазоне 4,9...6,0 (рН_{KCl}); обеспеченность подвижными формами фосфора и калия составляла 97...162 и 84...190 мг/кг соответственно (табл. 1).

Таблица 1. Исходные агрохимические показатели почвы в слое 0...20 см

Показатель	В среднем по опыту
Содержание гумуса (ГОСТ 26213-91), %	4,9
рН _{KCl} (ГОСТ 26483-85)	5,5
Hг (ГОСТ 26212-2021), мг.экв./100 г	4,0
N-NO ₃ по Грандваль-Ляжу (ГОСТ 26951-86), мг/кг	14
P ₂ O ₅ по Чирикову (ГОСТ 26204-91), мг/кг	119
K ₂ O по Чирикову (ГОСТ 26204-91), мг/кг	127

По данным метеостанции г. Курск, среднегодовая температура воздуха составляет 7,8 °С, а среднегодовая сумма осадков – 676 мм (за период 2005–2024 гг.). В вегетационные периоды озимой пшеницы 2023–2024 и 2024–2025 гг. отмечали различия в температурном режиме и количестве осадков (рис. 1). В оба сезона развития культуры в сентябре было чрезвычайно низкое количество осадков, либо только их следы.

В регрессионных уравнениях использовали гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (GTK) периода от возобновления вегетации до полной спелости. В 2024 и 2025 гг. условия увлажнения этого периода характеризовались как засушливые (GTK = 0,87) и слабозасушливые (GTK = 1,20) соответственно [14]. Температуру поверхности почвы определяли с использованием минимального, максимального и срочного почвенных термометров. Коэффициент относительной прогреваемости (k_p) рассчитывали как отношение суммы активных температур (САТ) на склоне к САТ на водоразделе. Для учёта неоднородности теплообеспеченности в рельефе использовали модифицированный гидротермический коэффициент (GTK_m), рассчитанный отдельно для каждой топографической позиции (с учетом k_p).

Весенние запасы продуктивной влаги в 2024 и 2025 гг. в слое почвы 0...100 см оценивали как хорошие – в среднем 149 (CV = 4,7 %) и 138 мм (CV = 12,5 %) соответственно (Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат. 1986. 416 с.).

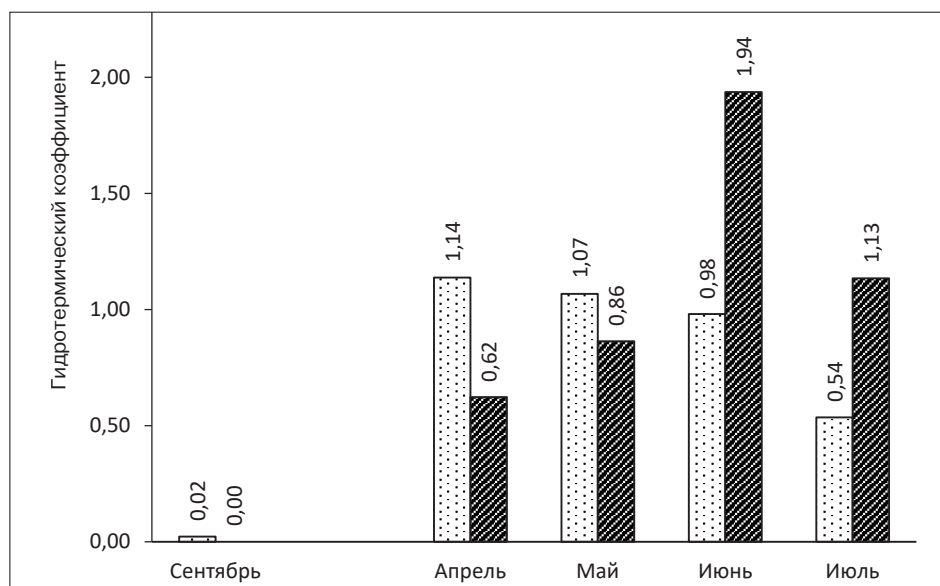


Рис. 1. Гидротермический режим вегетационных периодов озимой пшеницы в 2024 и 2025 гг. (по данным метеостанции г. Курск): ▨ – 2024 г., ▩ – 2025 г.

Энергетическую оценку технологий возделывания озимой пшеницы проводили согласно методическим указаниям (*Методические рекомендации по топливно-энергетической оценке сельскохозяйственной техники, технологических процессов и технологий в растениеводстве* / В. А. Токарев, В. Н. Братушков, А. Н. Никифоров и др. М.: ВАСХНИЛ, ВИМ, 1989. 59 с.). Энергетические затраты на один цикл возделывания культуры (Е), включающие энергоёмкость удобрений и топлива, энергозатраты на обслуживание сельскохозяйственных машин, проведение агротехнических мероприятий и живой труд, для технологии No-till составляли 19,6 ГДж/га, биологизированной – 22,0 ГДж/га, интенсивной – 26,7 ГДж/га. Учёт урожая проводили комбайном SAMPO-2010 по выделенным в пределах склона ярусам. Учётная площадь составляет 50 м² (2 м × 25 м). Качество зерна определяли в соответствии со стандартами: содержание белка – ГОСТ 10846-91, натура зерна – ГОСТ 10840-64, масса 1000 зёрен – ГОСТ 10842-89.

Статистическую обработку результатов проводили в программах Microsoft Excel 2016 и StatSoft Statistica 12.0 методами дисперсионного и множественного регрессионного анализов (уровень значимости $p < 0,05$).

Результаты и обсуждение. В период исследования микроклиматические условия на разных элементах рельефа были неоднородны. Максимальные в эксперименте различия по сумме активных температур $> 10^\circ\text{C}$ зафиксированы между ЮЭ 1...3° и СЭ $> 3^\circ$: в 2024 г. размах составил 240 °C, в 2025 г. – 411 °C. В 2024 г. весенние запасы продуктивной влаги распределялись равномерно как по элементам рельефа, так и по технологиям. В 2025 г. наибольшие различия зафиксированы между средними запасами при нулевой и интенсивной технологиях, а также между северным (СЭ $> 3^\circ$) и южными склонами. В обоих случаях разница составила 25 ± 6 мм (HCP_{05} для частных средних – 15 мм).

В 2024 г. урожайность озимой пшеницы варьировала от 1,72 т/га (No-till, южный склон крутизной 1...3°) до 4,81 т/га (биологизированная технология, водораздельное плато с уклоном 0...1°). В среднем по элементам рельефа наиболее продуктивным оказался северный пологий склон – 4,05 т/га, который значимо

($\text{HCP}_{05} = 0,64$ т/га) превышал по урожайности южные склоны – А0 (+1,01 т/га) и А1 (+0,97 т/га), но не отличался от водораздела и северного крутого склона (табл. 2).

В среднем биологизированная и интенсивная технологии обеспечивают достоверно ($\text{HCP}_{05} = 0,49$ т/га) более высокую урожайность (+1,95 и +1,64 т/га), по сравнению с No-till, но между собой не различаются. Доля вклада фактора А в варьирование урожайности составила 12,9 % ($F = 3,92$; $p = 0,023$), фактора В – 67,1 % ($F = 40,76$; $p < 0,001$). Взаимодействие факторов в 2024 г. оказалось незначимым ($p = 0,377$).

В 2025 г. урожайность озимой пшеницы изменялась от 4,03 т/га (No-till, южный склон крутизной 1...3°) до 7,63 т/га (биологизированная технология, северный склон 1...3°). В среднем по фактору А, как и в предыдущем году, наиболее продуктивной оказалась позиция А3 (6,65 т/га), которая значимо ($\text{HCP}_{05} = 0,46$ т/га) превосходит южные склоны и А4, но не отличается от водораздела (см. табл. 2). Южные склоны достоверно уступают по урожайности остальным элементам рельефа, при этом между собой они не различаются.

Таблица 2. Влияние элемента рельефа и технологии на урожайность озимой пшеницы в 2024-2025 гг., т/га

Элемент рельефа (фактор А)	Технология (фактор В)	Год	
		2024	2025
ЮЭ $> 3^\circ$	No-till	1,75	5,49
	биологизированная	3,64	5,92
	интенсивная	3,72	5,09
	среднее	3,04	5,50
ЮЭ 1...3°	No-till	1,72	4,03
	биологизированная	3,91	5,95
	интенсивная	3,61	5,21
	среднее	3,08	5,06
ВП 0...1°	No-till	2,25	6,52
	биологизированная	4,81	6,93
	интенсивная	3,19	5,60
	среднее	3,42	6,35
СЭ 1...3°	No-till	3,07	6,58
	биологизированная	4,44	7,63
	интенсивная	4,66	5,75
	среднее	4,05	6,65
СЭ $> 3^\circ$	No-till	2,47	5,64
	биологизированная	4,20	6,12
	интенсивная	4,20	6,18
	среднее	3,63	5,98
Среднее	No-till	2,25	5,65
	биологизированная	4,20	6,51
	интенсивная	3,88	5,57
	среднее	3,44	5,91
HCP_{05} по фактору А		0,64	0,46
HCP_{05} по фактору В		0,49	0,37
HCP_{05} для частных средних		1,01	0,81

Биологизированная технология обеспечивала статистически значимую ($HCP_{05} = 0,37$ т/га) прибавку урожайности по отношению к No-till и интенсивной. Разница между последними не существенна – 0,08 т/га. Значимость взаимодействия факторов подтверждается неодинаковыми эффектами технологий на разных элементах рельефа. На южном пологом склоне технологии B1 (+1,91 т/га) и B2 (+1,18 т/га) обеспечивали существенную прибавку урожайности по отношению к No-till ($HCP_{05} = 0,81$ т/га). На водоразделе интенсивная технология значимо снижала урожайность относительно нулевой (–1,33 т/га), тогда как биологизированная достоверно не отличалась от No-till. На крутых склонах ни одна из технологий не обеспечивала значимых отличий от No-till. Доля вклада фактора A в варьирование урожайности составила 44,1 % ($F = 16,78$; $p < 0,001$), фактора B – 24,6 % ($F = 18,72$; $p < 0,001$), их взаимодействия – 21,4 % ($F = 4,07$; $p = 0,009$). Коэффициент

– 24,5 % ($F = 17,04$; $p < 0,001$), взаимодействие – 11,8 % ($F = 4,10$; $p = 0,009$). В 2025 г. величина показателя изменялась от 779,1 до 796,5 г/л. Северный пологий склон существенно превосходил остальные позиции (на 2,6...4,0 г/л при $HCP_{05} = 2,3$ г/л). Средняя натура по технологиям составила: No-till – 787,4; биологизированная – 791,9; интенсивная – 783,6 г/л ($HCP_{05} = 1,8$ г/л). Значимое взаимодействие ($p < 0,001$) указывает на то, что эффективность технологий неодинакова на разных элементах рельефа. Доля влияния факторов распределилась следующим образом: взаимодействие – 45,1 %, технология – 42,0 %, рельеф – 6,7 %.

В 2024 г. масса 1000 зерен варьировала от 34,09 до 45,29 г (рис. 3). Наименьшие в эксперименте значения отмечены на северных склонах, наибольшие – на водоразделе, а также при использовании интенсивной технологии. Наименьшая существенная разница для сравнения средних по рельефу составила 0,70 г,

по технологиям – 0,54 г, для частных средних – 1,22 г. Доля влияния факторов составила: технология – 51,1 % ($F = 190,72$), рельеф – 39,7 % ($F = 74,09$), взаимодействие – 7,2 % ($F = 6,73$). Все источники вариации значимы ($p < 0,001$).

В 2025 г. масса 1000 зерен изменялась от 35,1 до 43,1 г. Наименьшая существенная разница для сравнения средних по рельефу составила 1,37 г, по технологиям – 1,06 г, для частных средних – 2,37 г. Доля влияния факторов составила: взаимодействие –

41,8 % ($F = 3,23$; $p = 0,024$), технология – 26,9 % ($F = 8,29$; $p = 0,003$), рельеф – 7,0 % (незначим $p = 0,401$), остаточная вариация – 24,3 %. То есть масса 1000 зерен в 2025 г. определялась главным образом взаимодействием технологии и рельефа, причём вклад непосредственного влияния технологии был существенно меньше, чем в предыдущем году.

Содержание белка в зерне озимой пшеницы в 2024 г. изменялось от 10,28 до 12,90 % (рис. 4). Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что влияние рельефа и взаимодействия рельеф-технология

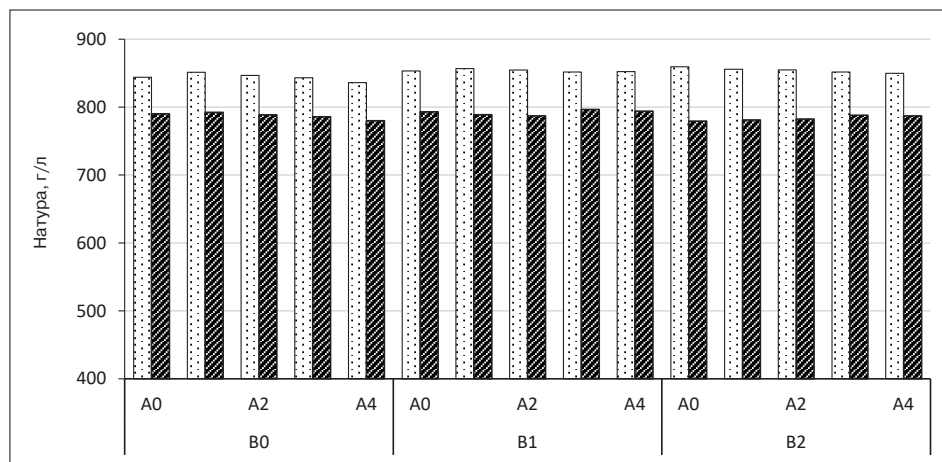


Рис. 2. Натура зерна озимой пшеницы в 2024 и 2025 гг. в зависимости от рельефа (A) и технологии (B): □ – 2024 г., ▨ – 2025 г.

энергетической эффективности (отношение энергии урожая к затратам) в 2024 г. находился в пределах от 1,5 до 3,0: 1,6 – для нулевой технологии, 2,6 – для биологизированной, 2,0 – для интенсивной. В 2025 г. нулевая и биологизированная технологии обеспечили более высокую энергетическую эффективность (4,0) по сравнению с интенсивной (2,9).

В 2024 г. натура зерна варьировала в диапазоне 835,7...859,8 г/л. Минимальные в эксперименте значения показателя зафиксированы на северном крутом склоне, максимальные – на южном пологом (рис. 2). Наименьшая существенная разница для сравнения средних по рельефу составила 2,4 г/л. Биологизированная и интенсивная технологии не различались между собой (853,7 и 854,3 г/л соответственно), однако обе значимо превосходили No-till (844,3 г/л) при $HCP_{05} = 1,9$ г/л. Эффект технологий проявлялся неодинаково на разных элементах рельефа (HCP_{05} для частных средних = 4,2 г/л). Доля влияния факторов распределилась следующим образом: технология – 58,4 % ($F = 81,38$; $p < 0,001$), рельеф

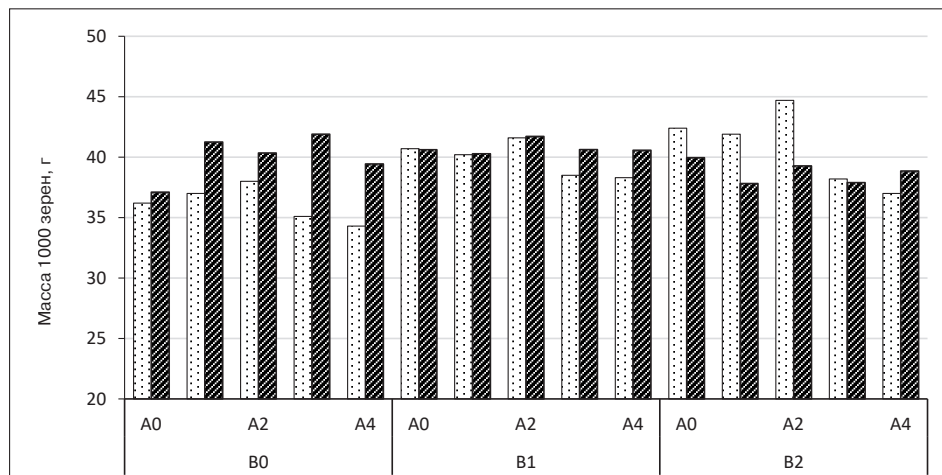


Рис. 3. Масса 1000 зёрен в 2024 и 2025 гг. в зависимости от рельефа (A) и технологии (B): □ – 2024 г., ▨ – 2025 г.

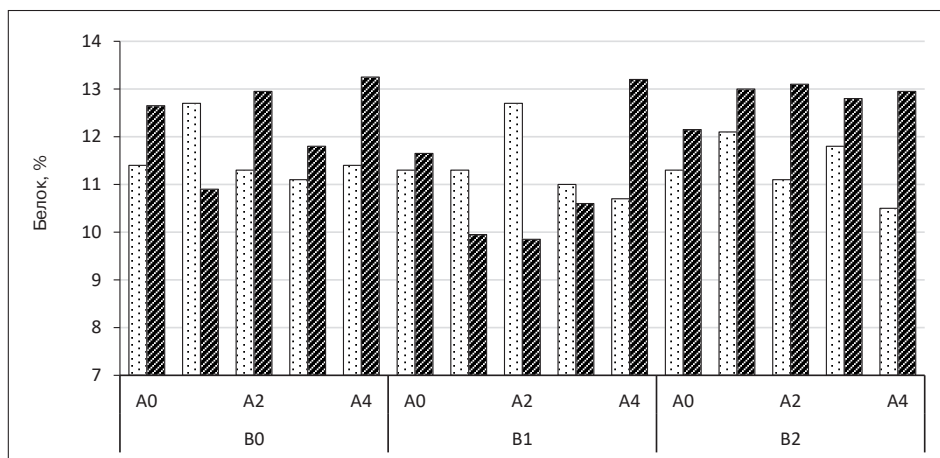


Рис. 4. Содержание белка в зерне озимой пшеницы в 2024 и 2025 гг. в зависимости от рельефа (А) и технологии (В): □ – 2024 г., ▨ – 2025 г.

было достоверным ($p < 0,01$), тогда как влияние фактора технологии было несущественным ($p = 0,439$). Наибольшее в опыте содержание белка отмечено на южном пологом склоне – 12,03 %, что на 0,70...1,15 % выше чем, на А0, А3 и А4, при $HCP_{05} = 0,49$ %. Минимальное содержание белка зафиксировано на северном крутом склоне – 10,88 %, что значимо ниже всех остальных позиций. Фактор технологии в засушливых условиях не оказывал статистически подтвержденного влияния на содержание белка ($HCP_{05} = 0,38$ %). Несмотря на отсутствие эффекта фактора В, на отдельных элементах рельефа при разных технологиях содержание белка различалось ($HCP_{05} = 0,85$ %). Так, биологизированная технология оказалась наиболее эффективной на водоразделе, No-till – на южном пологом склоне, а интенсивная – на северном пологом. Доля влияния фактора А составляла 34,1 %, фактора В – 2,0 % (незначим), АВ – 46,7 %.

В отличие от 2024 г., где фактор технологий не имел самостоятельного значения, а взаимодействие с рельефом играло ведущую роль, в 2025 г. все рассматриваемые источники вариации оказались высоко значимыми ($p < 0,001$). Доли влияния факторов составили: А – 26,4 %, В – 38,1 %, АВ – 30,1 %.

В 2025 г. содержание белка в зерне озимой пшеницы варьировало в пределах 9,30...13,60 %. Наибольшее в опыте содержание белка, усредненное по трём технологиям, зафиксировано на СЭ >3° – 13,13 %, что достоверно выше всех остальных позиций (разности 0,98...1,85 % при $HCP_{05} = 0,48$ %). Зерно, полученное на южном пологом склоне, характеризовалось минимальным содержанием белка (11,28 %), достоверно уступая ЮЭ >3°, ВП, СЭ >3°. При усреднении по элементам рельефа все различия между технологиями значимы ($HCP_{05} = 0,37$ %). Интенсивная технология обеспечивала максимальное содержание белка в зерне (12,80 %), превосходя No-till (12,31 %) и биологизированную (11,05 %). Взаимодействие факторов проявилось в неодинаковой эффективности технологий на разных элементах рельефа. На северном крутом склоне все технологии были равноценны. На водоразделе и южном пологом склоне биологизированная существенно

уступала остальным ($HCP_{05} = 0,83$ %). На позиции ЮЭ 1...3° интенсивная технология была наиболее эффективна. При интенсивной технологии содержание белка в зерне в 2025 г. было выше, чем в 2024 г., на всех топографических позициях на 0,9...2,5 %.

Полученные данные указывают на то, что содержание белка в зерне сильно варьирует в зависимости от погодных условий года, что подчёркивает необходимость многолетних исследований для разработки надёжных рекомендаций

по получению высоких урожаев и качественной продукции. Однако повышение урожайности зерна может сопровождаться «эффектом разбавления», выражающимся в снижении содержания белка и клейковины [15].

Для количественной оценки влияния независимых переменных на урожайность и показатели качества зерна выполнен множественный регрессионный анализ (табл. 3). При этом использовали количественные переменные, в отличие от дисперсионного анализа, где применяли категориальные. Объективным показателем тепло- и влагообеспеченности в годы исследований с контрастными агрометеорологическими условиями, выступают GTK и GTK_m , физический смысл которых описан выше.

Таблица 3. Урожайность и показатели качества озимой пшеницы в зависимости от гидротермических и морфометрических условий

Переменная	Уравнение*	R ²	F
Урожайность, т/га	$-67,76 - 6,89k_p - 0,20SL + 5,51E - 0,10E^2 + 22,94GTK - 0,68(GTK \times E)$	0,85	50,50
Натура, г/л	$592,35 + 30,81E - 0,52E^2 - 57,82GTK - 5,86(GTK \times E)$	0,98	903,58
Масса 1000 зёрен, г	$-103,16 - 0,55SL + 9,61E - 0,15E^2 + 58,77GTK - 2,46(GTK \times E)$	0,58	15,01
Белок, %	$69,12 - 3,12E + 0,07E^2 - 44,02GTK_m + 21,29GTK_m^2$	0,40	9,23

* уровень значимости для всех уравнений – $p < 0,0001$.

Влияние независимых переменных, отражающих особенности рельефа, на величину исследуемых показателей проявилось в следующих направлениях. Повышение теплообеспеченности (по k_p) на 0,1 сопровождалось снижением урожайности на 0,69 т/га. При увеличении крутизны склона на 1° урожайность снижалась на 0,20 т/га, а масса 1000 зёрен – на 0,55 г. Интенсификация технологий (увеличение энергетических затрат) оказывала нелинейное воздействие на урожайность и величину показателей качества и обеспечивала их повышение до оптимума, после которого отмечено снижение (за исключением содержания белка).

Повышение влагообеспеченности (увеличение GTK с 0,87 до 1,20) способствовало росту урожайности при No-till на 3,17 т/га, при биологизированной технологии – на 2,63 т/га, при интенсивной – на 1,58 т/га, то есть этот положительный эффект снижался с интенсификацией. Масса 1000 зёрен увеличивалась на 3,48 г при No-till, на 1,53 г – при биологизированной технологии и снижалась на 2,28 г – при интенсивной. В то же время увеличение увлажнения снижало натуру

зерна в среднем на 63,1 г/л (от 57,0 до 70,7 г/л в зависимости от технологии).

Отдельного рассмотрения заслуживает уравнение зависимости содержания белка от энергозатрат и модифицированного гидротермического коэффициента, учитывающее микроклиматические различия агроландшафта в разных топографических позициях. Минимальное в эксперименте содержание белка зафиксировано при умеренных энергозатратах (~22 ГДж/га) и при $GTKm \approx 1,03$. Отклонение от этих значений (как в сторону засушливых, так и избыточно влажных условий) сопровождалось ростом содержания белка, хотя механизмы такого влияния могут различаться. Эта модель имеет умеренную объяснительную способность, что может быть связано с действием неучтенных факторов и требует уточнения в ходе дальнейших исследований.

Выводы. В ходе анализа данных, полученных в годы с контрастной погодой, установлен неоднородный характер влияния агроэкологических условий на продуктивность и качество зерна озимой пшеницы в склоновом агроландшафте лесостепной зоны ЦЧР. В засушливых условиях технология определяла более 67 % различий по урожайности, тогда как при меньшем дефиците влаги её вклад снижался до 24,6 %. Доля влияния рельефа на исследуемые показатели в слабозасушливых условиях увеличивалась в среднем на 22,3 % и составляла 24,1...44,1 %.

Технология возделывания – один из основных факторов, определяющих натуру зерна, однако её влияние зависело от погодных условий: в засушливом 2024 г. биологизированная и интенсивная технологии обеспечили равноценные результаты, а в 2025 г. при использовании биологизированной величина этого показателя была достоверно выше (в среднем на 8,2 г/л). Вклад факторов в изменчи-

вость массы 1000 зерен также существенно различался по годам. В засушливом году технология и рельеф совместно определяли более 90 % вариации показателя, причём все три технологии возделывания различались между собой (интенсивная > биологизированная > No-till), одновременно зерно, выращенное на водораздельном участке, значимо превосходило продукцию, собранную на склонах. В слабозасушливом году рельеф сам по себе не оказывал достоверного влияния – ведущим фактором стало взаимодействие (41,8 %). Содержание белка в зерне озимой пшеницы определяло преимущественно взаимодействие агротехнологии и рельефа, особенно в засушливом 2024 г. (вклад 46,7 %). В более увлажненном 2025 г. все факторы были значимы, причём наибольший вклад в изменчивость показателя вносила технология (38,1 %). Полученные регрессионные модели имеют достаточно высокую прогнозную способность (коэффициент детерминации от 0,40 до 0,98) и могут использоваться для оптимизации технологий с учётом конкретных ландшафтно-климатических условий.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась за счет средств бюджета ФБГНУ «Курский федеральный аграрный научный центр» в рамках выполнения государственного задания по теме FGZU-2026-0001. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

- Захаров Н. Г., Хайрткинова Н. А. Формирование урожайности и качества зерна озимой пшеницы в условиях среднего Поволжья // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 3 (51). С. 41–46. doi: 10.18286/1816-4501-2020-3-41-46.
- Николаев М. В. Выявление уязвимых для дефицита влаги зернопроизводящих территорий на основе мезорайонирования зоны неустойчивого увлажнения при изменении климата в европейской части России // Сельскохозяйственная биология. 2024. Т. 59. № 3. С. 473–491. doi: 10.15389/agrobology.2024.3.473rus.
- Дорохов Б. А., Браилова И. С., Беляева Е. П. Особенности формирования урожая и качества зерна озимой пшеницы в Центральном Черноземье // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2022. Т. 52. № 3. С. 24–34. doi: 10.26898/0370-8799-2022-3-3.
- Иванов А. И., Иванова Ж. А. Эффективность точных систем удобрения зерновых культур в условиях мелиорированного агроландшафта / А. И. Иванов, // Агрохимический вестник. 2023. № 5. С. 9–15. doi: 10.24412/1029-2551-2023-5-002.
- Аксенова Ю. В., Гиндемит А. М. Влияние рельефа на показатели плодородия почв // Земледелие. 2024. № 2. С. 19–24.
- Chemical structure of organic matter of agrochernozems in different slope positions / Z. S. Artemyeva, N. N. Danchenko, Yu. G. Kolyagin, et al. // Eurasian Soil Science. 2023. Vol. 56. No. 6. P. 705–714.
- Иванов Д. А., Анциферова О. Н., Курпас К. С. Зависимость продуктивности озимой ржи от ландшафтных и климатических условий // Земледелие. 2025. № 2. С. 3–7.
- Влияние краткосрочной климатической изменчивости на урожайность озимой пшеницы в агроландшафтах ЦЧЗ / Л. Г. Смирнова, М. И. Евдокименкова, А. А. Кувшинова и др. // Достижения науки и техники АПК. 2025. Т. 39. № 6. С. 11–17. doi: 10.53859/02352451_2025_39_6_11.
- Topographic position index predicts within-field yield variation in a dryland cereal production system / Ja. A. Macdonald, D. M. Barnard, K. R. Mankin, et al. // Agronomy. 2025. Vol. 15. No. 6. P. 1304. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/6/1304> (дата обращения: 03.02.2026). doi: 10.3390/agronomy15061304.
- Maltsev K. A. Yermolaev O. P. Potential soil loss from erosion on arable lands in the european part of russia // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 12. P. 1588–1597. doi: 10.1134/S106422931912010X.
- Winter wheat grain yield stability under different tillage practices / L. Aula, M. M. Mikha, A. C. Easterly, et al. // Agronomy Journal. 2023. Vol. 115. No. 2. P. 1006–1014. doi: 10.1002/agj2.21236.
- Лукьянов В. А., Нитченко Л. Б. Влияние элемента рельефа, севооборотов и доз удобрений на структуру урожая озимой пшеницы и её качество в Центрально-Чернозёмном регионе // Таврический вестник аграрной науки. 2023. № 4 (36). С. 113–123. doi: 10.5281/zenodo.10279290.
- Дубовик Д. В., Чуян О. Г. Качество сельскохозяйственных культур в зависимости от агротехнических приемов и климатических условий // Земледелие. 2018. № 2. С. 9–13. doi: 10.24411/0044-3913-2018-10202.

14. Ионова Е. В., Лиховидова В. А., Лобунская И. А. Засуха и гидротермический коэффициент увлажнения как один из критериев оценки степени ее интенсивности (обзор литературы) // *Зерновое хозяйство России*. 2019. № 6 (66). С. 18–22. doi: 10.31367/2079-8725-2019-66-6-18-22.

15. Влияние препаратов, полученных из карбоксиметилированного растительного сырья на ростовые процессы, урожайность и биохимические показатели зерна пшеницы / Е. В. Калюта, М. И. Мальцев, В. И. Маркин и др. // *Химия растительного сырья*. 2021. № 2. С. 361–368. doi: 10.14258/jcprm.2021029732.

References.

1. Zakharov NG, Khairtdinova NA. [Formation of productivity and grain quality of winter wheat in the conditions of the Middle Volga region]. *Vestn Ul'ianovsk Gos S-kh Akad.* 2020;(3(51)):41-6. doi: 10.18286/1816-4501-2020-3-41-46. Russian.

2. Nikolaev MV. [Identification of grain-producing territories vulnerable to moisture deficit based on meso-zoning of the zone of unstable moisture under climate change in the European part of Russia]. *Sel'skokhoziastvennaia Biologiya*. 2024;59(3):473-91. doi: 10.15389/agrobiology.2024.3.473rus. Russian.

3. Dorokhov BA, Brailova IS, Beliaeva EP. [Features of crop formation and grain quality of winter wheat in the Central Chernozem region]. *Sib Vestn S-kh Nauki*. 2022;52(3):24-34. doi: 10.26898/0370-8799-2022-3-3. Russian.

4. Ivanov AI, Ivanova ZhA. [Efficiency of precise fertilizer systems for grain crops in conditions of reclaimed agrolandscape]. *Agrokhim Vestn*. 2023;(5):9-15. doi: 10.24412/1029-2551-2023-5-002. Russian.

5. Aksenova YuV, Gindemit AM. [Influence of relief on soil fertility indicators]. *Zemledelie*. 2024;(2):19-24. Russian.

6. Artemyeva ZS, Danchenko NN, Kolyagin YuG, et al. Chemical structure of organic matter of agrochernozems in different slope positions. *Eurasian Soil Sci*. 2023;56(6):705-14.

7. Ivanov DA, Antsiferova ON, Kurpas KS. [Dependence of winter rye productivity on landscape and climatic conditions]. *Zemledelie*. 2025;(2):3-7. Russian.

8. Smirnova LG, Evdokimenkova MI, Kuvshinova AA, et al. [Influence of short-term climate variability on winter wheat yield in agrolandscapes of the Central Chernozem region]. *Dostizh Nauki Tekh APK*. 2025;39(6):11-7. doi: 10.53859/02352451_2025_39_6_11. Russian.

9. Macdonald JA, Barnard DM, Mankin KR, et al. Topographic position index predicts within-field yield variation in a dryland cereal production system. *Agronomy [Internet]*. 2025 [cited 2026 Feb 3];15(6):1304. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/6/1304>. doi: 10.3390/agronomy15061304.

10. Maltsev KA, Yermolaev OP. Potential soil loss from erosion on arable lands in the European part of Russia. *Eurasian Soil Sci*. 2019;52(12):1588-97. doi: 10.1134/S106422931912010X.

11. Aula L, Mikha MM, Easterly AC, et al. Winter wheat grain yield stability under different tillage practices. *Agron J*. 2023;115(2):1006-14. doi: 10.1002/agj2.21236.

12. Luk'ianov VA, Nitchenko LB. [Influence of relief element, crop rotations and fertilizer rates on the yield structure of winter wheat and its quality in the Central Chernozem region]. *Tavr Vestn Agrar Nauki*. 2023;(4(36)):113-23. doi: 10.5281/zenodo.10279290. Russian.

13. Dubovik DV, Chuyan OG. [Quality of agricultural crops depending on agrotechnical techniques and climatic conditions]. *Zemledelie*. 2018;(2):9-13. doi: 10.24411/0044-3913-2018-10202. Russian.

14. Ionova EV, Likhovidova VA, Lobunskaja IA. [Drought and hydrothermal moisture coefficient as one of the criteria for assessing its intensity (literature review)]. *Zemovoe Khoziaistvo Ross*. 2019;(6(66)):18-22. doi: 10.31367/2079-8725-2019-66-6-18-22. Russian.

15. Kaliuta EV, Maltsev MI, Markin VI, et al. [Influence of preparations obtained from carboxymethylated plant raw materials on growth processes, yield and biochemical parameters of wheat grain]. *Khim Rast Syr'ia*. 2021;(2):361-8. doi: 10.14258/jcprm.2021029732. Russian.

Поступила в редакцию 06.03.2026 После доработки 24.03.2026 Принята к публикации 15.04.2026

ВНИМАНИЮ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ И ДРУГИХ ЗАИНТЕРЕСОВАННЫХ ЛИЦ!

Редакция журнала «Достижения науки и техники АПК» издает монографии и другую книжную продукцию с редактированием и всеми выходными данными.

Цены договорные.

Заявки отправлять по адресу: 101000, г. Москва, Моспочтамт, а/я 166.

Тел.: (963) 758-48-44. E-mail: agroapk@mail.ru

Влияние микроэлементных удобрений на симбиотическую деятельность и продуктивность сои в условиях ЦЧР

Ж. Н. МИНЧЕНКО, В. И. ЛАЗАРЕВ

Курский федеральный аграрный научный центр, ул. Карла Маркса, 70б, Курск, 305021, Российская Федерация

Резюме. Исследования проводили с целью оценки воздействия микроэлементных удобрений на симбиотическую активность и продуктивность сои в условиях Центрально-Чернозёмного региона. Работу выполняли в 2023–2025 гг. в Курской области на сое сорта Осмонь. Изучали эффективность жидких органоминеральных комплексов торговой марки «Урожайная линия» (Экстра Мо, Экстра В, Экстра Cu, Экстра В/Мо, Микро Комплекс). Схема эксперимента предусматривала предпосевную обработку семян и две некорневые подкормки в фазы 3-го и 6-го тройчатого листа. Полевой опыт проводили на чернозёме типичном мощном тяжелосуглинистом с содержанием гумуса 5,5 %. Применение микроудобрений оптимизировало бобово-ризобийный симбиоз, стимулируя рост числа и массы азотфиксирующих клубеньков относительно контроля соответственно на 4,5...7,4 шт./растение и 0,54...0,78 г/растение. Наибольшая в опыте урожайность зафиксирована в вариантах Экстра В/Мо – 2,74 т/га (+0,39 т/га к контролю) и Микро Комплекс – 2,71 т/га (+0,36 т/га), наименьшая – Экстра Cu – 2,61 т/га (+0,22 т/га). В засушливом 2024 г. величина этого показателя в вариантах Экстра В/Мо и Микро Комплекс оставалась на уровне 2,47...2,54 т/га (контроль – 2,27 т/га). Сбор белка с 1 га достиг 0,96 т/га (Экстра В/Мо) и 0,95 т/га (Микро Комплекс) против 0,80 т/га в контроле, масла – 0,63 т/га и 0,61 т/га соответственно (контроль – 0,53 т/га). Наибольшую рентабельность обеспечило применение Экстра В/Мо – 146,8 % (+24,7 % к контролю), Микро Комплекс – 143,5 % (+21,4 %), Экстра Мо – 143,3 % (+21,2 %) и Экстра В – 140,8 % (+18,7 %), самую низкую – Экстра Cu – 134,5 % (+12,4%).

Ключевые слова: соя (*Glycine max*), удобрения с микроэлементами, бор, молибден, медь, азотфиксация, урожай, сбор белка, сбор масла, рентабельность.

Сведения об авторах: Ж. Н. Минченко, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник (e-mail: minchenko.knii@mail.ru); В. И. Лазарев, доктор сельскохозяйственных наук, зав. лабораторией (e-mail: vla190353@yandex.ru).

Для цитирования: Минченко Ж. Н., Лазарев В. И. Влияние микроэлементных удобрений на симбиотическую деятельность и продуктивность сои в условиях ЦЧР // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. № 4. С. 19–24. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_19.

The influence of microelement fertilizers on the symbiotic activity and productivity of soybeans in the Central Chernozem Region

Zh. N. Minchenko, V. I. Lazarev

Kursk Federal Agrarian Scientific Center, ul. Karla Marxa, 70b, Kursk, 305021, Russian Federation

Abstract. The study was conducted to evaluate the impact of microelement fertilizers on the symbiotic activity and productivity of soybeans in the Central Black Earth Region. The work was conducted from 2023 to 2025 in the Kursk Region on the Osmon soybean variety. The effectiveness of liquid organomineral complexes of the Urozhainaya Liniya brand (Extra Mo, Extra B, Extra Cu, Extra B/Mo, Micro Complex) was studied. The experimental design included pre-sowing seed treatment and two foliar applications at the 3rd and 6th trifoliate leaf stages. The field test was conducted on typical deep, heavy loamy chernozem with a humus content of 5.5%. The use of microfertilizers optimised the legume-rhizobium symbiosis, stimulating the growth of the number and weight of nitrogen-fixing nodules relative to the control by 4.5–7.4 pcs/plant and 0.54–0.78 g/plant, respectively. The highest yield in the experiment was recorded in the Extra B/Mo variants – 2.74 t/ha (+0.39 t/ha compared to the control) and Micro Complex – 2.71 t/ha (+0.36 t/ha), the lowest – Extra Cu – 2.61 t/ha (+0.22 t/ha). In the dry year of 2024, the value of this indicator in the Extra B/Mo and Micro Complex variants remained at the level of 2.47–2.54 t/ha (control – 2.27 t/ha). Protein yield per hectare reached 0.96 t/ha (Extra B/Mo) and 0.95 t/ha (Micro Complex) versus 0.80 t/ha in the control; oil yield was 0.63 t/ha and 0.61 t/ha, respectively (control – 0.53 t/ha). The highest profitability was achieved with Extra B/Mo – 146.8% (+24.7% compared to the control), Micro Complex – 143.5% (+21.4%), Extra Mo – 143.3% (+21.2%), and Extra B – 140.8% (+18.7%); the lowest was achieved with Extra Cu – 134.5% (+12.4%).

Keywords: soybean (*Glycine max*); micronutrient fertilizers; boron; molybdenum; copper; nitrogen fixation; yield; protein yield; oil yield; profitability.

Author Details: Zh. N. Minchenko, Cand. Sc. (Agr.), senior research fellow (e-mail: minchenko.knii@mail.ru); V. I. Lazarev, D. Sc. (Agr.), head of laboratory (e-mail: vla190353@yandex.ru).

For citation: Minchenko ZhN, Lazarev VI [The influence of microelement fertilizers on the symbiotic activity and productivity of soybeans in the Central Chernozem Region]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(4):19–24. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_19.

В последние годы соя вошла в число приоритетных сельскохозяйственных культур, вызывая устойчивый интерес у товаропроизводителей благодаря сочетанию коммерческой привлекательности и пользы для агроэкосистем. Её востребованность обусловлена уникальной многофункциональностью. Соя одновременно служит источником высококачественного растительного белка (до 40...50 % в семенах), сырья для производства растительных масел (18...25 %), ключевого компонента комбикормов и белково-витаминных добавок в животноводстве [1, 2]. Благодаря азотфиксирующей способности соя

способна усваивать от 40 до 180 кг/га азота за вегетационный период, в результате снижается ее потребность в азотных удобрениях, а плодородие почв при этом повышается [3, 4]. Большую роль эта культура играет в качестве эффективного предшественника озимой пшеницы [5].

При этом соя высоко требовательна к минеральному питанию. На формирование 1 т семян растения выносят из почвы 75...100 кг азота, 20...30 кг фосфора и 30...40 кг калия [6]. Критические фазы потребления элементов питания у растений культуры чётко дифференцированы. Например, наиболее эффективное

усвоение азота отмечено в первый месяц вегетации и в фазы цветение-начало образования бобов. Пик потребления фосфора приходится на фазы бутонизации и налива семян, максимальное усвоение калия – в фазы образования и налива бобов [7].

Особую роль в системе минерального питания сои играют удобрения с микроэлементами. Они оказывают существенное влияние на физиологические процессы, протекающие в растениях, при этом дозы их внесения минимальны [8, 9, 10]. Соя особенно отзывчива на молибден, бор, цинк, медь и марганец. Эти микроэлементы участвуют в процессе фотосинтеза, синтезе белков, азотфиксирующей деятельности, формировании плодов и др.

Наиболее необходим для роста и развития сои молибден. Он активирует ферменты азотфиксации, в результате повышает активность клубеньков. Бор участвует в процессах цветения и оплодотворения, предотвращает опадение завязей. Цинк регулирует рост и развитие надземной массы и корневой системы, благодаря синтезу ауксинов. Медь повышает устойчивость к различным заболеваниям, способствует повышению содержания белка. Марганец активизирует процесс фотосинтеза. При наличии дефицита этих элементов происходит ухудшение фотосинтетической деятельности, снижение количества и массы бобов, качества семян, при этом восприимчивость растений к болезням и стрессовым факторам возрастает [11, 12].

Несмотря на то, что естественное плодородие почв в условиях Курской области высокое, проблема дефицита микроэлементов актуальна и оказывает влияние на урожайность сельскохозяйственных культур, включая сою.

Доступность микроэлементов может быть ограничена из-за уровня кислотности. На более кислых почвах снижается доступность Р и Мо, а на щелочных ухудшается усвоение Fe, Zn, В, Мп и др. Водно-физические свойства почв, погодные условия, агротехнические ошибки также могут отрицательно влиять на доступность микроэлементов. В Курской области преимущественно преобладают чернозёмы выщелоченные и оподзоленные, характеризующиеся кислой реакцией среды (рН 5,3...6,0) и низкой обеспеченностью подвижными формами микроэлементов. По данным агрохимического обследования, в ряде районов фиксируется недостаток бора (до 0,3 мг/кг, при норме 0,5...1,0 мг/кг), цинка (менее 1,0 мг/кг при норме 2,0...3,0 мг/кг) и молибдена (ниже 0,1 мг/кг при оптимальном уровне 0,2...0,4 мг/кг). Это обусловлено не только природными особенностями почвенного покрова, но и интенсивным выносом элементов урожаями при недостаточном внесении микроудобрений, а также эрозийными процессами, снижающими содержание гумуса и биогенных веществ [13].

В регионе практикуют разные способы внесения микроэlementных удобрений под сою. Предпосевная обработка семян препаратами на основе хелатов (EDTA, ДТРА) стимулирует начальный рост и формирование симбиоза. В вегетационный период эффективны некорневые подкормки, проводимые в критические фазы развития сои [14, 15, 16].

Обработка сои микроэлементами в фазе 3-го тройчатого листа критически важна, в этот период активно формируются корневые клубеньки, и запускается процесс азотфиксации. Поэтому внесение молибдена на этой стадии особенно необходимо, он

участвует в работе ферментов азотфиксации и повышает эффективность симбиоза. В результате чего, соя будет обеспечена азотом в последующие фазы развития, иметь устойчивость к стрессам и заболеваниям

В фазе 6-го тройчатого листа обработка сои микроэлементами играет ключевую роль. Молибден усиливает азотфиксацию. Благодаря меди и цинку поддерживается активный фотосинтез. Через обеспечение бором подготавливаются растения к цветению и закладке репродуктивных органов. В итоге подкормка способствует повышению количества бобов, массы семян и содержания белка в семенах, а также помогает культуре противостоять стрессовым факторам.

Оптимизация минерального питания, особенно обеспечение микроэлементами, позволяет раскрыть генетический потенциал сортов, повысить урожайность и качество зерна, а также экономическую эффективность производства.

Цель исследования – оценить воздействие микроэlementных удобрений на симбиотическую активность и продуктивность сои в почвенно-климатических условиях Центрально-Чернозёмного региона.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в 2023–2025 гг. в лаборатории технологий возделывания полевых культур ФГБНУ «Курский ФАНЦ». Изучали эффективность органоминеральных удобрений с микроэлементами на сое сорта Осмонь.

Препараты торговой марки «Урожайная линия» производства ООО НПЦ «Питания Растений» (номер государственной регистрации – 643-13-2849-1) Экстра Мо, Экстра В, Экстра Си, Экстра В/Мо и Микро Комплекс представляют собой жидкие органоминеральные комплексы, предназначенные для коррекции дефицита микроэлементов, стимуляции роста и повышения урожайности растений. В состав удобрений входят макро- и микроэлементы, аминокислоты, пептиды и альдоновые кислоты, обеспечивающие комплексное воздействие на растительный организм (<https://tprtechnology.com>).

Технология применения препаратов предусматривала обработку семян перед посевом, а также две некорневые подкормки в фазы 3-го и 6-го тройчатого листа. Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов: без внесения удобрений (контроль); обработка семян 1,5 л/т и двукратное опрыскивание посевов по 0,5 л/га препаратом Экстра Мо; обработка семян 1,5 л/т и двукратное опрыскивание посевов по 1,0 л/га – Экстра В, Экстра Си, Экстра В/Мо, Микро Комплекс.

Почва экспериментального участка представлена чернозёмом типичным мощным тяжелосуглинистого гранулометрического состава со следующими агрохимическими характеристиками: содержание гумуса (по Тюрину) – 5,5 %, щелочногидролизующего азота – 154 мг/кг, подвижного фосфора (по Чирикову) – 175 мг/кг, подвижного калия (по Чирикову) – 113 мг/кг. Кислотность почвы, измеренная в солевой вытяжке, составляла 5,3 ед. рН. Содержание доступных для растений форм микроэлементов составляло: бор – 0,31 мг/кг, медь – 0,29 мг/кг, цинк – 0,34 мг/кг, марганец – 43 мг/кг.

Обработку семян выполняли за 24 ч до посева с использованием ранцевого опрыскивателя при расходе рабочей жидкости 15 л на 1 т семян. Некорневые подкормки проводили с расходом рабочего раство-

ра 250 л/га. Варианты размещали систематически с трёхкратным повторением. Площадь каждой делянки составляла 200 м² (общая) и 100 м² (учётная). Посев осуществляли рядовым способом с нормой высева 5,0 млн всхожих семян на 1 га. Уборку проводили комбайном «Сампо-1200» методом прямого комбайнирования, с пересчетом полученного урожая на 100 %-ную чистоту и влажность семян 14 %. Для статистической обработки данных использовали метод дисперсионного анализа с применением программ Microsoft Excel и Statistica.

При расчете экономической эффективности использовали актуальные цены на удобрения (Экстра Мо – 1176 руб./л, Экстра В – 690 руб./л, Экстра Си – 844 руб./л, Экстра В/Мо – 790 руб./л и Микро Комплекс – 844 руб./л), фактическую урожайность в контрольном и опытных вариантах, а также закупочную цену семян сои в размере 40 тыс. руб. за 1 т.

Агрометеорологические условия вегетационного периода сои изменялись в зависимости от года и были типичными для Курской области. Превышение суммы активных температур отмечали во все годы исследований (от 127 до 380 °С). По количеству выпавших осадков за период вегетации сои (май-сентябрь) наиболее засушливым оказался 2024 г. (147,3 мм) при норме 215,0 мм. Величина ГТК в 2023 и 2025 гг. составляла 1,17...1,56 ед., в 2024 г. – 0,75.

Результаты и обсуждение. Применение удобрений с микроэлементами оказывало стимулирующий эффект на образование и развитие бактерий рода Rhizobiales на корневой системе. Это способствовало активизации бобово-ризобияльного симбиоза и приводило к достоверному росту числа и массы азотфиксирующих клубеньков. В частности, предпосевная обработка семян с последующей двукратной некорневой подкормкой в фазы 3-го и 6-го тройчатого листа обеспечивала прирост количества клубеньков на 4,5...7,4 шт./растение и их массы на 0,54...0,78 г/растение, относительно значений в контрольном варианте (табл. 1). Максимальный эффект достигнут при применении Экстра В/Мо – 24,2 шт. клубеньков и 1,52 г массы (превышение контроля на 7,4 шт. и 0,78 г) и Микро Комплекс – 23,8 шт. и 1,37 г (превышение на 7,0 шт. и 0,63 г).

Внесение микроэлементных удобрений активизирует симбиотическую деятельность клубеньковых бактерий, вследствие чего возрастает количество фиксируемого соей азота. Согласно результатам расчетов по коэффициенту Хопкинса-Питерса, симбиотическая фиксация азота клубеньковыми бактериями на корнях сои в течение вегетационного периода составляет от 65,5 до 96,7 кг/га, что обеспечивает 50...60 % потребности культуры в азоте (рис. 1).

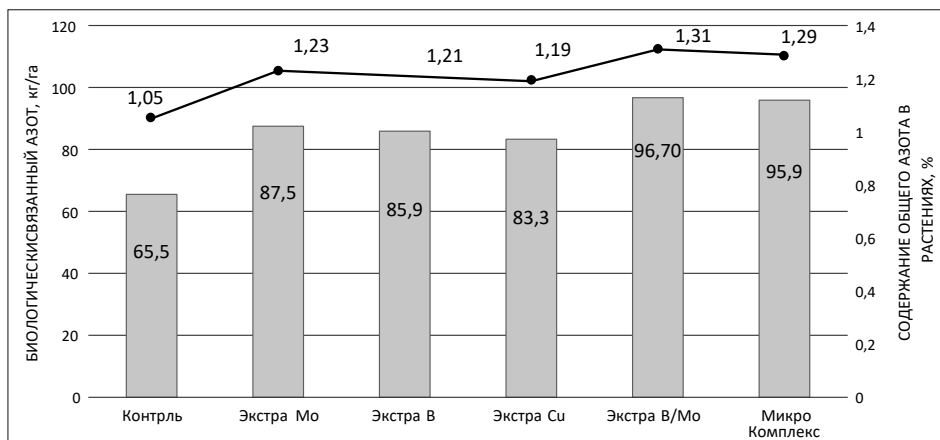


Рис. 1. Влияние микроудобрений на симбиотическую фиксацию азота растениями сои, 2023–2025 гг.: ■ – количество биологически связанного азота, кг/га, — – содержание общего азота в растениях, %.

Минимальные значения азотфиксации (65,5 кг/га) зафиксированы в контрольном варианте. Комплексное применение микроудобрений повысило фиксацию атмосферного азота до 83,3...96,7 кг/га. Максимальный в опыте результат (96,7 кг/га) отмечен с микроудобрением Экстра В/Мо. Мы предполагаем, что его эффективность объясняется синергией микроэлементов, молибден служит структурной основой нитрогеназы – фермента, преобразующего N₂ в NH₃, а бор оптимизирует транспорт ассимилятов и развитие корневой системы, усиливая симбиоз сои с бактериями Rhizobiales и функциональную активность клубеньков.

Ключевые структурные компоненты, определяющие урожайность семян сои, включают число бобов на одном растении, количество зёрен в бобе и массу 1000 семян. В результате обработки семян и двукратного внесения удобрений по вегетации отмечены следующие улучшения показателей относительно контроля. Число бобов на растении увеличилось на 1,2...2,2 шт., при контрольном значении 18,93 шт., количество семян в бобе возросло на 0,17...0,20 шт. относительно контрольного значения 1,99 шт., масса семян с одного растения повысилась на 0,84...1,24 г по

Таблица 1. Влияние удобрений с микроэлементами на количество и массу клубеньков на корнях сои (фаза – образование бобов)

Вариант	Количество клубеньков, шт./растение				Масса клубеньков, г/растение			
	2023 г.	2024 г.	2025 г.	среднее	2023 г.	2024 г.	2025 г.	среднее
Без удобрений (контроль)	21,6	15,2	13,6	16,8	0,95	0,68	0,60	0,74
Экстра Мо	36,5	17,6	15,4	23,2	1,82	1,30	1,16	1,43
Экстра В	35,2	15,9	14,8	22,0	1,74	1,19	1,08	1,34
Экстра Си	34,3	15,1	14,5	21,3	1,69	1,11	1,05	1,28
Экстра В/Мо	38,1	18,0	16,5	24,2	1,84	1,47	1,25	1,52
Микро Комплекс	36,9	18,4	16,2	23,8	1,78	1,21	1,13	1,37
НСР ₀₅				1,27				0,34

Таблица 2. Анализ воздействия микроудобрений на структурные компоненты урожайности сои (2023–2025 гг.)

Вариант	Количество растений на 1 м ² , шт.	Число бобов на растении, шт.	Число семян в бобе, шт.	Масса семян с растения, г	Масса 1000 семян, г
Без удобрений (контроль)	55,6	18,93	1,99	4,58	121,9
Экстра Мо	56,4	20,72	2,17	5,62	125,2
Экстра В	56,4	20,34	2,16	5,47	124,6
Экстра Си	56,2	20,31	2,16	5,42	123,7
Экстра В /Мо	57,1	21,12	2,19	5,82	125,9
Микро Комплекс	57,3	21,06	2,19	5,80	125,7
НСР ₀₅		0,4	0,07	0,3	1,2

сравнению с контролем (4,58 г), а масса 1000 семян увеличилась на 1,8...4,0 г относительно контрольного значения 121,9 г (табл. 2).

Применение микроэлементных удобрений оказало положительное влияние на урожайность сои. Наибольшая в опыте урожайность сои за три года отмечена в варианте Экстра В/Мо – 2,74 т/га (табл. 3), что на 0,35 т/га выше контроля (2,35 т/га). Близкие результаты продемонстрировал вариант Экстра Микро Комплекс – 2,71 т/га (+0,32 т/га к контролю). Несколько ниже, но также существенно превышали контроль другие варианты: Экстра Мо – 2,68 т/га (+0,29 т/га), Экстра В – 2,66 т/га (+0,27 т/га), Экстра Си – 2,61 т/га (+0,22 т/га).

Таблица 3. Урожайность семян сои при применении микроэлементных удобрений

Вариант	Урожайность, т/га			
	2023 г.	2024 г.	2025 г.	среднее
Без удобрений (контроль)	2,45	2,27	2,34	2,35
Экстра Мо	2,89	2,43	2,73	2,68
Экстра В	2,76	2,50	2,72	2,66
Экстра Си	2,75	2,42	2,67	2,61
Экстра В /Мо	2,89	2,47	2,87	2,74
Микро Комплекс	2,85	2,54	2,75	2,71
НСР ₀₅	0,11	0,07	0,08	

По годам наибольшая стабильность урожайности отмечена в вариантах Экстра В/Мо и Экстра Микро Комплекс. В засушливом 2024 г. эти варианты обеспечили сохранение урожайности на уровне 2,47...2,54 т/га, тогда как в контроле она снизилась до 2,27 т/га. В наиболее благоприятном 2025 г. максимальная урожайность зафиксирована в варианте Экстра В/Мо (2,87 т/га), что на 0,53 т/га превышало контроль (2,34 т/га). Статистическая достоверность результатов подтверждается значениями наименьшей существенной разности (НСР₀₅ = 0,07...0,11). Все прибавки урожайности превышают соответствующие значения НСР₀₅, что свидетельствует о значимом влиянии применяемых микроудобрений.

Применение микроэлементных удобрений способствовало повышению как качественных показателей семян сои, так и общего сбора белка и масла с

1 га. Содержание белка и масличность изменялись от 34,2 до 35,1 % и от 22,0 до 23,1 % соответственно (рис. 2).

Наибольшее в опыте содержание белка в семенах сои отмечено в вариантах Экстра В/Мо (35,1 %) и Микро Комплекс (35,0 %), что на 0,9...1,0 % выше контроля (34,2 %). Масличность также несколько возросла, максимальные значения составили 22,8...22,9 % (варианты Экстра В и Микро Комплекс) против 22,6 % в контроле.

По сбору белка с 1 га лидировали варианты Экстра В/Мо (0,96 т/га) и Микро Комплекс (0,95 т/га), что на 0,16...0,15 т/га выше контрольного варианта (0,80 т/га). Аналогичная тенденция отмечена и по сбору масла, наибольшие значения 0,63 т/га (Экстра В/Мо) и 0,61 т/га (Микро Комплекс, Экстра Мо, Экстра В) превышали контроль (0,53 т/га) на 0,08...0,10 т/га (рис. 3).

В контрольном варианте получена относительно низкая урожайность (2,35 т/га), однако вследствие отсутствия затрат на удобрения себестоимость оставалась высокой, а рентабельность на уровне 122,1 %. Микроэлементные удобрения повышали экономическую эффективность возделывания сои по сравнению с контролем.

Применение молибденового удобрения (Экстра Мо) повышало урожайность на 14 %, что приводило к росту стоимости продукции на 13200 руб. и условно чистого дохода на 11466 руб., уровень рентабельности увеличился на 21,2 %, по отношению к контрольному варианту (табл. 4).

Боросодержащее удобрение (Экстра В) также улучшало показатели, но его эффект немного уступал Экстра Мо. Прирост урожайности составил 13 % к контролю, стоимость продукции увеличи-

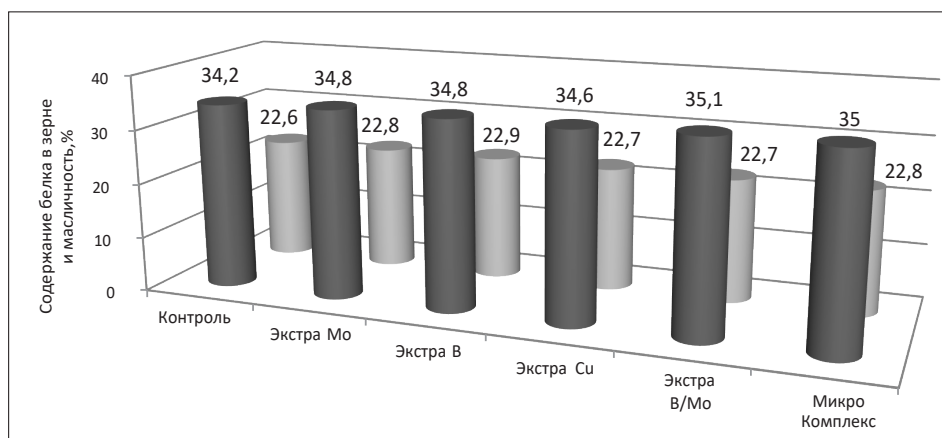


Рис. 2. Содержание белка и масла в семенах сои в зависимости от применяемых микроэлементных удобрений (2023–2025 гг.): ■ – белок, %, ■ – масличность, %.

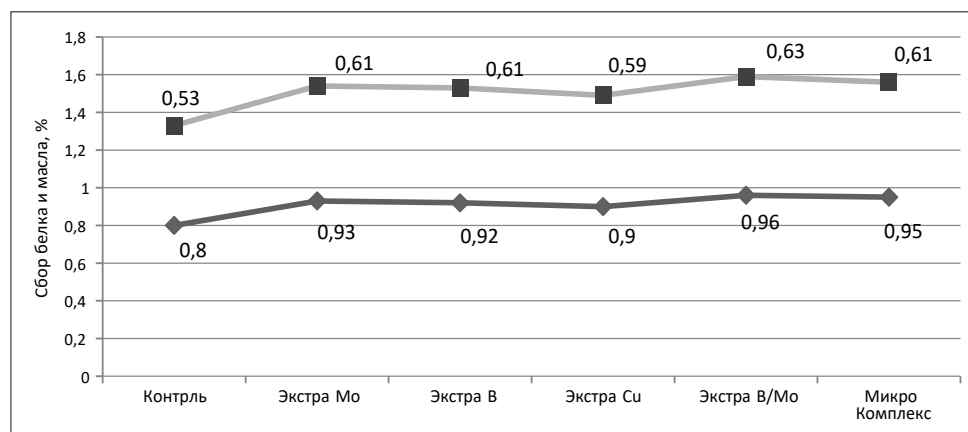


Рис. 3. Сбор белка и масла с 1 га в зависимости от применения микроэлементных удобрений (2023–2025 гг.): ■ – масло, ◆ – белок.

лась на 12400 руб., чистый доход – на 10527 руб./га, уровень рентабельности составил 140,8 % (+ 21,2 %). Медное удобрение (Экстра Си) обеспечило наименьший в опыте прирост урожайности – 11,1 %, относительно контроля. Рост стоимости продукции составил 10400 руб., величина условно чистого дохода – 59883 руб./га (+ 8199 руб./га) при уровне рентабельности – 134,5 % (+ 12,4 % к контролю).

от 0,63 т/га (Экстра В/Мо) до 0,61 т/га (Микро Комплекс, Экстра Мо, Экстра В) против 0,53 т/га в контроле. Самая высокая рентабельность отмечена при применении Экстра В/Мо (146,8 %, + 24,7 % к контролю), Микро Комплекс (143,5 %, + 21,4 %), Экстра Мо (143,3 %, + 21,2 %) и Экстра В (140,8 %, + 18,7 %). Наименьшую в опыте рентабельность обеспечил Экстра Си (134,5 %, + 12,4 %).

Таблица 4. Результаты оценки экономической эффективности применения микроэлементных удобрений на посевах сои (2023–2025 гг.)

Вариант	Урожайность, т/га	Стоимость продукции, руб.	Производственные затраты, руб.	Себестоимость продукции, руб./т	Чистый доход, руб./га	Рентабельность, %
Без удобрений (контроль)	2,35	94000	42316	18006,8	51684	122,1
Экстра Мо	2,68	107200	44050	16436,57	63150	143,3
Экстра В	2,66	106400	44189	16612,41	62211	140,8
Экстра Си	2,61	104400	44517	17056,32	59883	134,5
Экстра В/Мо	2,74	109600	44402	16205,11	65198	146,8
Микро Комплекс	2,71	108400	44517	16426,94	63883	143,5

Комбинированное применение бора и молибдена (Экстра В/Мо) обеспечило максимальный прирост урожайности (+16,6 %) и рентабельности (24,7 %), рост стоимости продукции составил 5600 руб., чистый доход при этом превысил контрольный вариант на 13514 руб./га. Универсальный комплекс микроэлементов (Микро Комплекс) показал результаты, близкие к Экстра В/Мо, но с меньшим приростом урожайности (15,3 %), что на 0,03 т/га ниже, чем в варианте с Экстра В/Мо (2,74 т/га). Стоимость продукции при этом возросла на 14400 руб., чистый доход – на 12199 руб./га, а рентабельность составила 143,5 % (+ 21,4 %).

Выводы. Применение микроудобрений обеспечило статистически значимый прирост урожайности. Максимальный в опыте результат отмечен в вариантах Экстра В/Мо – 2,74 т/га (+0,39 т/га к контролю) и Микро Комплекс – 2,71 т/га (+0,36 т/га), наимень-

ший прирост зафиксирован при использовании Экстра Си – 2,61 т/га (+0,22 т/га).

Самое высокое в опыте содержание белка (35,1 %) и масла (22,8...22,9 %) в семенах выявлено в вариантах Экстра В/Мо и Микро Комплекс, что также отразилось на их сборе с 1 га. Сбор белка в варианте Экстра В/Мо достиг 0,96 т/га, Микро Комплекс – 0,95 т/га, против 0,80 т/га в контроле. Сбор масла варьировал

от 0,63 т/га (Экстра В/Мо) до 0,61 т/га (Микро Комплекс, Экстра Мо, Экстра В) против 0,53 т/га в контроле. Самая высокая рентабельность отмечена при применении Экстра В/Мо (146,8 %, + 24,7 % к контролю), Микро Комплекс (143,5 %, + 21,4 %), Экстра Мо (143,3 %, + 21,2 %) и Экстра В (140,8 %, + 18,7 %). Наименьшую в опыте рентабельность обеспечил Экстра Си (134,5 %, + 12,4 %).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр» в рамках выполнения государственного задания по теме FGZU-2024-0001. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Потенциал зернобобовых культур как высокобелкового компонента в кормопроизводстве / И. А. Сазонова, В. В. Бычкова, А. В. Ерохина и др. // Аграрный научный журнал. 2024. № 8. С. 103–107. doi: 10.28983/asj.y2024i8pp103-107.
2. Soybean genetic resources contributing to sustainable protein production / B. Guo, L. Sun, S. Jiang, et al. // Theoretical and Applied Genetics. 2022. Vol. 135. No. 11. P. 4095–4121. doi: 10.1007/s00122-022-04222-9.
3. Васильчиков А. Г., Акулов А. С. Управление вегетацией перспективных сортообразцов сои путем применения высокоэффективных инокулянтов // Земледелие. 2018. № 4. С. 19–21. doi: 10.24411/0044-3913-2018-10405.

4. Симбиотическая активность в посевах и продуктивность сои в зависимости от обработки семян биопрепаратами на черноземе обыкновенном / О. Г. Шабалдас, Г. Р. Дорошко, О. И. Власова и др. // Земледелие. 2023. № 8. С. 32–36. doi: 10.24412/0044-3913-2023-8-32-36.
5. Хатков К. Х., Мамсиоров Н. И., Макаров А. А. Оценка эффективности звена севооборота «соя - озимая пшеница» и её влияние на свойства почвы // Новые технологии. 2021. № 5. С. 134–144.
6. Свирина В. А., Черногаев В. Г. Интенсивная технология возделывания сои на основе использования бактериальных и минеральных удобрений // Аграрная наука. 2025. № 5. С. 112–118. doi: 10.32634/0869-8155-2025-394-05-112-118.
7. Оразеева И. В., Муравьев А. А. Показатели продуктивности сортов сои в зависимости от инокуляции семян и азотного удобрения // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 4. С. 34–37. doi: 10.24411/0235-2451-2018-10407.
8. Шарипова Г. Ф., Колесар В. А., Сафин Р. И. Эффективность применения удобрений с микроэлементами на различных сортах сои // Плодородие. 2020. № 3. С. 9–12. doi: 10.25680/S19948603.2020.114.02.
9. Boron and zinc deficiencies and toxicities and their interactions with other nutrients in soybean roots, leaves, and seeds / M. L. Pawlowski, J. Helfenstein, E. Frossard, et al. // Journal of Plant Nutrition. 2019. Vol. 42. No. 6. P. 634–649. doi: 10.1080/01904167.2019.1567782.
10. Dameto L. S., Moraes L. A. C., Moreira A. Effects of boron sources and rates on grain yield, yield components, nutritional status, and changes in the soil chemical attributes of soybean // Journal of Plant Nutrition. 2022. Vol. 46. No. 4. P. 2077–2088. doi: 10.1080/01904167.2022.2118611.
11. Impact of Foliar Spray of NPK and Zn on Soybean for Growth, Yield, Quality, Energetics and Carbon Footprint under Dryland Condition at Indore / L. Bhayal, Aakash, M. P. Jain, et al. // Legume Research. 2022. Vol. 45. No. 2. P. 174–181. doi: 10.18805/LR-4748.
12. Boron in plants: uptake, deficiency and biological potential / S. K. Kohli, H. Kaur, K. Khanna, et al. // Plant Growth Regulator. 2023. Vol. 100. P. 267–282. doi: 10.1007/s10725-022-00844-7.
13. Лукин С. Мониторинг агроэкологического состояния пахотных почв Центрально-Черноземного района России // Агрохимия. 2023. № 4. С. 67–77. doi: 10.31857/S0002188123040075.
14. Башкатов А. Я., Минченко Ж. Н., Стифеев А. И. Современные технологии возделывания сои. СПб.: Издательство «Лань», 2022. 188 с.
15. Лазарев В. И., Минченко Ж. Н., Башкатов А. Я. Агроэкологическое обоснование применения микроэлементных удобрений при возделывании яровой пшеницы // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 154–160. doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-154-160.
16. Шабалкин А. В., Беляев Н. Н., Дубинкина Е. А. Микроудобрения и их применение на сое в условиях Центрального Черноземья // Сахарная свекла. 2020. № 7. С. 34–37. doi: 10.25802/SB.2020.24.96.006.

References.

1. Sazonova IA, Bychkova VV, Erokhina AV, et al. [Potential of leguminous crops as a high-protein component in feed production]. Agrar Nauch Zhurn. 2024;(8):103-7. doi: 10.28983/asj.y2024i8pp103-107. Russian.
2. Guo B, Sun L, Jiang S, et al. Soybean genetic resources contributing to sustainable protein production. Theor Appl Genet. 2022;135(11):4095-121. doi: 10.1007/s00122-022-04222-9.
3. Vasil'chikov AG, Akulov AS. [Management of vegetation of promising soybean varieties by using highly effective inoculants]. Zemledelie. 2018;(4):19-21. doi: 10.24411/0044-3913-2018-10405. Russian.
4. Shabaldas OG, Dorozhko GR, Vlasova OI, et al. [Symbiotic activity in crops and soybean productivity depending on seed treatment with biological products on ordinary chernozem]. Zemledelie. 2023;(8):32-6. doi: 10.24412/0044-3913-2023-8-32-36. Russian.
5. Khatkov KKh, Mamsirov NI, Makarov AA. [Evaluation of the effectiveness of the crop rotation link "soybean - winter wheat" and its impact on soil properties]. Novye Tekhnologii. 2021;(5):134-44. Russian.
6. Svirina VA, Chernogaev VG. [Intensive technology of soybean cultivation based on the use of bacterial and mineral fertilizers]. Agrar Nauka. 2025;(5):112-8. doi: 10.32634/0869-8155-2025-394-05-112-118. Russian.
7. Oraeva IV, Murav'ev AA. [Productivity indicators of soybean varieties depending on seed inoculation and nitrogen fertilizer]. Dostizh Nauki Tekh APK. 2018;32(4):34-7. doi: 10.24411/0235-2451-2018-10407. Russian.
8. Sharipova GF, Kolesar VA, Safin RI. [Efficiency of using fertilizers with microelements on various soybean varieties]. Plodorodie. 2020;(3):9-12. doi: 10.25680/S19948603.2020.114.02. Russian.
9. Pawlowski ML, Helfenstein J, Frossard E, et al. Boron and zinc deficiencies and toxicities and their interactions with other nutrients in soybean roots, leaves, and seeds. J Plant Nutr. 2019;42(6):634-49. doi: 10.1080/01904167.2019.1567782.
10. Dameto LS, Moraes LAC, Moreira A. Effects of boron sources and rates on grain yield, yield components, nutritional status, and changes in the soil chemical attributes of soybean. J Plant Nutr. 2022;46(4):2077-88. doi: 10.1080/01904167.2022.2118611.
11. Bhayal L, Aakash, Jain MP, et al. Impact of Foliar Spray of NPK and Zn on Soybean for Growth, Yield, Quality, Energetics and Carbon Footprint under Dryland Condition at Indore. Legume Res. 2022;45(2):174-81. doi: 10.18805/LR-4748.
12. Kohli SK, Kaur H, Khanna K, et al. Boron in plants: uptake, deficiency and biological potential. Plant Growth Regul. 2023;100:267-82. doi: 10.1007/s10725-022-00844-7.
13. Lukin S. [Monitoring of the agroecological state of arable soils in the Central Chernozem region of Russia]. Agrokhimia. 2023;(4):67-77. doi: 10.31857/S0002188123040075. Russian.
14. Bashkatov AY, Minchenko ZhN, Stifeev AI. [Modern technologies of soybean cultivation]. Saint Petersburg: Izdatel'stvo "Lan"; 2022. 188 p. Russian.
15. Lazarev VI, Minchenko ZhN, Bashkatov AI. [Agroecological substantiation of the use of microelement fertilizers in spring wheat cultivation]. Teor Prikl Ecol. 2020;(3):154-60. doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-154-160. Russian.
16. Shabal'kin AV, Belyaev NN, Dubinkina EA. [Microfertilizers and their application on soybeans in the conditions of the Central Chernozem region]. Sakharnaia Svekl. 2020;(7):34-7. doi: 10.25802/SB.2020.24.96.006. Russian.

Поступила в редакцию 04.03.2026 После доработки 26.03.2026 Принята к публикации 22.04.2026

Результаты изучения коллекции сои в условиях Среднего Приамурья

Т. А. АСЕЕВА, О. Л. ШЕПЕЛЬ, М. П. ХОРНЯК, А. Ю. ШЕВЧЕНКО

Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН обособленное подразделение «Дальневосточного научно-исследовательского института сельского хозяйства», ул. Дзержинского, 54, Хабаровск, 680000, Российская Федерация

Резюме. Изучение образцов сои проводили в 2022–2025 гг. в Хабаровском крае с целью поиска источников хозяйственно ценных признаков. Объектом исследований служил 31 сортообразец разного географического происхождения из коллекции Всероссийского института растениеводства. Стандарты – Марината и Батя. Определены источники хозяйственно ценных признаков и хорошей адаптации к условиям Среднего Приамурья. По скороспелости выделен польский образец Artic, созревающий раньше Маринаты на 21 день. Среднераннеспелые немецкие образцы Senu 8107 и 28/74 по числу бобов превысили стандарт Марината на 31,2...37,4 %. По массе семян выделились Bydgoska 052, 122 и Нунь-цзян-да-доу, превысившие стандарт Батя на 14,0, 16,5 и 23,2 % соответственно. По массе 1000 семян китайский Нунь-цзян-да-доу и шведские образцы 827-4-23 и Fiskeby III превзошли стандарт Батя на 8,0...38,0 %. Стабильно высоким накоплением белка отличались российский раннеспелый сорт Омская 3, китайский среднеспелый Нунь-цзян-да-доу и позднеспелый канадский образец 153, у которых величина этого показателя была выше, чем у стандарта Марината, на 20,0, 14,5 и 17,5 % соответственно. Выявлены значимые SNP: glyma.Wm82.gnm4.Gm10_29783464, glyma.Wm82.gnm4.Gm17_18957792, glyma.Wm82.gnm4.Gm19_48709768, glyma.Wm82.gnm4.Gm20_3018597, glyma.Wm82.gnm4.Gm20_34925252, ассоциированные с продолжительностью вегетационного периода, и glyma.Wm82.gnm4.Gm02_22629465, glyma.Wm82.gnm4.Gm04_7045933, glyma.Wm82.gnm4.Gm17_20219353 – с временем цветения. У раннеспелых и среднераннеспелых сортов участки хромосом, ассоциированные с продолжительным вегетационным периодом, не обнаружены. У среднеспелых сортов маркеры отмечены на разных хромосомах, а у сортов с периодом вегетации более 120 дней выявлены от одного до трех маркеров в генотипе. Образцы Mutante: Stamm 54/145 M4789/74, 122 и ВНИИОЗ-85, имеющие уникальное сочетание аллелей, отвечающих за раннее цветение, будут использоваться в дальнейшем для создания разнообразного гибридного материала.

Ключевые слова: соя, сорт, период вегетации, признак, кластерный анализ, коэффициент вариации, генотипирование.

Сведения об авторах: Т. А. Асеева, доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН, директор; О. Л. Шепель, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник (e-mail: sestr71@rambler.ru); М. П. Хорняк, младший научный сотрудник; А. Ю. Шевченко, младший научный сотрудник.

Для цитирования: Результаты изучения коллекции сои в условиях Среднего Приамурья / Т. А. Асеева, О. Л. Шепель, М. П. Хорняк и др. // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. № 4. С. 25–33. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_25.

Results of the study of soybean collection under the conditions of the Middle Amur region

T. A. Aseeva, O. L. Shepel, M. P. Khorniyak, A. Yu. Shevchenko

Far Eastern Research Institute of Agriculture, Khabarovsk Federal Scientific Center, Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Dzerzhinskogo, 54, Khabarovsk, 680000, Russian Federation

Abstract. A study of soybean accessions was conducted in 2022–2025 in Khabarovsk Krai to identify sources of economically valuable traits. The object of the study was 31 soybean varieties of different geographical origins from the collection of the All-Russian Institute of Plant Industry. The standards are Marinata and Batya. The sources of economically valuable traits and good adaptation to the conditions of the Middle Amur region were determined. The Polish variety Artic, maturing 21 days earlier than Marinata, stood out for its earliness. The mid-early maturing German varieties Senu 8107 and 28/74 exceeded the Marinata standard in pod number by 31.2–37.4%. Bydgoska 052, 122, and Nun-jiang-da-dou stood out in terms of seed weight, exceeding the Batya standard by 14.0, 16.5, and 23.2%, respectively. In terms of thousand grain weight, the Chinese Nun-jiang-da-dou and the Swedish samples 827-4-23 and Fiskeby III exceeded the Batya standard by 8.0–38.0%. The Russian early-ripening variety Omskaya 3, the Chinese mid-ripening Nun-jiang-da-dou and the late-ripening Canadian sample 153 were distinguished by consistently high protein accumulation, with this indicator being higher than that of the Marinata standard by 20.0, 14.5 and 17.5%, respectively. Significant SNPs were identified: glyma.Wm82.gnm4.Gm10_29783464, glyma.Wm82.gnm4.Gm17_18957792, glyma.Wm82.gnm4.Gm19_48709768, glyma.Wm82.gnm4.Gm20_3018597, glyma.Wm82.gnm4.Gm20_34925252, associated with the duration of the growing season, and glyma.Wm82.gnm4.Gm02_22629465, glyma.Wm82.gnm4.Gm04_7045933, glyma.Wm82.gnm4.Gm17_20219353 – with the flowering time. Chromosomal regions associated with a long growing season were not detected in early- and mid-season varieties. In mid-season varieties, markers were detected on different chromosomes, while in varieties with a growing season of more than 120 days, one to three markers were detected in the genotype. Mutante varieties: Stamm 54/145 M4789/74, 122, and VNIIOZ-85, which have a unique combination of alleles responsible for early flowering, will be used in the future to create the diverse hybrid material.

Keywords: soybean; variety; growing season; trait; cluster analysis; coefficient of variation; genotyping.

Author Details: T. A. Aseeva, D. Sc. (Agr.), corresponding member of the RAS director; O. L. Shepel, Cand. Sc. (Agr.), senior research fellow; M. P. Khorniyak, junior research fellow; A. Yu. Shevchenko, junior research fellow.

For citation: Aseeva TA, Shepel OL, Khorniyak MP, et al. [Results of the study of soybean collection under the conditions of the Middle Amur region]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(4):25–33. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_25.

Соя – стратегически важная многоцелевая и основная зернобобовая культура, возделываемая в Дальневосточном федеральном округе [1, 2]. В частности, по Хабаровскому краю, по данным Минсельхоза, прирост фактически убранных площадей, занятых соей, за последние 4 года составил 25 % и в 2024 г. соя была убрана на площади 32,9 тыс. га, тем самым обеспечив валовый сбор 50 тыс. т. Неуклонный

спрос на сою, как на высокодоходную сельскохозяйственную культуру, также обусловлен ее уникальным биохимическим составом [3, 4]. На сегодняшний день стоит задача обеспечить товаропроизводителей семенами отечественных сортов сои до уровня 75 % к 2030 г. К основными требованиями, предъявляемыми к сортам сои, возделываемым в Дальневосточном регионе, относят: оптимальную продолжительность ве-

гетационного периода (120...130 дней), позволяющая сформировать высокую урожайность (до 5 т/га), высокое прикреплению нижнего боба, устойчивость растений к полеганию и растрескиванию бобов при перестое, высокая масса 1000 семян (более 200 г), содержание белка не ниже 40 %. Лимитирующим фактором в условиях Среднего Приамурья считают ограниченные тепловые ресурсы, поэтому создание сортов, максимально реализующих свой потенциал в таких условиях актуально. Продолжительность вегетационного периода зависит от генетических особенностей растений, условий их произрастания (температура и влажность), а также от специфических требований отдельных сортов, которые могут либо ускорить, либо замедлить начало фазы цветения [5]. Основой при подборе пар скрещиваний служит более детальное изучение многообразия гермоплазмы с использованием современных молекулярно-генетических методов для маркер-ассоциированной селекции (МАС). Интеграция данных полевой оценки с полногеномным анализом позволит идентифицировать маркеры, ассоциированные с целевыми признаками, что ускорит селекционный процесс.

Цель исследования – выявление скороспелых, высокопродуктивных, высокобелковых образцов сои, адаптивных к гидротермическим условиям Среднего Приамурья для дальнейшего использования их в качестве исходного материала в селекции.

Для ее достижения решали следующие задачи: определить элементы структуры урожая и продуктивности сортов сои, выделить образцы с высоким содержанием белка и высокой массой 1000 семян, устойчивые к биотическим и абиотическим факторам среды.

Условия, материалы и методы. Полевые опыты проводили в 2022–2025 гг. на опытных полях селекционного севооборота ДВ НИИСХ (Хабаровский край, Хабаровский район, с. Восточное, 135° восточной долготы, 48° северной широты).

Материалом для исследования служили 31 образец сои, любезно предоставленные ВИР: образцы из России – 8 шт., Германии – 5, Польши – 4, Швеции – 4, КНР – 4, Канады – 3, Латвии – 1, Чехословакии – 1, Молдовы – 1. В качестве стандартов использовали среднеспелые сорта хабаровской селекции – Марина-та и Батя из генофонда УНУ «Генетическая коллекция растительных ресурсов ДВ НИИСХ» (USU_3686028).

В 2025 г. на базе Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий» проведен первый этап генотипирования. Для этого выполнен анализ полногеномных ассоциаций (GWAS) независимой выборки из 24 образцов (10 образцов со сроком вегетации до 110 дней, 14 – с вегетацией более 110 дней). Выделение ДНК выполняли в соответствии с протоколом производителя, используя набор реагентов Фитоскрин-Экспресс (Синтол, Россия). Подготовку библиотек для GBS-секвенирования (genotyping-by-sequencing) проводили с использованием рестриктаз HindIII и FaeI (СибЭнзайм, Россия). Секвенирование осуществляли на платформе Illumina в компании Novagen. Биоинформатический анализ SNP включал выравнивание прочтений на референсный геном *Glycine_max_v4.0* (GCF_000004515.6). Перед фильтрацией генотипы с глубиной покрытия $DP < 3$ были установлены как отсутствующие. Далее применяли фильтрацию с помощью bcftools с критериями: доля пропущенных генотипов $F_MISSING < 0,2$, сред-

няя глубина покрытия $AVG(FORMAT/DP) > 7$, минимальная частота аллеля $AF \geq 0,05$.

Структуру популяции рассчитывали с использованием анализа основных компонентов (PCA) на основе данных SNP по всему геному, причем первые три основных компонента были фиксированными ковариантами в модели. Пороговые значения значимости определяли с использованием поправки Бонферрони ($\alpha = 0,05$).

Почва опытного участка лугово-бурья оподзоленная, из-за тяжелого механического состава и низкой водопроницаемости, во время обильного выпадения атмосферных осадков быстро переувлажняется. Содержание гумуса в пахотном слое – 1,23...2,33 % (по Тюрину в модификации ЦИНАО), pH солевой вытяжки – 3,9...4,0 ед., гидролитическая кислотность 3,25...6,57 мг-экв./100 г почвы (по Каппену-Гильковицу). P_2O_5 – 3,45...9,67 мг/100 г; K_2O – 4,60...17,70 мг/100 г абсолютно сухой почвы (по Кирсанову в модификации ЦИНАО). Предшественник – мягкая пшеница яровая (2022, 2023 гг.) и сидеральный пар (2024 г.).

Образцы высевали вручную на гребнях шириной 70 см в одну строчку, расстояние между растениями в рядке 10 см, площадь делянки 2,8 м², повторность – двукратная. Через 10 номеров располагали сорта-стандарты. Уборку проводили вручную в фазе технической спелости по мере созревания сортообразцов. Учет продуктивности и основные селекционно-хозяйственные признаки проводили согласно методике ВИР, оценивали 10 растений. В лабораторных условиях определяли следующие показатели: длину стебля, высоту прикрепления 1-го боба, число бобов на растении, число бобов на продуктивном узле, число семян в бобе, число семян с растения, массу семян с растения, массу 1000 семян. Содержание белка в семенах определяли методом Кьельдаля (2022–2024 гг.), содержание масла в семенах – согласно ГОСТ 13496.15-2016 (2023, 2024 гг.) в лаборатории биохимии отдела селекции зерновых культур и сои.

Статистическую обработку данных осуществляли с использованием программы Microsoft Excel и StatSoft. Существенность различий между средними определяли по критерию Фишера при $p \leq 0,05$. Группировку в кластерном анализе осуществляли на основе предварительно стандартизованных показателей, включающих продолжительность периода вегетации, высоту растений, высоту прикрепления первого боба, число ветвей, число бобов на растении, массу и число семян с растения, массу 1000 семян, число бобов на продуктивный узел, а также содержание белка и масла в семенах. Сорта на группы распределяли с использованием методов кластерного анализа (иерархическая классификация, метод Варда, евклидово расстояние).

Посев проводили в оптимальные для культуры сроки – 15...18 мая, полные всходы отмечали 3...6 июня. Продолжительность периода с температурой приземного слоя воздуха выше 10 °C превышала среднемесячные показатели (142 дня) на 10...13 дней (рис.1). По числу дней с температурой выше 15 °C – максимум зафиксирован в 2023 г. (114 дней); минимум – в 2024 г. (98 дней).

Оптимальные температурные условия сложились по фазам развития культуры неравномерно: начальный период роста и развития растений наиболее благоприятно протекал в 2022 г.; генеративный период – в 2024 г. Максимальное число дней с температурами выше 30 °C во время массового цветения и форми-

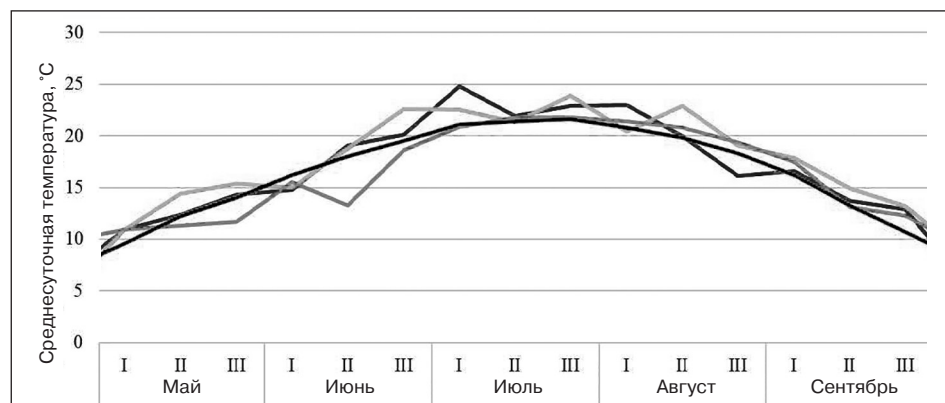


Рис. 1. Среднесуточная температура воздуха за годы исследований: — 2022 г., — 2023 г., — 2024 г., — среднее многолетнее.

рования бобов отмечено в 2023 г., что могло оказать влияние на формирование урожая. Характер увлажнения существенно различался по годам (рис. 2). Условия 2023 г. были самыми сухими, за вегетационный период выпало 450 мм осадков, что ниже нормы на 11,2 %. В 2022 г. в августе выпало 366 мм осадков, что превысило среднее многолетнее значение в 2,4 раза. Условия вегетационных периодов 2023 (ГТК=1,7) и в 2024 (ГТК=1,8) гг. были благоприятными для развития и формирования урожая сои, а 2022 г. характеризовался излишним переувлажнением почвы (ГТК=2,5). Такое разнообразие агрометеорологических условий позволило полноценно оценить устойчивость образцов сои к различным стрессовым факторам и определить наиболее перспективные для дальнейшего использования в селекционном процессе.

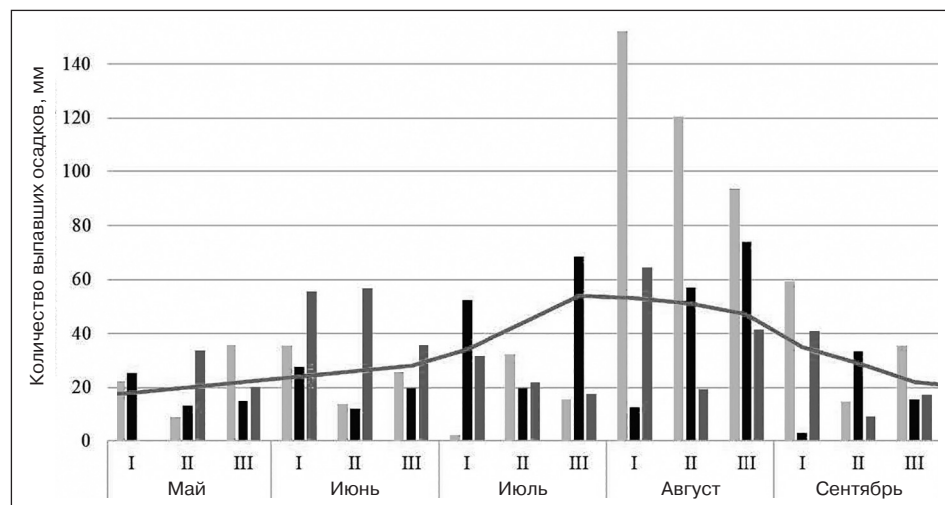


Рис. 2. Количество выпавших осадков в годы исследований: — 2022 г., — 2023 г., — 2024 г., — среднее многолетнее.

Результаты и обсуждение. Основываясь на продолжительности вегетационного периода и набранных сумм активных температур, мы распределили изученные сорта на следующие группы: раннеспелая с вегетационным периодом до 100 дней, сумма активных температур составила 1963...2004 °C – 6 образцов; среднераннеспелая – 101...110 дней; 2012...2114 °C – 13 образцов; среднеспелая – 111...120 дней; 2142...2226 °C – стандартный сорт Марината (118 дней, 2226 °C) и 6 образцов; среднепозднеспелая – 121...130 дней; 2245...2268 °C – стандартный сорт Батя (128 дней, 2268 °C) и 2 образца; позднеспелая – 131 и более дней – 4 образца.

В селекции наиболее ценными считают сорта, которые устойчиво сохраняют характерную продолжительность вегетационного периода в условиях конкретного агроклиматического региона [6, 7]. Длительность вегетационного периода у образцов составила от 97 до 137 дней (табл. 1). В среднем, за годы исследований, продолжительность вегетационного периода менялась не значительно ($C_v=4,9\%$), максимальной реакцией на

изменяющиеся условия произрастания (8,6...14,9 %) выделялись сорта Fiskeby III, УСХИ-6, 28/74, Нунцзян-да-доу, Дун-нун 47-1В и Ласточка.

Наблюдали значительную разницу в изменчивости продолжительности отдельных периодов вегетации. Отмечали сортовую реакцию на меняющиеся условия. Период от всходов и до массового цветения в годы исследований длился от 33 (образец 856-3-3) до 59 дней (образец 153). Внутрисортная вариабельность продолжительности периода изменялась от 2,0 % (ВНИИОЗ-91) до 21,0 % (у образцов Mutante: Stamm 54/145 M4112/74 и ВНИИОЗ-106). Низкая изменчивость признака ($C_v=3,0\ldots9,0\%$) отмечена у образцов ВНИИОЗ-85, Дун-нун 47-1В, КСХИ 1089, Bydgoska 052, 122, Ласточка, 2348.

Цветение длилось в среднем от 8 (у образцов Омская 3 и Arctic) до 19 дней (Батя), низкую вариабельность ($C_v=12,0\ldots15,0\%$) наблюдали у образцов 856-3-3, Rana, Батя, Mutante: Stamm 54/145 M4112/74 и 28/74. Период цветения – созревания длился в среднем от 46 (Вецеауцес, $C_v=4,0\%$) до 73 дней (Батя, $C_v=3,0\%$).

Высота растений и высота прикрепления нижнего боба обуславливают технологичность возделывания культуры [8]. В условиях опыта длина стебля у образцов была в диапазоне 25,8...120,1 см, внутрисортная вариация при этом составила 3...23 %,

при среднем значении изменчивости 12,1 % (табл.2). Незначительной реакцией на изменяющиеся условия ($C_v=3\ldots9\%$) отличились образцы КСХИ 1089, 28/74, Нордик 138, Омская 3, ВНИИОЗ-91, ВНИИОЗ-85, 843-20-1, 122, Батя, ОТ 80-124, 827-4-23, Вецеауцес и Rana. У образцов ВНИИОЗ-91, ВНИИОЗ-85, 2348, 153 длина стебля была больше, чем у стандартного сорта Батя, что негативно влияет на устойчивость к полеганию. Высота прикрепления первого боба варьировала от 5,7 до 15,9 см при внутрисортной изменчивости 3,0...35,0 %. Среди раннеспелой группы следует отметить образцы Rana (8,7 см) и Вецеауцес (11,2 см), которые наряду со стандартным сортом Маринатой (10,8 см)

Таблица 1. Характеристика вегетационного периода коллекционных образцов сои за 2022–2024 гг.

№ кат ВИР	Образец	Происхождение	Продолжительность периода, дни			
			всходы- цветение	цветение	цветение- созревание	всходы- созревание
Раннеспелые						
6456	Artic	Польша	34	8	55	97
5124	Вецеауцес	Латвия	41	11	46	98
5581	827-4-23	Швеция	34	10	54	98
6080	Rana	Чехословакия	38	12	49	98
5584	843-20-1	Швеция	34	10	55	99
6436	Омская 3	Россия	35	8	56	99
Среднее по группе			36	10	53	98
Среднераннеспелые						
5586	856-3-3	Швеция	33	13	56	101
7136	Нордик 138	Польша	36	12	54	101
9999	ВНИИОЗ-106	Россия	37	11	52	101
10549	Semu 8001	Германия	35	13	53	101
10551	Semu 8107	Германия	36	12	54	102
5588	Fiskeby III	Швеция	33	10	60	103
6785	Mutante: Stamm 54/145 M4789/74	Германия	37	12	54	103
10625	РАН-288	Польша	33	13	58	104
9953	Соер-4	Россия	37	13	55	105
10611	ОТ 80-124	Канада	38	13	56	107
6790	28/74	Германия	39	12	58	109
9951	УСХИ-6	Россия	34	14	62	109
9952	Соер-3	Россия	38	13	58	109
Среднее по группе			36	12	56	104
Среднеспелые						
6777	Mutante: Stamm 54/145 M4112/74	Германия	36	13	63	111
4842	КСХИ 1089	Молдова	40	11	64	115
5376	Дун-нун 47-1В	КНР	41	12	61	115
5564	Нунь-цзян-да-доу	КНР	45	10	62	117
6795	Vydgoska 052	Польша	40	14	63	117
8896	Ласточка	Россия	39	14	65	118
	Марината, st	ДВ НИИСХ	41	15	62	118
Среднее по группе			40	13	63	116
Среднепозднеспелые						
7372	122	Канада	35	17	71	124
	Батя, st	ДВ НИИСХ	36	19	73	128
2341	2341	КНР	53	11	65	129
Среднее по группе			41	16	70	127
Позднеспелые						
2348	2348	КНР	58	11	65	133
9997	ВНИИОЗ-85	Россия	46	18	70	134
9998	ВНИИОЗ-91	Россия	53	11	72	135
7951	153	Канада	59	13	66	137
Среднее по группе			54	13	68	135
Cv, %			10.9	23.2	7.0	4.9

характеризуются стабильно высоким прикреплением первого боба ($C_v=5,0\%$, $C_v=6,0\%$ и $C_v=7,0\%$ соответственно).

Особую роль в селекционной работе играет исследование вариаций количественных и качественных признаков, которые зависят как от генетических факторов, так и от внешних условий, значительно различающихся по степени своего влияния. Такие признаки, как количество бобов на растении и масса семян с одного растения, испытывают выраженную экологическую изменчивость [9]. За годы исследований в среднем на растении формировалось от 32 до 95 бобов при внутрисортной вариативности признака 2,0...48,0 %. Среди раннеспелых сортов выделили образец Вецеауцес, который наряду со стандартными сортами формировал 57 бобов, $C_v=14,0\%$. Образцы Semu 8107 и 28/74 из среднераннеспелой группы сформировали более 70 бобов, что боль-

ше, чем у стандартной Маринаты на 31,2 % и 37,4 % соответственно, при этом вариативность признака составила 6,0 % и 5,0 %.

Количество семян в бобе служит одним из показателей продуктивности, напрямую влияющим на урожайность растений. Признак довольно стабильный, $C_v=4,6\%$. За годы исследований в среднем растения формировали от 1,7 (Fiskeby III) до 2,6 (Батя) семян в бобе. Число семян в бобе у среднеспелого образца Дун-нун 47-1В было на уровне стандартного сорта Марината (2,5 шт.). В раннеспелой группе максимальное число семян в бобе отмечено у образцов 827-4-23, 843-20-1, Омская 3 и Arctic (2,3 шт.). У образцов 122 и ВНИИОЗ-91 при более продолжительном периоде вегетации (124 и 135 дней), число семян в бобе составило 2,5 шт.

Число семян с растения наряду с таким показателем, как масса семян с растения – основной

Таблица 2. Характеристика сортов в среднем за 2022–2024 гг.

Образец	Продолжи- тельность вегетации, дни	Высота, см		Количество, шт.			Масса , г		Содержание в семенах, %	
		рас- тения	прик- репления 1-го боба	бобов на рас- тении	семян в бобе	семян с расте- ния	семян с расте- ния	1000 семян	белка	масла
Раннеспелые										
Arctic	97	25,8	5,7	31,7	2,3	74	12,2	187	36,98	20,95
Вецеауцес	98	47,7	11,2	57,5	2,0	112,5	22,4	219	36,38	19,26
827-4-23	98	32	6,6	39,8	2,3	91,7	21,1	240	36,13	22,22
Rana	98	58,3	8,7	65,5	1,9	118,5	14,4	141	36,36	21,59
843-20-1	99	33,1	7,3	47,7	2,3	108,6	21,7	212	35,37	21,82
Омская 3	99	29,3	8,1	32,8	2,3	74,5	11,8	178	42,15	18,89
Среднее	98	37,7	7,9	45,8	2,2	96,6	17,3	196	37,23	20,79
НСР ₀₅		4,9	2	12,6	0,2	24,4	4,1	20,4	1,8	2,2
Среднераннеспелые										
856-3-3	101	61,4	6,7	54,9	2,3	127,1	22,7	185	33,51	22,24
Нордик 138	101	62	7,8	64,8	2,3	151,8	20,4	150	36,64	19,03
ВНИИОЗ-106	101	56,3	7,9	85	2,1	178,7	28,4	176	35,2	21,99
Semu 8001	101	75,3	10,2	69,3	2,2	147,5	22,5	177	34,83	21,28
Semu 8107	102	77	10,1	75,7	2,1	162,2	26,2	177	35,2	22,75
Fiskeby III	103	36	6,4	40	1,7	67,8	18,7	289	37,35	21,04
Mutante: Stamm 54/145 M4789/74	103	56,2	8,5	68,8	2,2	149,3	28,3	200	36,26	21,77
РАН-288	104	64,1	6,8	67,4	2,1	141,9	24,1	188	36,34	21,01
Соер-4	105	69,4	9,8	88,3	2,2	202,3	34,1	189	34,96	22,46
ОТ 80-124	107	59,2	8,6	64,1	2	127,8	19,9	167	36,99	21,03
28/74	109	62,7	8,7	79,3	1,9	148,6	23,4	170	37,69	19,56
УСХИ-6	109	58,2	8,9	63,9	2,2	142,6	24,4	185	35,57	22,95
Соер-3	109	54,6	7,1	94,4	2	194	29,3	168	36,02	22,59
Среднее	104	61	8,3	70,5	2,1	149,3	24,8	186	35,89	21,51
НСР ₀₅		9,1	2,2	27,5	0,1	62,3	10,5	15,8	3,6	3,6
Среднеспелые										
Mutante: Stamm 54/145 M4112/74	111	50,3	7,1	59,6	2,1	127,1	25,3	209	38,61	19,52
КСХИ 1089	115	59,6	8,6	63,6	1,9	116,7	23,4	186	38,89	19,05
Дун-нун 47-1В	115	87,5	9,1	92,8	2,5	226,5	34	163	37,27	20,59
Нунь-цзян-да-доу	117	78	10,6	80,8	2,1	166,5	35	226	40,15	15,55
Bydgoska 052	117	59,8	8,3	95,2	2,1	201,5	32,4	186	38,2	19,02
Ласточка	118	79,1	9,4	52,6	2,1	111,4	17,5	173	35,71	20,89
Марината, st	118	73,2	10,8	57,7	2,5	145,5	25,4	185	35,06	21,24
Среднее	116	69,6	9,1	71,8	2,2	156,5	27,6	190	37,7	19,41
НСР ₀₅		18,1	4,1	28,5	0,2	66,3	11,2	26,4	3,3	4,3
Среднепозднеспелые										
122	124	85,7	10,2	70,9	2,5	179,2	33,1	193	37,74	19,75
Батя, st	128	92,7	9,4	55,1	2,6	142,3	28,4	210	33,64	21,6
2341	129	83,5	12,2	92,9	2,2	204	27,3	136	38,89	19,06
Среднее	127	87,3	10,6	73	2,5	175,1	29,6	180	36,76	20,13
НСР ₀₅		15,5	1,5	29,6	0,1	66,5	5,1	22,5	4,8	1
Позднеспелые										
2348	133	104,9	12	82,8	2,1	173,5	28,2	164	38,48	18,9
ВНИИОЗ-85	134	96,4	10,7	61,4	1,9	116,5	20,1	181	39,12	16,93
ВНИИОЗ-91	135	95,6	15,9	66,8	2,5	163,1	22	145	37,11	19,61
153	137	120,1	13,7	67,9	2,2	148,4	31,7	222	41,2	17,33
Среднее	135	104,3	13,1	69,7	2,2	150,4	25,5	178	38,98	18,19
НСР ₀₅		24,2	3,1	12,7	0,1	26,1	9,2	32,7	3,1	1,8

критерий продуктивности. У изучаемых образцов внутрисортная вариабельность отмечена от 3,0 % (Марината) до 56,0 % (Соер-4) при средней изменчивости признака 23,6 %. Низкой вариабельностью признака отличаются стандартные сорта (Марината $C_v=3,0$ %, Батя $C_v=7,0$ %), формирующие более 140 шт. семян, а также раннеспелые 843-20-1 (109 шт., $C_v=6,0$ %), 827-4-23 (92 шт., $C_v=10,0$ %). Образцы Semu 8107 (162 шт., $C_v=8,0$ %) и 122 (179 шт., $C_v=9,0$ %) превзошли стандартный сорт Марината на 11,5 и

23,2 % соответственно.

Вариабельность массы семян с растения в среднем за годы исследований составила 19,6 % при внутрисортной от 6,0 % (Semu 8107) до 39,0 % (Соер-4). Среди раннеспелых сортов максимальная масса отмечена у образца Вецеауцес (22,4 г, $C_v=13,0$ %), среднеспелых – Mutante: Stamm 54/145 M4789/74 (28,3 г, $C_v=11,0$ %). Образцы Bydgoska 052, 122 и Нунь-цзян-да-доу сформировали высокую массу семян при относительно низкой внутрисортной вариабельности (12,0...19,0 %),

превышение стандартного сорта Батя при этом составила 14,0, 16,5 и 23,2 % соответственно.

Вариабельность массы 1000 семян за годы испытания составляла от 2,0 % (2341) до 21,0 % (Ласточка). Образцы Нунь-цзян-да-доу ($C_v=7,0$ %), 827-4-23 ($C_v=6,0$ %) и Fiskeby III ($C_v=7,0$ %) превысили значение признака у стандартного сорта Бати на 8,0...38,0 %.

Известно, что содержание белка в зерне сои варьируется в зависимости от географического расположения и в большей степени определяется воздействием метеорологических факторов в течение вегетационного периода. В различных почвенно-климатических зонах влияние метеорологических условий на биохимический состав семян сои неодинаково, что способствует формированию различий в их качестве и урожайности [10, 11].

В среднем по опыту содержание белка изменялось от 29,6 % (Semu 8001, 2022 г.) до 43,8 % (Омская 3, 2024 г.), при этом внутрисортная изменчивость варьировала от 2,0 % (образец 2341) до 12,0 % (Ласточка). Самое высокое накопление белка отмечено в 2024 г. (в среднем по опыту 39,2 %), низкое – в 2023 г. (36,9 %). В отдельные годы высокое содержание белка отмечали у разных образцов, однако стабильно высокое накопление отмечено только у раннеспелой Омской 3, у среднеспелого Нунь-цзян-да-доу и позднеспелого образца 153. Превышение по сравнению со стандартным сортом Марината составляет 20, 14,5 и 17,5 % соответственно.

Масличность семян определяли в 2023 и 2024 гг. и зафиксировали более высокие значения в более сухой и теплый 2023 г. Так, содержание жира в семенах в 2023 г. варьировало от 17,6 % (153) до 23,7 % (856-3-3); в 2024 – от 18,0 % (Омская 3) до 22,1 % (РАН-288), среднее значение показателя по опыту составило 22,9 и 20,8 % соответственно. У образцов Нунь-цзян-да-доу, РАН-288 и Semu 8001, в отличие от остальных, масличность была выше в 2024 г. Реакция сортов на изменяю-

щиеся условия была разной, сортовая изменчивость составила от 0,5 % (ВНИИОЗ-85) до 23,5 % (Mutante: Stamm 54/145 M4789/74). Максимальное содержание жира за два года исследований с низкой изменчивостью отмечено у образцов Semu 8107 (22,8 %), ВНИИОЗ-106 (22,0 %), что превышает стандартный сорт Батя на 5,6 и 1,8 % соответственно.

После статистической обработки данных методом кластерного анализа установлено, что в рассматриваемой генеральной совокупности выделяются пять хорошо различимых кластера (табл.3, рис. 3). Высокие значения коэффициентов вариации в некоторых кластерах для показателей продолжительность вегетационного периода, высота растений, количество семян с растения и масса 1000 семян свидетельствуют о большом размахе включенных в кластер сортов именно по этим характеристикам. Таким образом, для сортов, выделенных в кластер, характерен схожий набор признаков внутри каждого кластера и достоверные различия с другими группами для показателей: содержание белка и масла в семенах, число ветвей на растении, число бобов на продуктивный узел, масса семян с растения, количество семян в бобе.

Кластерный анализ позволил одновременно учитывать всю совокупность изучаемых признаков и сгруппировать сорта, обладающие различной селекционной ценностью.

Полученная дендрограмма позволит выбирать отдаленные сорта для дальнейшего скрещивания, что поспособствует расширению генетического разнообразия нового гибридного материала.

Ускорение селекционного процесса – главная задача селекционера и в этом широкую возможность дает использование молекулярных маркеров. Полногеномное ассоциативное исследование (GWAS) – один из передовых методов, используемых для выявления участков генома, связанных со многими экономически ценными характеристиками сельскохозяйственных культур. В последние несколько лет этот

Таблица 3. Статистические характеристики кластеров, объединяющих разные сорта сои (2022–2024 гг.)

I кластер			II кластер			III кластер			IV кластер			V кластер		
среднее	σ	C_v , %	среднее	σ	C_v , %	среднее	σ	C_v , %	среднее	σ	C_v , %	среднее	σ	C_v , %
Продолжительность вегетационного периода, дни														
105,4	5,7	32,9	112,1	11,8	139,5	126,5	8,5	72,6	99,2	2,1	4,5	120,7	12,3	152,4
Высота растений, см														
65	8,2	66,5	66,3	15,9	252	94,1	18,3	336,3	34	7,6	57,5	79,3	18,7	349,2
Высота прикрепления первого боба, см														
8,9	1,3	1,7	8,6	1,3	1,8	11	1,9	3,5	7,6	2	3,8	10,6	3	8,9
Число ветвей на растении, шт.														
4	1,1	1,3	3,8	1,1	1,2	4,6	1,4	1,9	3,9	0,8	0,6	6,5	1,8	3,2
Число бобов на растении, шт.														
70,2	8,4	70,8	60,2	4,9	23,9	68,7	10,6	112,3	41,6	9,7	93,9	87,6	10,1	102,6
Число бобов на продуктивный узел, шт.														
2,6	0,2	0,1	2,5	0,2	0,1	2,2	0,1	0,1	2,4	0,2	0,1	2,4	0,3	0,1
Масса семян с растения, г														
24,8	2,6	6,8	20,5	3,7	13,7	32,1	2,8	7,7	18	4,8	23	29,6	4,4	19
Количество семян с растения, шт.														
152	11,7	136,4	120,7	6,5	42,8	159,1	16,9	285	88,2	19,1	364,2	195	21	441,4
Количество семян в бобе, шт.														
2,2	0,2	0,1	2	0,2	0,1	2,3	0,3	0,1	2,2	0,3	0,1	2,2	0,2	0,1
Масса 1000 семян, г														
178,7	13,9	194	177,3	20,7	429,2	212,7	14,8	219,4	220,9	40,3	625,8	164,5	19,6	383,1
Содержание белка в семенах, %														
35,9	0,9	0,9	37	2	4,2	38,2	3,4	11,3	37,4	2,4	5,9	37,3	1,4	2
Содержание масла в семенах, %														
21,3	1,3	1,7	20,2	1,8	3,3	18,5	2,7	7,1	20,7	1,3	1,8	20,3	1,6	2,6

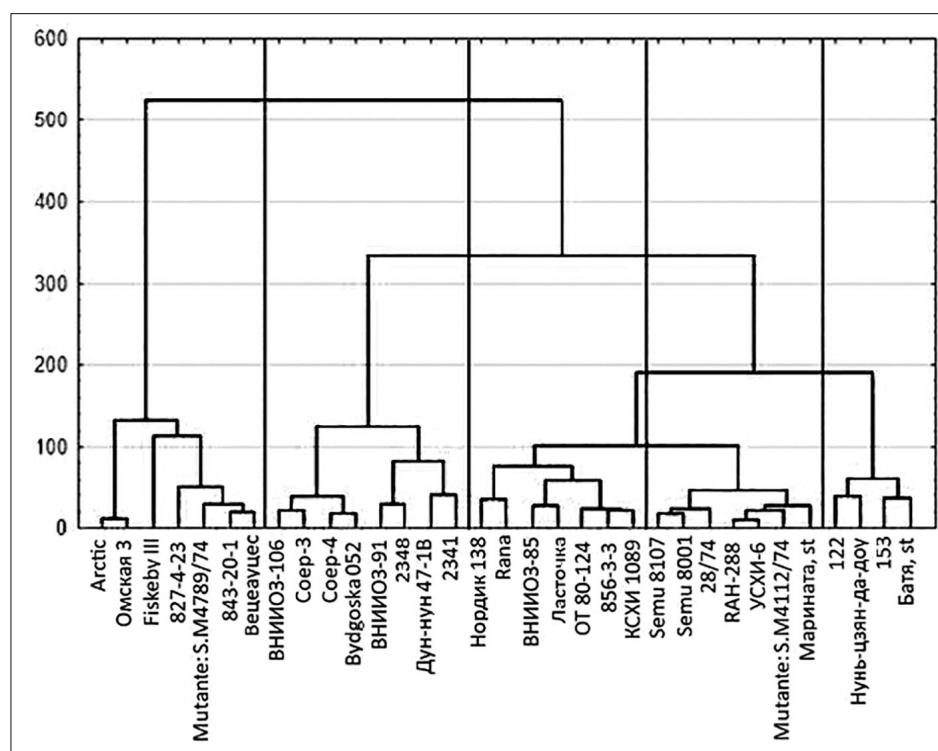


Рис. 3. Дендрограмма кластеризации сортов сои по селекционным признакам (среднее за 2022–2024 гг.).

метод активно развивается [12, 13]. Идентификация генов-кандидатов и разработка связанных с ними молекулярных маркеров – важнейшие этапы маркер-ассоциированной селекции [14].

Анализ полногеномных ассоциаций (GWAS) у 24 образцов проведенный в 2025 г. с помощью статистических моделей FarmCPU и BLINK выявил несколько значимых SNP:

glyma.Wm82.gnm4.Gm10_29783464,
glyma.Wm82.gnm4.Gm17_18957792,
glyma.Wm82.gnm4.Gm19_48709768,
glyma.Wm82.gnm4.Gm20_3018597,
glyma.Wm82.gnm4.Gm20_34925252, ассоциированные с продолжительностью вегетационного периода и
glyma.Wm82.gnm4.Gm02_22629465,
glyma.Wm82.gnm4.Gm04_7045933,
glyma.Wm82.gnm4.Gm17_20219353 – с временем цветения.

У раннеспелых и среднераннеспелых сортов участки хромосом, ассоциированные с продолжительным вегетационным периодом, не были обнаружены. У среднеспелых сортов маркеры обнаружены на разных хромосомах, а у сортов с периодом вегетации более 120 дней выявлены от одного до трех маркеров в генотипе. Раньше зацветают образцы, сочетающие в своем генотипе ассоциированные участки на 4 и 17 хромосомах, позже – только на 17 (табл. 4).

Образец 122 благодаря присутствию в генотипе уникальных аллелей на всех трех хромосомах, зацветает на уровне раннеспелых образцов. В позднеспелых образцах участки хромосом, ассоциированные с ранним цветением не обнаружены, исключение составляет сорт ВНИИОЗ-85. Интерес представляет сопоставление реакции генотипов на условия произрастания. Сокращение вегетационного периода у некоторых образцов в среднеспелой группе, которое наблюдалось на фоне более высоких температур в 2023 г., видимо связано с наличием двух маркеров

раннего цветения. Фенотипические проявления реакции образцов Батя и 2341 на меняющиеся условия практически одинаковы, однако генетический анализ подтверждает различие по генотипу, и это отражено на дендрограмме. Генотипирование позволяет выявить те различия между сортами, которые не проявляются фенотипически. Образцы Mutante: Stamm 54/145 M4789/74, 122 и ВНИИОЗ-85 имеющие уникальное сочетание аллелей, отвечающих за раннее цветение, будут использоваться в дальнейшем для создания максимально разнообразного гибридного материала. Полученные данные особенно ценны для маркер-вспомогательной селекции и дальнейшего повышения урожайности сои, поскольку они расширяют понимание системы,

лежащей в основе реализации этих сложных признаков. Однако малая выборка дает возможность сделать только предварительные выводы по характеру ассоциаций, поэтому исследования будут продолжены с расширенным набором маркеров.

Выводы. Проведенная сравнительная оценка позволила сгруппировать коллекционные сорта сои различного происхождения по комплексу взаимосвязанных признаков и отобрать генотипы с наилучшими технологическими и потребительскими свойствами с целью дальнейшего использования в селекционной работе. В результате анализа полученных данных определены источники хозяйственно ценных признаков и хорошей адаптацией к экстремальным условиям Среднего Приамурья. По скороспелости выделен польский образец Artic (97 дней), созревающий раньше Маринаты на 21 день. Раннеспелые образцы Rana (8,7 см) и Вецеауцес (11,2 см), наряду со стандартным сортом Марината (10,8 см), характеризуются стабильно высоким прикреплением первого боба ($C_v=5,0\%$, $C_v=6,0\%$ и $C_v=7,0\%$ соответственно). По числу бобов на растении выделен раннеспелый образец Вецеауцес, формирующий 57 бобов, что находится на уровне стандартов, и среднеспелые образцы Semu 8107, 28/74, формирующие более 70 бобов, что превысило стандарт Марината на 31,2 % и 37,4 % соответственно. Максимальное число семян в бобе отмечено у сортообразцов 827-4-23, 843-20-1, Омская 3 и Arctic (2,3 шт.), у образцов 122 и ВНИИОЗ-91 с более продолжительным периодом вегетации (124 и 135 дней) – 2,5 шт. По числу семян с растения образцы Semu 8107 и 122 (162 и 179 шт.) превзошли стандарт Марината на 11,5 и 23,2 % соответственно. Образцы Bydgoska 052, 122 и Нунь-цзян-да-доу формировали высокую массу семян с растения, превышение над стандартом Батя составило 14,0...23,2 %. Масса 1000 семян у образцов Нунь-цзян-да-доу, 827-4-23 и Fiskeby III была больше, чем у стандартного сорта Батя на 8,0...38,0 %. По ста-

Таблица 4. Результаты генотипирования

№ кат ВИР	Образец	Вегетацион- ный период, сутки	Расположение маркеров, увеличивающих вегетаци- онный период, хромосома				Расположение марке- ров раннего цветени- я, хромосома		
			10	17	19	20	2	4	17
Раннеспелые									
6456	Arctic	97							+
5581	827-4-23	98							+
6080	Rana	98							+
6436	Омская 3	99							+
Среднераннеспелые									
9999	ВНИИОЗ-106	101						+	+
5588	Fiskeby III	103							+
6785	Mutante: Stamm 54/145 M4789/74	103							+
10625	РАН-288	104						+	+
10611	ОТ 80-124	107							+
6790	28/74	109							+
Среднеспелые									
6777	Mutante: Stamm 54/145 M4112/74	111							+
4842	КСХИ 1089	115							+
5376	Дун-нун 47-1В	115				+		+	+
5564	Нунь-цзян-да-доу	117	+						+
6795	Bydgoska 052	117		+					
8896	Ласточка	118			+			+	+
	Марината, st	118	+			+		+	+
Среднепозднеспелые									
7372	122	124				+	+	+	+
	Батя, st	128			+	+		+	+
2341	2341	129	+		+	+			
Позднеспелые									
2348	2348	133				+			
9997	ВНИИОЗ-85	134			+	+			+
9998	ВНИИОЗ-91	135		+	+				
7951	153	137			+	+			

бильно высокому содержанию белка выделены Омская 3, Нунь-цзян-да-доу и 153, у которых оно превышало стандарт Марината на 14,5...20,0 %. По содержанию жира отличались образцы Сему 8107 (22,8 %), ВНИИОЗ-106 (22,0 %), превзошедшие стандарт Батя на 5,6 и 1,8 % соответственно.

По результатам анализа полногеномных ассоциаций (GWAS) выявлены значимые SNP, ассоциированные с продолжительностью вегетационного периода и временем цветения, которые распределены по хромосомам: 2, 4, 10, 17, 19 и 20. Вклад в генетический контроль вегетационного периода вносят множественные локусы с разными эффектами. У раннеспелых и среднераннеспелых сортов участки хромосом, ассоциированные с наиболее продолжительным вегетационным периодом, не обнаружены. У среднеспелых сортообразцов маркеры отмечены на разных хромосомах, а у образцов с периодом вегетации бо-

лее 120 дней выявлены от одного до трех маркеров в генотипе. Образцы Mutante: Stamm 54/145 M4789/74, 122 и ВНИИОЗ-85 имеющие уникальное сочетание аллелей, отвечающих за раннее цветение, будут использоваться в дальнейшем для создания максимально разнообразного гибридного материала.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках реализации Соглашения Минобрнауки РФ о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий от 17 апреля 2025 г. № 75-15-2025-188

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

- Васина Е. А., Бутовец Е. С., Лукьянчук Л. М. Результаты изучения исходного материала сои в условиях Приморского края для селекционных целей // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2022. Т. 183. № 4. С. 19–29. doi: 10.30901/2227-8834-2022-4-19-29.
- Бутовец Е. С., Лукьянчук Л. М. Адаптационные показатели перспективных сортов сои в условиях юга Дальнего Востока // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2024. Т. 185. № 4. С. 47–58. doi: 10.30901/2227-8834-2024-4-47-58.
- Изучение регенерантных линий сои по хозяйственно ценным и биохимическим характеристикам / Е. С. Бутовец, Л. М. Лукьянчук, Г. А. Кодирова и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2024. Т. 185. № 2. С. 38–49. doi: 10.30901/2227-8834-2024-2-38-49.
- Влияние сроков посева на урожайность различающихся по скороспелости образцов сои (*Glycine max* (L.) Merr.) в климатических условиях Иркутской области / Н. Б. Катышева, А. В. Поморцев, Н. В. Дорофеев и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2024. Т. 185. № 3. С. 38–49. doi: 10.30901/2227-8834-2024-3-38-49.

5. Перфильев Р. Н., Щербань А. Б., Салина Е. А. Разработка панели маркеров для генотипирования отечественных сортов сои по генам, контролирующим срок вегетации и реакцию на фотопериод // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021. Т. 25. № 7. С. 761–769. doi: 10.18699/VJ21.087.
6. Храмой В. К., Сихарулидзе Т. Д., Рахимова О. В. Обоснование оптимального срока посева сои в условиях центрального района Нечерноземной зоны // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. Т. 3. № 43. С. 98–102. doi: 10.18286/1816-4501-2018-3-98-102.
7. Цехмейструк Н. Г., Шелякин В. А., Магомедов Р. Д. Урожайность сортов сои в зависимости от климатических условий и зоны выращивания // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 3. С. 49–52.
8. Фадеева М. Ф., Воробьева Л. В., Матвеева О. Л. Влияние погодных условий на признаки технологичности и урожайности сои в северо-восточной части РФ // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018. Т. 66. №5. С. 59–63. doi: 10.30766/2072-9081.2018.66.5.59-63.
9. Синеговская В. Т., Очкурова В. В., Синеговский М. О. Содержание белка и жира в семенах сортов сои различного генетического происхождения // Российская сельскохозяйственная наука. 2020. № 5. С. 15–19. doi: 10.31857/S250026272005004X.
10. Хорняк М. П., Асеева Т. А. Влияние продолжительности вегетационного периода на урожайность и содержание белка в семенах коллекционных образцов сои в условиях Среднего Приамурья // Агронаука. 2024. Т. 2. № 2. С. 5–15. doi: 10.24412/2949-2211-2024-2-2-5-15.
11. Синеговский М. О. Перспективы производства сои в Дальневосточном Федеральном округе // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2020. № 1. С. 13–16. doi: 10.30850/vrsn/2020/1/13-16.
12. He J., Gai J. Genome-Wide Association Studies (GWAS) // Plant Genotyping. Methods in Molecular Biology / eds Y. Shavrukov. 2023. Vol 2638. Humana, New York. P. 123–146. URL: https://link.springer.com/protocol/10.1007/978-1-0716-3024-2_9 (дата обращения: 13.11.2025). doi: 10.1007/978-1-0716-3024-2_9.
13. Global status of genetic, genomic, and bioinformatics resources for pulse crop improvement // Breeding climate resilient and future ready pulse crops / eds D. S. R. Supriha, K. O. Swaroop, R. J. Shreeraksha, et al. 2025. P. 71–129. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-96-0483-8_4 (дата обращения: 13.11.2025). doi: 10.1007/978-981-96-0483-8_4.
14. Yield and yield component trait analysis with DArT genotyping for GWAS in soybean grown in drought conditions of Kazakhstan / A. Amangeldiyeva, R. Yezhebayeva, S. Mazkirat, et al. // Front. Plant Sci. 2025. No 16. Article 1674201. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2025.1674201/full> (дата обращения: 13.11.2025). doi: 10.3389/fpls.2025.1674201.

References.

1. Vasina EA, Butovets ES, Luk'ianchuk LM. [Results of studying soybean initial material in the Primorsky Krai for breeding purposes]. Tr Prikl Bot Genet Sel. 2022;183(4):19-29. doi: 10.30901/2227-8834-2022-4-19-29. Russian.
2. Butovets ES, Luk'ianchuk LM. [Adaptation indicators of promising soybean varieties in the south of the Far East]. Tr Prikl Bot Genet Sel. 2024;185(4):47-58. doi: 10.30901/2227-8834-2024-4-47-58. Russian.
3. Butovets ES, Luk'ianchuk LM, Kodirova GA, et al. [Study of regenerant soybean lines for economically valuable and biochemical characteristics]. Tr Prikl Bot Genet Sel. 2024;185(2):38-49. doi: 10.30901/2227-8834-2024-2-38-49. Russian.
4. Katysheva NB, Pomortsev AV, Dorofeev NV, et al. [Influence of sowing dates on the yield of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) accessions differing in early maturity under the climatic conditions of the Irkutsk region]. Tr Prikl Bot Genet Sel. 2024;185(3):38-49. doi: 10.30901/2227-8834-2024-3-38-49. Russian.
5. Perfil'ev RN, Shcherban' AB, Salina EA. [Development of a panel of markers for genotyping of domestic soybean varieties for genes controlling vegetation period and photoperiod response]. Vavilovskii Zhurn Genet Sel. 2021;25(7):761-9. doi: 10.18699/VJ21.087. Russian.
6. Khramoi VK, Sikharulidze TD, Rakhimova OV. [Justification of the optimal sowing date of soybean in the conditions of the central region of the Non-Chernozem zone]. Vestn Ul'ianovsk Gos S-kh Akad. 2018;3(43):98-102. doi: 10.18286/1816-4501-2018-3-98-102. Russian.
7. Tsekhmestruk NG, Sheliakin VA, Magomedov RD. [Yield of soybean varieties depending on climatic conditions and growing zone]. Vestn Belarus Gos S-kh Akad. 2016;(3):49-52. Russian.
8. Fadeeva MF, Vorob'eva LV, Matveeva OL. [Influence of weather conditions on technological traits and soybean yield in the northeastern part of the Russian Federation]. Agrar Nauka Evro-Severo-Vostoka. 2018;66(5):59-63. doi: 10.30766/2072-9081.2018.66.5.59-63. Russian.
9. Sinogovskaia VT, Ochukurova VV, Sinogovskii MO. [Protein and fat content in seeds of soybean varieties of different genetic origin]. Ross S-kh Nauka. 2020;(5):15-9. doi: 10.31857/S250026272005004X. Russian.
10. Khorniak MP, Aseeva TA. [Influence of growing season duration on yield and protein content in seeds of soybean collection samples in the conditions of the Middle Amur region]. Agronauka. 2024;2(2):5-15. doi: 10.24412/2949-2211-2024-2-2-5-15. Russian.
11. Sinogovskii MO. [Prospects for soybean production in the Far Eastern Federal District]. Vestn Ross S-kh Nauki. 2020;(1):13-6. doi: 10.30850/vrsn/2020/1/13-16. Russian.
12. He J, Gai J. Genome-Wide Association Studies (GWAS). In: Shavrukov Y, editor. Plant Genotyping [Internet]. Methods in Molecular Biology. Vol. 2638. New York: Humana; 2023[cited 2025 Nov 13]. p. 123-46. Available from: https://link.springer.com/protocol/10.1007/978-1-0716-3024-2_9. doi: 10.1007/978-1-0716-3024-2_9.
13. Supriha DSR, Swaroop KO, Shreeraksha RJ, et al. Global status of genetic, genomic, and bioinformatics resources for pulse crop improvement. In: Supriha DSR, Swaroop KO, Shreeraksha RJ, et al., editors. Breeding climate resilient and future ready pulse crops [Internet]. 2025 [cited 2025 Nov 13]. p. 71-129. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-96-0483-8_4. doi: 10.1007/978-981-96-0483-8_4.
14. Amangeldiyeva A, Yezhebayeva R, Mazkirat S, et al. Yield and yield component trait analysis with DArT genotyping for GWAS in soybean grown in drought conditions of Kazakhstan. Front Plant Sci [Internet]. 2025[cited 2025 Nov 13];(16):1674201. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2025.1674201/full>. doi: 10.3389/fpls.2025.1674201.

Поступила в редакцию 27.11.2025 После доработки 16.12.2025 Принята к публикации 20.01.2026

Сравнительный анализ антиоксидантной активности семян и надземных частей сортов сои хабаровской селекции

А. А. ХОЛОДКОВ¹, А. С. СТЕПАНОВ¹, М. П. РАЗГОНОВА^{2,3}

¹Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН, ул. Клубная, 13, с. Восточное, Хабаровский р-н, Хабаровский край, 680521, Российская Федерация

²Дальневосточная опытная станция – филиал Федерального исследовательского центра «Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова», ул. Вавилова, 9, Советский р-н, Владивосток, 690024, Российская Федерация

³Дальневосточный федеральный университет, о. Русский, Аякс, 10, Владивосток, 690922, Российская Федерация

Резюме. Исследования проводили с целью определения антиоксидантной активности (АА) семян и надземных вегетативных органов (НВО) сортов сои хабаровской селекции. Изучали сорта Хабаровский юбилей, Союзная 17, Марината, Тасия, Батя, Хехирская, Жемчужина востока, Кобра. Образцы отбирали в 2024–2025 гг. на опытном поле: семена – в фазе полной спелости, НВО – в фазе налива семян. АА определяли методом спектрофотометрии с 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом (DPPH), фенольные соединения – с реактивом Фолина-Чокальтеу, флавоноиды – с хлоридом алюминия. Оценка содержания окисляемых веществ проводили титриметрически. Антиоксидантная активность экстрактов семян составляла от 12,7 % (сорт Батя) до 47,5 % (Кобра) в 2024 г., от 10,2 % (Батя) до 57,5 % (Кобра) в 2025 г., экстрактов НВО – соответственно от 16,1 % (Марината) до 56,5 % (Хабаровский юбилей) и от 21,3 % (Тасия) до 58,5 % (Батя). Для анализа фенольных компонентов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с тандемной масс-спектрометрией строили хроматограммы полного ионного тока и рассчитывали площади основных пиков. АА сои и суммарная площадь пиков метаболитов характеризовались высокими положительными корреляционными связями: семян – для положительно заряженных ионов $r=0,87$ и $r=0,71$, для отрицательно заряженных ионов – соответственно $r=0,87$ и $r=0,71$. Высокая корреляция между АА и содержанием фенольных соединений в семенах была равна 0,90...0,94, в НВО – 0,71...0,75; флавоноидов – соответственно 0,83...0,92 и 0,71 (в 2024 г.); окисляемых веществ – 0,71...0,98 и 0,72...0,88.

Ключевые слова: соя (*Glycine max*), семена, надземные органы, антиоксидантная активность, фенольные соединения, масс-спектрометрия.

Сведения об авторах: А. А. Холодков, младший научный сотрудник; А. С. Степанов, доктор фармацевтических наук, ведущий научный сотрудник (e-mail: stepanfx@mail.ru); М. П. Разгонова, кандидат технических наук, директор, доцент.

Для цитирования: Холодков А. А., Степанов А. С., Разгонова М. П. Сравнительный анализ антиоксидантной активности семян и надземных частей сортов сои хабаровской селекции // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. № 4. С. 34–40. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_34.

Comparative analysis of antioxidant activity of seeds and aerial parts of soybean varieties bred in Khabarovsk

A. A. Kholodkov¹, A. S. Stepanov¹, M. P. Razgonova^{2,3}

¹Far Eastern Research Institute of Agriculture, Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern branch, Russian Academy of Sciences, ul. Klubnaya, 13, s. Vostochnoe, Khabarovskii r-n, Khabarovskii krai, 680521, Russian Federation

²Far Eastern Experimental Station – a branch of the Federal Research Center «Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources», ul. Vavilova., 9, Sovetsky District, Vladivostok, 690024, Russian Federation

³Far Eastern Federal University, o. Russkii, Ajax, 10, Vladivostok, 690922, Russian Federation

Abstract. The study was conducted to determine the antioxidant activity (AA) of seeds and aerial vegetative organs (AVO) of soybean varieties bred in Khabarovsk. The following varieties were studied: Khabarovsky Yubilyar, Soyuznaya 17, Marinata, Tasiya, Batya, Khechirskaia, Zhemchuzhina Vostoka, and Kobra. Samples were collected in 2024–2025 from the experimental field: seeds at the stage of full maturity, AVO at the seed filling stage. AA was determined spectrophotometrically with 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH), phenolic compounds with the Folin-Ciocalteu reagent, and flavonoids with aluminum chloride. The content of oxidizable substances was assessed titrimetrically. The antioxidant activity of seed extracts ranged from 12.7% (Batyа variety) to 47.5% (Kobra), from 10.2% (Batyа) to 57.5% (Kobra) in 2025, while that of AVO extracts ranged from 16.1% (Marinata) to 56.5% (Khabarovsky Yubilyar) and from 21.3% (Tasiya) to 58.5% (Batyа), respectively. To analyse phenolic components using high-performance liquid chromatography (HPLC) with tandem mass spectrometry, total ion current chromatograms were constructed and the areas of the main peaks were calculated. Soybean AA and the total metabolite peak area were characterised by high positive correlations: seeds – for positively charged ions $r=0.78$, AVO – $r=0.81$, for negatively charged ions – $r=0.87$ and $r=0.71$, respectively. A high correlation between AA and the content of phenolic compounds in seeds was equal to 0.90–0.94, in AVO – 0.71–0.75; flavonoids – 0.83–0.92 and 0.71, respectively (in 2024); oxidizable substances – 0.71–0.98 and 0.72–0.88.

Keywords: soybean (*Glycine max*); seeds; aboveground organs; antioxidant activity; phenolic compounds; mass spectrometry.

Author Details: A. A. Kholodkov, junior research fellow; A. S. Stepanov, D. Sc. (Pharm.), leading research fellow (e-mail: stepanfx@mail.ru); M. P. Razgonova, Cand. Sc. (Eng.), director, assoc. prof.

For citation: Kholodkov AA, Stepanov AS, Razgonova MP [Comparative analysis of antioxidant activity of seeds and aerial parts of soybean varieties bred in Khabarovsk]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(4):34–40. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_34.

Исследование антиоксидантной активности сельскохозяйственных культур имеет большое значение. Связано это, во-первых, с тем, что растительные биологически активные вещества (БАВ), способные тормозить перекисное окисление липидов, влияют на качество корма и, соответственно, мяс-

ной и молочной продукции [1, 2]. Во-вторых, БАВ, обладающие антиоксидантной активностью, в составе биологически активных добавок в пищу (БАД) и продуктов функционального питания на основе растительных компонентов повышают качество жизни человека [3, 4].

Исследования, посвященные анализу антиоксидантной активности культур, достаточно широко представлены в сельскохозяйственной науке. В спектр методов определения входят Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) – антиоксидантная способность снижать активность ионов трехвалентного железа в составе трипиридил-триазинового комплекса в комплекс двухвалентного железа при низких значениях pH; Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) – антиоксидантная способность, эквивалентная тролоксу, где анализируются изменения степени окраски долгоживущего катион-радикала ABTS^{•+} голубого цвета при воздействии антиоксиданта; Oxygen Radical Absorbance Capacity (ORAC) – способность поглощения радикалов кислорода – базирующийся на измерении зависимости интенсивности флуоресценции 2,2'-азо-бис-(2-амидинопропан) дигидрохлорида от времени протекания реакции; спектрофотометрия с DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом) и др. [5].

Изучение антиоксидантной активности сои очень важно ввиду широкого применения культуры в качестве пищевого продукта и кормовых смесей. Российские исследователи проводили анализ суммарной антиоксидантной активности семян и ростков (семядолей и гипокотыля) одного сорта кулонометрическим методом [6]. Антиоксидантную активность семян сои в фазе налива определяли спектрофотометрически с радикалами DPPH и 2,2-азино-бис-3-этилбензтиазолин-6-сульфокислоты (ABTS); установили высокую степень корреляции с общим содержанием фенолов [7]. Спектрофотометрию с DPPH и ABTS реактивами применяли и в ряде других работ: например, оценивали сравнительную активность экстрактов семян двух видов сои, культурной и дикой [8, 9]. При этом анализ антиоксидантной активности семян сои авторы сочетали с высокоэффективной жидкостной хроматографией (ВЭЖХ) с масс-спектрометрическим детектором для выявления и сравнительной оценки содержания метаболитов – фенольных соединений (ФС), флавоноидов, терпеноидов, аминокислот и других соединений [8]. Хроматографический анализ использовали для построения хроматограмм, характеризующих фенольный состав семян сои [10]. Изучали содержание фенолов, флавоноидов и изофлавонов в экстрактах сои восьми сортов. Качественную и относительную количественную оценку проводили путем сравнения наличия или отсутствия характерных пиков, а также их интенсивности при соответствующих значениях времени удерживания (R_t). Было показано, что построенные для семян каждого сорта сои метаболомные профили, включавшие разные группы БАВ, такие как простые фенолы, органические кислоты, флавоноиды, имели уникальный вид.

В последнее время проводили исследования антиоксидантной активности не только семян, но также листьев, и других частей сои, хотя эти исследования не носили системного характера. В проростках сои анализировали фенольный состав и антиоксидантную активность с использованием DPPH и ABTS реактивов [12]. Было установлено увеличение антиоксидантной активности проростков при обработке семян ультразвуком. Для оценки внутрисортовой вариативности 11 сортов сои северного экотипа в экстрактах листьев исследователи определяли антиоксидантную активность по ингибированию радикала DPPH [13]. Флавоноидный состав листьев сои и способность экстрактов подавлять панкреатическую липазу изучали с

использованием ВЭЖХ с масс-спектрометрией [11]. В листьях сои были идентифицированы активные компоненты, представлявшие собой флавоноиды, и на основе анализа ионных хроматограмм определено их относительное количественное содержание.

Ранее в работе [14], посвященной изучению БАВ сортов сои хабаровской селекции, авторами были предложены методики и проведена оценка содержания ФС, флавоноидов и окисляемых веществ (ОВ) в семенах и надземных вегетативных органах (НВО) сои. В продолжение исследований представляется целесообразным изучить антиоксидантную активность семян и НВО этих же сортов, построить метаболомный профиль, оценить интенсивность пиков и выявить взаимосвязь с содержанием БАВ.

Цель исследования – определить антиоксидантную активность и построить метаболомный профиль семян и надземных вегетативных органов сортов сои хабаровской селекции.

Для достижения этой цели решали следующие задачи:

- разработать методики определения антиоксидантной активности и оценить антиоксидантную активность семян и НВО сортов сои (2024–2025 гг.);
- получить методом ВЭЖХ с tandemной масс-спектрометрией (ВЭЖХ-МС/МС) и сравнить метаболомные профили семян и НВО сортов сои;
- установить корреляционные связи между антиоксидантной активностью, количественным содержанием БАВ и характеристиками полных ионных хроматограмм разных сортов.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в 2024–2025 гг. на растениях восьми сортов сои селекции Дальневосточного научно-исследовательского института сельского хозяйства (ДВ НИИСХ): Хабаровский юбилей, Союзная 17, Марината, Тасия, Батя, Хехирская, Жемчужина востока, кормовой сорт Кобра с черной окраской семени. НВО собирали в период налива семян (август 2024 и 2025 гг.), семена сои – в фазе полной спелости (октябрь 2024 и 2025 гг.), на опытном поле ДВ НИИСХ.

Почва участка – лугово-бурая оподзоленная, быстро переувлажняемая во время обильного выпадения атмосферных осадков из-за тяжелого гранулометрического состава и низкой водопроницаемости. Содержание гумуса в пахотном слое почвы составляло 1,23...2,59 % (по Тюрину в модификации ЦИНАО), pH солевой вытяжки – 3,9...4,0 ед.; гидролитическая кислотность – 2,99...5,95 мг-экв./100 г почвы, P_2O_5 – 6,1...6,4 мг/100 г; K_2O – 6,9...12,4 мг/100 г (по Кирсанову в модификации ЦИНАО). Предшественник в оба года – сидеральный пар. Посев осуществляли сеялкой ССФК-7 в 2 строки, расстояние между строк 70 см, норма высева – 36 всхожих семян на 1 м² (360 тыс. шт. на 1 га), площадь учетной делянки 15,4 м².

В период вегетации с апреля по сентябрь 2024 г. сумма активных температур составляла 2578,5 °С, осадков – 504,0 мм (табл. 1). Рассчитанное значение гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) – 2,0. 2025 г. характеризовался более высокой суммой температур воздуха за апрель–сентябрь (2875,8 °С), при этом выпало 474,2 мм осадков, ГТК составил 1,70. Май 2025 г. характеризовался теплой погодой, выпавшие осадки превысили норму на 32 % (ГТК – 2,3). В августе 2025 г. сумма осадков составила 72 мм, что на 50 % ниже среднего многолетнего значения (ГТК – 1,2).

Таблица 1. Гидротермические показатели в вегетационный период

Месяц	Средняя температура воздуха, °С			Сумма осадков, мм		
	2024 г.	2025 г.	средняя многолетняя	2024 г.	2025 г.	средняя многолетняя
Апрель	8,2	6,4	4,8	23,0	51,2	37,7
Май	11,3	13,1	12,9	46,0	91,0	69,2
Июнь	15,5	20,2	18,0	171,0	76,6	83,0
Июль	21,5	24,0	21,4	71,2	132,0	137,3
Август	20,5	19,9	19,9	125,4	72,0	144,0
Сентябрь	14,3	15,7	14,1	67,4	51,4	84,8

Подготовку проб для анализа проводили согласно ОФС.1.1.0005. На опытном участке для каждого сорта по трансектам на одной высоте срезали надземную часть, из собранных образцов формировали объединенную пробу каждого сорта. Аналогично заготавливали бобы с последующим извлечением семян. Образцы высушивали воздушно-теньевым способом, аналитические пробы каждого сорта измельчали до величины частиц, проходящих через сито с диаметром отверстий 2 мм. Определение влажности образцов (W, %) проводили по ОФС.1.5.3.0007.

Все анализы проводили в трех аналитических повторностях, рассчитывали средние значения. Значимость сортовых различий по антиоксидантной активности оценивали методами однофакторного дисперсионного анализа, апостериорное попарное сравнение проводили с использованием критерия Тьюки.

Для оценки взаимосвязей между АА, площадями пиков (Sp) хроматограммы полного ионного тока (total ion chromatogram – TIC) в режиме положительных и отрицательных ионов (Sp_{ТС+}, Sp_{ТС-}) в образцах семян и НВО сои, а также определенного ранее [14] содержания ФС, флавоноидов, ОВ, рассчитывали коэффициенты корреляции Пирсона.

Определение антиоксидантной активности. Точную навеску семян или НВО (2,0 г) помещали в коническую колбу на 250 мл, отмеряли 100 мл спирта этилового 70 % и экстрагировали на водяной бане с обратным холодильником при равномерном кипении 30 мин. Извлечение охлаждали до комнатной температуры и фильтровали через бумажный фильтр, промытый спиртом этиловым 70 %. Первые 10 мл отбрасывали, оставшееся извлечение собирали (раствор А).

Приготовление разведений. Готовили серию разведений раствора А по следующей схеме: 1:2, 1:5, 1:10, 1:20. Разводили спиртом этиловым 70 %.

Приготовление раствора DPPH (2 мг/100 мл). В мерной колбе на 100 мл растворяли 0,002 г реактива в спирте этиловом 96 % и доводили до метки, перемешивали, оставляли в темном месте при комнатной температуре. Для анализа использовали свежий раствор.

Приготовление анализируемого раствора. В пенициллиновый флакон объемом 10 мл отмеряли 3,9 мл свежеприготовленного раствора DPPH (2 мг/100 мл) и по 1 мл разведения раствора А (для экстрактов семян) или 0,6 мл разведения раствора А (для экстрактов НВО), перемешивали, инкубировали 30 мин в темном месте при комнатной температуре.

Приготовление контрольного раствора. В пенициллиновый флакон объемом 10 мл отмеряли 3,9 мл свежеприготовленного раствора DPPH (2 мг/100 мл) и по 1 мл спирта этилового 70 % (для экстрактов семян) или 0,6 мл спирта этилового 70 % (для экстрактов НВО).

Измерения проводили через 30 мин на спектрофотометре Shimadzu UV-2450 при длине волны 517 нм.

Раствор сравнения: спирт этиловый 96 %. Расчеты проводили по формуле:

$$AA, \% = \frac{D_{517}^0 - D_{517}^a}{D_{517}^0} \cdot 10, (1)$$

где D_{517}^0 – оптическая плотность контрольного раствора,

D_{517}^a – оптическая плотность анализируемого раствора через 30 мин инкубирования.

Проведение анализа методом ВЭЖХ в сочетании с tandemной масс-спектрометрией

Подготовку концентрированных экстрактов для хроматографирования осуществляли следующим образом. Точную навеску семян или НВО (2,0 г) помещали в коническую колбу на 250 мл, отмеряли 100 мл спирта этилового 70 % и экстрагировали БАВ на водяной бане с обратным холодильником 30 мин при равномерном кипении. Извлечение охлаждали до комнатной температуры и фильтровали через бумажный фильтр, промытый спиртом этиловым 70 %, в круглодонную колбу. Фильтр промывали 10 мл спирта этилового 70 %, фильтраты объединяли, выпаривали досуха, далее растворяли в 3 мл спирта этилового 70 %, растворы доводили до метки спиртом этиловым 70 % в мерной колбе на 5 мл. Раствор фильтровали через шприцевой фильтр Chromafil Xtra PA-45/25. Для анализа использовали жидкостный хроматограф Shimadzu LC-20 Prominence HPLC с UV-детектором (при длинах волн 230 нм и 330 нм) и обратноточной колонкой Shodex ODP-40 4E. Подвижная фаза вода-ацетонитрил, градиентное элюирование (0...4 мин, 100 % ацетонитрил; 4...60 мин, 100 % – 25 % ацетонитрил; 60...75 мин от 25 % до 0 % ацетонитрил). Объем пробы составлял 1 мкл. Масс-спектрометрические данные получены с использованием ионной ловушки amaZon SL (Bruker Daltonics), с источником ионизации электрораспылением ESI в режимах отрицательных и положительных ионов (температура источника ионизации – 70 °С, поток газа – 4 л/мин, газ-небилайзер (распылитель) – 7,3 psi, капиллярное напряжение – 4500 В, напряжение на изгибе торцевой пластины – 1500 В, фрагментатор – 280 В, энергия столкновения – 60 eV). Рассматривали метаболомные профили сортов на полных ионных хроматограммах (Total ion chromatograms, TIC) для положительно и отрицательно заряженных ионов в диапазоне масс (m/z) 100–1.700. В качестве основного показателя для сравнения относительного содержания метаболитов в разных сортах сои принимали суммарную площадь пиков значимых ионов для положительно (Sp_{ТС+}), и отрицательно заряженных ионов (Sp_{ТС-}).

Результаты и обсуждение. Величины оптической плотности экстрактов семян сои и их 50 %-ных разведений (1:2) меньше нижней границы (0,2) рекомендуемого диапазона устойчивых значений D в спектрофотометрии. Оптическая плотность разведений 1:20 значимо не отличалась от показателей контроля, значения АА были близки к нулю. Аналогично, оптическая плотность разведений экстрактов 1:10 для некоторых сортов также была достаточно близка к значениям контрольных растворов, что снижало сходимость результатов отдельного определения.

В соответствии с изложенными выше принципами попадания оптической плотности экстрактов семян, НВО и их разведений в допустимый диапазон,

Таблица 2. Оптическая плотность и антиоксидантная активность разведений экстрактов семян сои (2024 г.)

Сорт	Экстракт		Разведение 1:2		Разведение 1:5		Разведение 1:10		Разведение 1:20		Контроль
	D_{517}^a	AA, %	D_{517}^a	AA, %	D_{517}^a	AA, %	D_{517}^a	AA, %	D_{517}^a	AA, %	
Батя	0,205	62,7	0,364	33,7	0,396	12,7	0,450	6,2	0,525	-*	0,548
Марината	0,100	73,1	0,178	52,2	0,288	22,7	0,336	7,9	0,362	-	0,372
Союзная 17	0,143	61,4	0,222	40,0	0,333	14,7	0,365	1,4	0,368	-	0,370
Жемчужина востока	0,102	71,5	0,175	50,8	0,273	23,5	0,322	9,6	0,340	-	0,356
Кобра	0,055	85,8	0,111	74,9	0,232	47,5	0,327	26,0	0,346	-	0,358
Тасия	0,138	71,6	0,251	48,4	0,366	24,7	0,426	12,4	0,471	-	0,486
Хехцирская	0,136	73,1	0,278	46,6	0,396	21,3	0,450	10,6	0,492	-	0,503
Хабаровский юбиляр	0,205	62,7	0,225	54,8	0,316	36,9	0,411	17,8	0,453	-	0,497

*величина D_{517}^a для анализируемого раствора значимо не отличалась от D_{517}^a для контрольного раствора.

определение оптической плотности в экстракте без разведения, а также в разведениях 1:2 и 1:5 нецелесообразно, что также связано с низкой сходимостью результатов отдельного определения при малых значениях D (табл. 3). Значения D_{517}^a в разведении 1:20 для некоторых сортов также были близки к показателям контроля и в случае, например, предполагаемого снижения антиоксидантной активности при хранении высушенных НВО сои могут приводить к снижению

активность НВО в 2024 г. была характерна для сортов Кобра и Хабаровский юбиляр (54,3 % и 56,5 % соответственно), в 2025 г. – для сортов Кобра и Батя (58,1 % и 58,5 % соответственно).

Антиоксидантная активность семян разных сортов в 2024 г. и 2025 г. имела высокую положительную достоверную корреляцию ($r=0,88$, $p=0,004$). Аналогично, корреляция между значениями активности НВО сои также носила положительный характер ($r=0,83$,

Таблица 3. Оптическая плотность и антиоксидантная активность разведений экстрактов НВО сои (2024 г.)

Сорт	Экстракт		Разведение 1:2		Разведение 1:5		Разведение 1:10		Разведение 1:20		Контроль
	D_{517}^a	AA, %	D_{517}^a	AA, %	D_{517}^a	AA, %	D_{517}^a	AA, %	D_{517}^a	AA, %	
Батя	-	-*	0,127	73,8	0,147	73,0	0,268	44,9	0,359	23,4	0,485
Марината	-	-	0,143	72,6	0,346	33,8	0,438	16,1	0,488	7,5	0,522
Союзная 17	-	-	0,129	77,6	0,316	45,1	0,441	23,5	0,501	10,9	0,576
Жемчужина востока	-	-	0,130	78,6	0,248	59,3	0,418	31,3	0,517	17,6	0,608
Кобра	-	-	0,110	84,2	0,123	82,3	0,347	54,3	0,473	31,8	0,694
Тасия	-	-	0,128	82,2	0,364	49,2	0,493	31,3	0,552	23,0	0,717
Хехцирская	-	-	0,122	72,8	0,203	51,9	0,324	25,4	0,395	13,8	0,447
Хабаровский юбиляр	-	-	0,091	80,4	0,116	74,8	0,201	56,5	0,331	28,2	0,461

*значение D_{517}^a для анализируемого раствора меньше 0,050.

точности определения. То есть для сравнительной оценки антиоксидантной активности экстрактов восьми сортов семян и НВО по отработанной методике использовали разведения 1:5 и 1:10.

Методом дисперсионного анализа установлено, что сорта сои хабаровской селекции имели достоверные различия в антиоксидантной активности как семян, так и НВО ($p<0,05$) в 2024 и 2025 гг. (табл. 4). В среднем, AA семян составляла 25,5 % в 2024 г., 22,4 % в 2025 г., а НВО – 35,4 % в 2024 г. и 36,8 % в 2025 г. Достоверных изменений антиоксидантной активности между 2024 и 2025 гг. выявлено не было ($t_{2024-2025}>0,05$). Как в 2024 г., так и в 2025 г. наиболее высокие значения AA семян были характерны для сорта Кобра – 47,5 % в 2024 г. и 57,5 % в 2025 г. Самая низкая в эксперименте антиоксидантная активность отмечена для семян сорта Батя (12,7 % в 2024 г., 10,2 % – в 2025 г.). Максимальная антиоксидантная

$p=0,011$). Статистически значимой положительной корреляции между антиоксидантной активностью в семенах и НВО выявлено не было ($r=0,64$; $p=0,084$ в 2024 г. и $r=0,48$; $p=0,234$ в 2025 г.).

Для концентрированных экстрактов семян и НВО сои был проведен ВЭЖХ анализ с tandemной масс-спектрометрией и построены метаболомные профили

Таблица 4. Антиоксидантная активность экстрактов семян и НВО сортов сои (2024–2025 гг.), %

Сорт	Семена (разведение экстракта 1:5)		НВО (разведение экстракта 1:10)	
	2024	2025	2024	2025
Батя	12,7 ±1,2	10,2 ±0,7	44,9 ±1,8	58,5 ±8,5
Марината	22,7 ±0,3	17,6 ±2,9	16,1 ±1,9	27,4 ±4,5
Союзная 17	14,7 ±1,7	17,2 ±1,0	23,5 ±0,7	29,1 ±3,2
Жемчужина востока	23,5 ±2,5	16,2 ±2,2	31,3 ±7,2	26,5 ±2,2
Кобра	47,5 ±2,0	57,5 ±3,2	54,3 ±2,7	58,1 ±7,6
Тасия	24,7 ±1,0	17,4 ±0,2	31,3 ±3,3	21,3 ±0,8
Хехцирская	21,3 ±0,3	19,9 ±0,2	25,4 ±1,4	26,2 ±3,7
Хабаровский юбиляр	36,9 ±1,2	23,4 ±0,1	56,5 ±1,9	47,5 ±3,6
AA _{cp}	25,5	22,4	35,4	36,8
σ	11,5	14,6	14,8	15,4
ΔAA _{cp}	9,61	12,2	12,4	12,8
V, %	45,1	65,3	41,9	41,7
p _{anova}	p<0,05	p<0,05	p<0,05	p<0,05
t ₂₀₂₄₋₂₀₂₅	t>0,05		t>0,05	

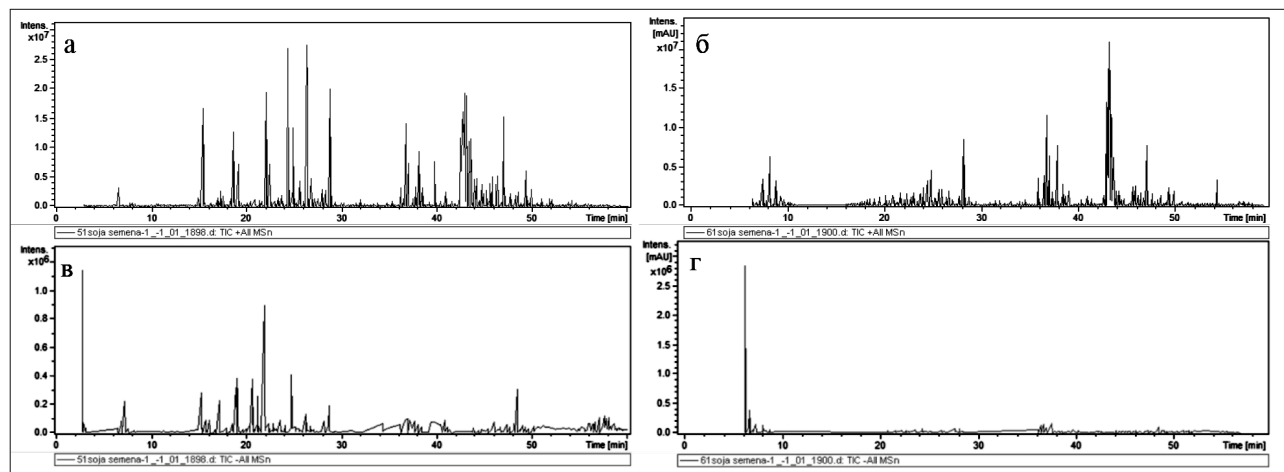


Рис. 1. TIC-хроматограммы экстрактов семян сои (2024 г.): а) Кобра, TIC+; б) Тасия, TIC+; в) Кобра, TIC-; г) Тасия, TIC-.

всех сортов (рис. 1). Относительное количественное содержание выделенных метаболитов (в том числе ФС и ОВ), которое может быть оценено по числу, высоте и площади пиков в семенах сорта Кобра выше, чем в Тасии. Всего было выделено 8 значимых положительных ионов ($\text{mAU} \cdot 10^7 > 0,5$) в сорте Тасия, 18 значимых положительных ионов в сорте Кобра, 2 значимых отрицательных иона ($\text{mAU} \cdot 10^6 > 0,2$) в сорте Тасия, 6 значимых отрицательных ионов в сорте Кобра.

Суммарная интенсивность пиков метаболомных профилей экстрактов НВО сои сопоставима с интенсивностью пиков TIC-хроматограмм экстрактов семян, при этом общее количество веществ на хроматограммах НВО сои было большим (рис. 2). Всего было выделено 22 значимых положительных иона ($\text{mAU} \cdot 10^7 > 0,2$) в сорте Кобра, 14 значимых положительных ионов в сорте Жемчужина востока, 27 значимых отрицательных ионов ($\text{mAU} \cdot 10^5 > 0,5$) в сорте Кобра, 16 значимых отрицательных ионов в сорте Жемчужина востока.

Как следует из тепловой карты (рис. 3), максимальная интенсивность положительно заряженных ионов в семенах сои отмечена на хроматограмме в диапазоне 22...27 мин. Сортовая вариабельность площадей пиков составляла от 50 % до 100 %. При этом для сорта Кобра были характерны пики с максимальной интенсивностью в интервалах 15...16 мин, 28...30 мин и 42...43 мин.

Область максимальной интенсивности отрицательно заряженных ионов на хроматограмме соответствовала времени удерживания в диапазоне 19...26 мин (рис. 4). Сортовая вариабельность в области максимальной интенсивности составила от 40 до 85 %. Достаточно высокой интенсивностью характеризовались временные интервалы от 33 до 38 мин, а также от 43 до 45 мин. Первый интервал был относительно стабильным по содержанию соответствующих метаболитов в разных сортах (коэффициент вариации не превышал 50 %), второй, напротив, менее стабильным – высокая интенсивность метаболитов в сортах Батя, Марината, Тасия, Хехцирская, и существенно более низкая – в других сортах.

Максимальная в эксперименте суммарная площадь пиков значимых ионов с положительным зарядом в семенах сои (табл. 5) была характерна для сорта Кобра ($148,3 \text{ mAU}^2 \cdot 10^7$), а в НВО – для сортов Кобра ($111,6 \text{ mAU}^2 \cdot 10^7$) и Батя ($117,2 \text{ mAU}^2 \cdot 10^7$), а максимальные значения $\text{Sn}_{\text{TIC-}}$ соответствовали семенам сорта Кобра ($55,8 \text{ mAU}^2 \cdot 10^7$) и НВО сортов Хабаровский юбилар ($70,5 \text{ mAU}^2 \cdot 10^6$) и Батя ($64,4 \text{ mAU}^2 \cdot 10^6$). При этом самые низкие значения суммарной площади пиков ионов как с положительным, так и отрицательным зарядом были отмечены для сорта Марината. Выявлены значимые корреляционные связи между суммарной площадью пиков позитивно и негативно заряженных ионов в семенах ($r=0,89$) и НВО ($r=0,79$).

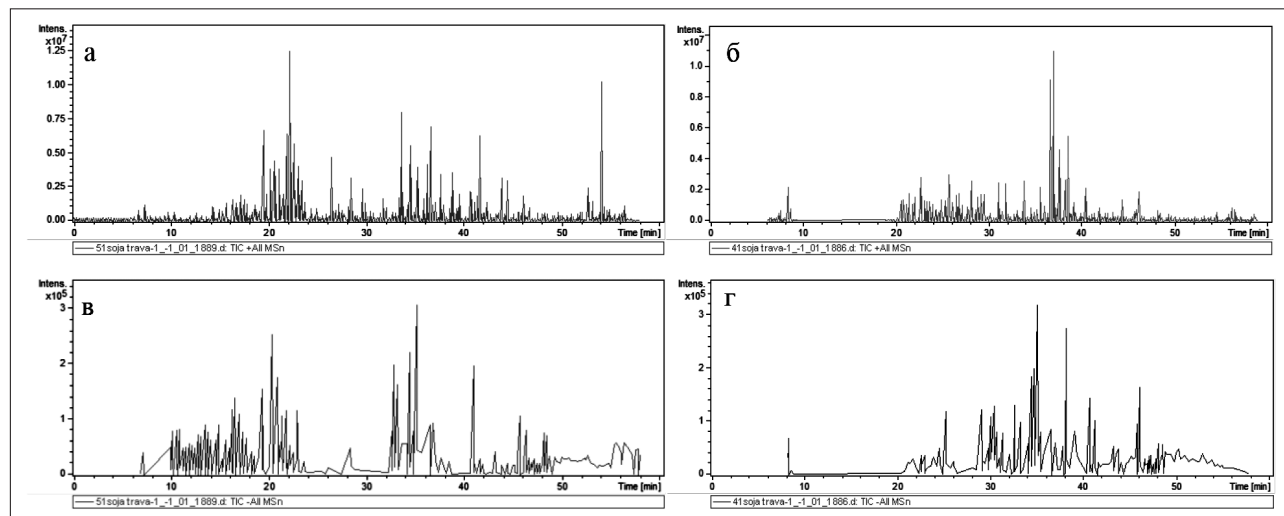


Рис. 2. TIC-хроматограммы экстрактов НВО сои (2024 г.): а) Кобра, TIC+; б) Жемчужина востока, TIC+; в) Кобра, TIC-; г) Жемчужина востока, TIC-.

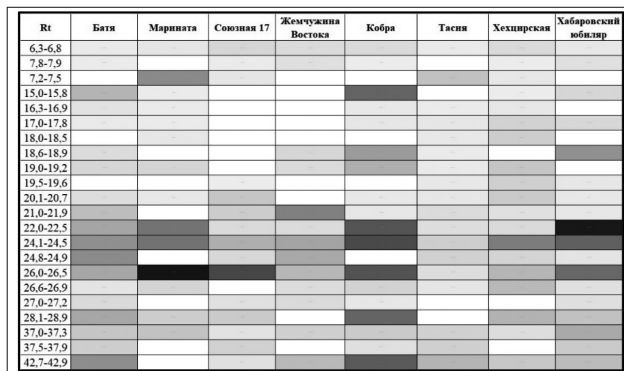


Рис. 3. Тепловая карта основных пиков TIC+ хроматограмм семян сои (2024 г.).

Корреляция между антиоксидантной активностью семян, содержанием ФС, флавоноидов и ОВ, а также суммарной площадью пиков соответствующих хроматограмм была достоверно высокой (табл. 6). Так, в 2024 г. значения коэффициента корреляции между антиоксидантной активностью и содержанием БАВ для ФС составляли 0,90, флавоноидов – 0,83, а для ОВ – 0,71. В 2025 г. значения показателя были еще более

Таблица 5. Суммарные площади пиков TIC+ и TIC- хроматограмм для семян и НВО сортов сои (2024 г.)

Сорт	Семена		НВО	
	Sp_{TIC+} $mAU^2 \cdot 10^7$	Sp_{TIC-} $mAU^2 \cdot 10^6$	Sp_{TIC+} $mAU^2 \cdot 10^7$	Sp_{TIC-} $mAU^2 \cdot 10^6$
Батя	64,7	33,3	117,2	64,4
Марината	97,8	32,7	46,1	29,6
Союзная 17	62,3	31,1	74,0	52,1
Жемчужина востока	37,9	32,3	59,2	36,4
Кобра	148,3	55,8	111,6	51,8
Тасия	38,5	27,5	88,2	49,3
Хехцирская	63,3	37,5	76,6	54,1
Хабаровский юбилей	117,5	51,7	94,3	70,5

высокими: для ФС – 0,94, флавоноидов – 0,92, а для ОВ – 0,98. По результатам исследования 2024 г. установлена высокая положительная корреляция антиоксидантной активности семян с суммарной площадью пиков положительно и отрицательно заряженных ионов – 0,78 и 0,87 соответственно для позитивной и негативной TIC-хроматограмм.

Таблица 6. Коэффициенты корреляции Пирсона антиоксидантной активности, содержания ФС, флавоноидов, ОВ и суммы площадей пиков TIC-хроматограмм сои (2024–2025 гг.)

Объект	ФС	Флавоноиды	ОВ	Sp_{TIC+}	Sp_{TIC-}
Семена	$r=0,90^*$ ($r=0,94$)** $p=0,003$ ($p=0,001$)	$r=0,83$ ($r=0,92$) $p=0,011$ ($p=0,001$)	$r=0,71$ ($r=0,98$) $p=0,047$ ($p=0,001$)	$r=0,78$ $p=0,022$	$r=0,87$ $p=0,005$
НВО	$r=0,75$ ($r=0,71$) $p=0,031$ ($p=0,048$)	$r=0,71$ ($r=0,70$) $p=0,046$ ($p=0,055$)	$r=0,72$ ($r=0,88$) $p=0,045$ ($p=0,004$)	$r=0,81$ $p=0,014$	$r=0,71$ $p=0,047$

*курсивом выделены достоверные корреляционные связи;

**по данным 2024 г. (в скобках – данные 2025 г.).

Литература.

1. Казачкова Н. М., Картекинов К. Ш., Дускаев Г. К. Использование биологически активных веществ в кормлении сельскохозяйственной птицы // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24. № 8. С. 1037–1044. doi: 10.32417/1997-4868-2024-24-08-1037-1044.

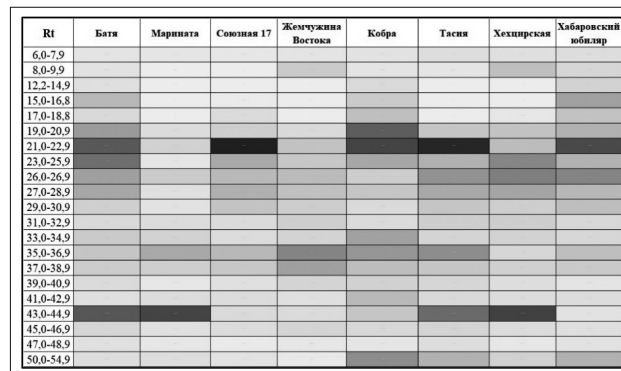


Рис. 4. Тепловая карта основных пиков TIC- хроматограмм НВО сои (2024 г.).

Для НВО сои также были выявлены значимые корреляционные связи между антиоксидантной активностью и другими показателями. Все коэффициенты корреляции в 2024 г. были значимыми – их численные значения для ФС составляли 0,75, для флавоноидов – 0,71, для ОВ – 0,72. Суммарная площадь пиков хроматограмм как для положительно, так и отрицательно заряженных ионов имела положительную корреляцию со значениями АА. В 2025 г. установлены достоверные корреляционные связи между значениями АА и содержанием ФС ($r=0,71$), а также между значениями АА и содержанием ОВ ($r=0,88$).

Выводы. Самая высокая антиоксидантная активность семян отмечена у сорта Кобра – 47,5 % в 2024 г. и 57,5 % в 2025 г., наименьшая – у сорта Батя (12,7 % в 2024 г., 10,2 % – в 2025 г.). Максимальной в опыте антиоксидантной активностью в 2024 г. характеризовались надземные вегетативные органы сорта Хабаровский юбилей (56,5 %), в 2025 г. – сорта Батя (58,5 %). По результатам ВЭЖХ-МС/МС анализа выявлено, что для основных хроматографических пиков характерна высокая сортовая вариабельность их площади (40... 100 %), которая свидетельствует о существенной сортовой изменчивости содержания метаболитов. Суммарная площадь пиков имела достоверную положительную корреляцию с антиоксидантной активностью: для семян – $r=0,78$ (TIC+) и $r=0,87$ (TIC-), для НВО – $r=0,81$ (TIC+) и $r=0,71$ (TIC-). Кроме того, для семян отмечена высокая корреляция между АА и содержанием ФС – 0,90 (2024 г.) и 0,94 (2025 г.), флавоноидов – 0,83 (2024 г.) и 0,92 (2025 г.), ОВ – 0,71 (2024 г.) и 0,98 (2025 г.), а для НВО достоверные корреляционные связи между АА и содержанием ФС – 0,75 (2024 г.) и 0,71 (2025 г.), флавоноидов – 0,71 (2024 г.) и 0,70 (2025 г.), ОВ – 0,72 (2024 г.) и 0,88 (2025 г.).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась Министерством образования и науки Российской Федерации по проекту в рамках соглашения от 17 апреля 2025 г. № 75-15-2025-188.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

2. Остапчук П. С., Зубоченко Д. В., Куведта Т. А. Роль антиоксидантов и использование их в животноводстве и птицеводстве (обзор) // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2019. Т. 20. № 2. С. 103–117. doi: 10.30766/2072-9081.2019.20.2.103-117.
3. Роль продуктов питания в повышении устойчивости организма к действию наночастиц (обзор литературы) / Ю. В. Рябова, Л. В. Шабардина, И. А. Минигалиева и др. // *Гигиена и санитария*. 2024. Т. 103. № 7. С. 724–736. doi: 10.47470/0016-9900-2024-103-7-724-736.
4. Биологически активный комплекс на основе ферментированной клетчатки для нормализации и обеспечения жизнедеятельности кишечной микрофлоры / М. А. Захаренко, А. А. Вековцев, Е. М. Серба и др. // *Индустрия питания*. 2023. Т. 8. № 4. С. 68–78. doi: 10.29141/2500-1922-2023-8-4-7.
5. Яшин А. Я. Методология определения антиоксидантной активности пищевых продуктов и биологических жидкостей // *Аналитика*. 2021. № 5. С. 370–385. doi: 10.22184/2227-572X.2021.11.5.370.384.
6. Зеленков В. Н., Латушкин В. В., Синеговская В. Т. Суммарная антиоксидантная активность сои при темновом проращивании семян // *Актуальная биотехнология*. 2023. № 4. С. 20. doi: 10.20914/2304-4691-2023-4-20.
7. Pabich M., Marciniak B., Kontek R. Phenolic Compound Composition and Biological Activities of Fractionated Soybean Pod Extract // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. No. 21. Article 10233. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/21/10233> (дата обращения: 05.11.2025). doi: 10.3390/app112110233.
8. Comparison of Phenolic and Flavonoid Compound Profiles and Antioxidant and α -Glucosidase Inhibition Properties of Cultivated Soybean (*Glycine max*) and Wild Soybean (*Glycine soja*) / Q. Chen, X. Wang, X. Yuan, et al. // *Plants*. 2021. Vol. 10. No. 4. Article 813. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/4/813> (дата обращения: 05.11.2025). doi: 10.3390/plants10040813.
9. Comparative analysis of antioxidant flavonoids in wild and cultivated soybean using integrated ion-filtering strategy-combined LC–HRMSn analysis / K. J. Kim, M. H. Cho, S. Lee, et al. // *Food Bioscience*. 2025. Vol. 65. Article 105817. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221242922402248X?via%3Dihub> (дата обращения: 05.11.2025). doi: 10.1016/j.fbio.2024.105817.
10. Powerful Antioxidants and Cytotoxic Activities of the Methanol Extracts from Eight Soybean Cultivars / M. A. Abd Elhamid, A. E. S. Mandour, T. A. Ismail // *Molecules*. 2022. Vol. 27. № 9. Article 2895. URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/9/2895> (дата обращения: 05.11.2025). doi: 10.3390/molecules27092895.
11. Low frequency ultrasound enhanced the antioxidant activity and isoflavones accumulation of soybean sprouts by inducing oxidant stress / Zh. Qiao, Ya. Shi, Ju. Yi, et al. // *Food Bioscience*. 2024. Vol. 60. Article 104360. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212429224007909?via%3Dihub> (дата обращения: 05.11.2025). doi: 10.1016/j.fbio.2024.104360.
12. Антиоксидантная активность экстрактов листьев *Lupinus angustifolius* L. и *Glycine max* (L.) Merr / Е. В. Власова, С. М. Мотылева, М. Е. Мертвищева и др. // *Плодоводство и ядоводство России*. 2016. Т. 47. С. 70–75.
13. Inhibitory characteristics of flavonoids from soybean (*Glycine max* L. Merr.) leaf against pancreatic lipase / J. Hong, Y. Choi, J. Lee, et al. // *Food Bioscience*. 2023. Vol. 56. Article 103311. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212429223009628?via%3Dihub> (дата обращения: 05.11.2025). doi: 10.1016/j.fbio.2023.103311.
14. Исследование содержания фенольных соединений в надземных вегетативных органах и семенах сортов сои хабаровской селекции / А. С. Степанов, А. А. Холодков, Н. А. Цимбалист и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2025. Т. 39. № 12. С. 5–10. doi: 10.53859/02352451_2025_39_12_5.

References.

1. Kazachkova NM, Kartekenov KSh, Duskaev GK. [Use of biologically active substances in feeding of agricultural poultry]. *Agrar Vestn Urala*. 2024;24(8):1037-44. doi: 10.32417/1997-4868-2024-24-08-1037-1044. Russian.
2. Ostapchuk PS, Zubochenko DV, Kuevda TA. [Role of antioxidants and their use in animal and poultry husbandry (review)]. *Agrar Nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2019;20(2):103-17. doi: 10.30766/2072-9081.2019.20.2.103-117. Russian.
3. Riabova YuV, Shabardina LV, Minigalieva IA, et al. [Role of foods in increasing the body's resistance to the effects of nanoparticles (literature review)]. *Gig Sanit*. 2024;103(7):724-36. doi: 10.47470/0016-9900-2024-103-7-724-736. Russian.
4. Zakharenko MA, Vekovtsev AA, Serba EM, et al. [Biologically active complex based on fermented fiber for normalization and maintenance of intestinal microflora vital activity]. *Ind Pitan*. 2023;8(4):68-78. doi: 10.29141/2500-1922-2023-8-4-7. Russian.
5. Iashin AY. [Methodology for determining antioxidant activity of food products and biological fluids]. *Analitika*. 2021;(5):370-85. doi: 10.22184/2227-572X.2021.11.5.370.384. Russian.
6. Zelenkov VN, Latushkin VV, Sinegovskaya VT. [Total antioxidant activity of soybeans during seed germination in darkness]. *Aktual Biotechnol*. 2023;(4):20. doi: 10.20914/2304-4691-2023-4-20. Russian.
7. Pabich M, Marciniak B, Kontek R. Phenolic Compound Composition and Biological Activities of Fractionated Soybean Pod Extract. *Appl Sci [Internet]*. 2021[cited 2025 Nov 5];11(21):10233. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/21/10233>. doi: 10.3390/app112110233.
8. Chen Q, Wang X, Yuan X, et al. Comparison of Phenolic and Flavonoid Compound Profiles and Antioxidant and α -Glucosidase Inhibition Properties of Cultivated Soybean (*Glycine max*) and Wild Soybean (*Glycine soja*). *Plants [Internet]*. 2021[cited 2025 Nov 5];10(4):813. Available from: <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/4/813>. doi: 10.3390/plants10040813.
9. Kim KJ, Cho MH, Lee S, et al. Comparative analysis of antioxidant flavonoids in wild and cultivated soybean using integrated ion-filtering strategy-combined LC–HRMSn analysis. *Food Biosci [Internet]*. 2025[cited 2025 Nov 5];65:105817. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221242922402248X?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.fbio.2024.105817.
10. Abd Elhamid MA, Mandour AES, Ismail TA. Powerful Antioxidants and Cytotoxic Activities of the Methanol Extracts from Eight Soybean Cultivars. *Molecules [Internet]*. 2022[cited 2025 Nov 5];27(9):2895. Available from: <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/9/2895>. doi: 10.3390/molecules27092895.
11. Qiao Z, Shi Y, Yi J, et al. Low frequency ultrasound enhanced the antioxidant activity and isoflavones accumulation of soybean sprouts by inducing oxidant stress. *Food Biosci [Internet]*. 2024[cited 2025 Nov 5];60:104360. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212429224007909?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.fbio.2024.104360.
12. Vlasova EV, Motyleva SM, Mertvishcheva ME, et al. [Antioxidant activity of leaf extracts of *Lupinus angustifolius* L. and *Glycine max* (L.) Merr]. *Plodovodstvo i yadovodstvo Ross*. 2016;47:70-5. Russian.
13. Hong J, Choi Y, Lee J, et al. Inhibitory characteristics of flavonoids from soybean (*Glycine max* L. Merr.) leaf against pancreatic lipase. *Food Biosci [Internet]*. 2023[cited 2025 Nov 5];56:103311. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212429223009628?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.fbio.2023.103311.
14. Stepanov AS, Kholodkov AA, Tsimbalist NA, et al. [Study of the content of phenolic compounds in aboveground vegetative organs and seeds of soybean varieties of Khabarovsk breeding]. *Dostizh Nauki Tekh APK*. 2025;39(12):5-10. doi: 10.53859/02352451_2025_39_12_5. Russian.

Поступила в редакцию 02.12.2025 После доработки 19.12.2025 Принята к публикации 28.01.2026

Селекция чечевицы в ФГБНУ «Омский аграрный научный центр»

Л. В. ОМЕЛЬЯНЮК, А. М. АСАНОВ, А. Ж. САУРБАЕВ

Омский аграрный научный центр, пр. Королева, 26, Омск, 644012, Российская Федерация

Резюме. Работу проводили в 2018–2025 гг. с целью создания высокоурожайных сортов чечевицы, адаптированных к резко континентальному климату южной лесостепи Западной Сибири и пригодных для механизированной уборки. Исследования включали полевую оценку коллекционных образцов (2018–2020 гг.), гибридизацию и индивидуальный отбор в гибридных популяциях F₂...F₃. Оценка 38 образцов в условиях контрастного гидротермического режима (ГТК 0,55...1,34) не выявила генотипов с достоверной прибавкой к стандарту Нива 95. Лучшими в 2019 г. были К 3061, К 3060 (Украина); К 3076 (Испания); К 2850 (Веховская 1), К 1806 (Петровская 4/105) с урожайностью 342,5...417,0 г/м² (стандарт 306,3 г/м²); в 2020 г. – К 3057 (Украина), К 3082 (Канада) – 318,0...320,2 г/м² (стандарт 289,6 г/м²). В селекционный процесс вовлечены 29 комбинаций скрещиваний, завязываемость гибридных бобов составила 10,2...30,7 %, всего получено 105 семян. Методом индивидуального отбора из гибридных популяций созданы сорта Сибирская (Инвизибл × Нива 95) – тарелочная зеленая и Гарнет (Дезил × Орловская краснотерная) – мелкосемянная красная, переданные соответственно в 2024 и 2025 гг. на Государственное сортоиспытание в 7-и регионах РФ. В конкурсном сортоиспытании (2021–2025 гг.) они достоверно превзошли стандарт Нива 95 по урожайности семян. Наибольшей у сорта Сибирская она была в 2022 г. (ГТК=1,12) – 4,34 т/га (прибавка 0,93 т/га), у сорта Гарнет в 2023 г. (ГТК=0,73) – 4,02 т/га (прибавка 1,00 т/га). Средняя урожайность за пятилетний период составила 3,16 т/га (Сибирская) и 3,14 т/га (Гарнет) против 2,54 т/га у стандарта. В условиях Алтайского края при контрастном гидротермическом режиме (2024 г., ГТК=0,36; 2025 г., ГТК=1,48) у сорта Сибирская в среднем за два года урожайность составила 2,73 т/га, у сорта Гарнет – 2,88 т/га, что превысило стандарт соответственно на 0,48 и 0,63 т/га.

Ключевые слова: чечевица (*Lens culinaris* Medik.), коллекция, источники, конкурсное и экологическое сортоиспытание, сорт, урожайность семян, гидротермический коэффициент (ГТК).

Сведения об авторах: Л. В. Омелянюк, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник (e-mail: omelyanyuk@anc55.ru); А. М. Асанов, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией (e-mail: asanov@anc55.ru); А. Ж. Саурбаев, научный сотрудник (e-mail: saurbaev@anc55.ru).

Для цитирования: Омелянюк Л. В., Асанов А. М., Саурбаев А. Ж. Селекция чечевицы в ФГБНУ «Омский аграрный научный центр» // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. № 4. С. 41–7. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_41.

Lentil breeding at the Omsk Agrarian Research Centre

L. V. Omel'yanuk, A. M. Asanov, A. Zh. Saurbaev

Omsk Agricultural Scientific Center, 26, Korolev Avenue, Omsk, 644012, Russian Federation

Abstract. The work was carried out in 2018–2025 with the aim of creating high-yielding lentil varieties adapted to the sharply continental climate of the southern forest-steppe of Western Siberia and suitable for mechanised harvesting. The research included field evaluation of collection accessions (2018–2020), hybridization and individual selection in hybrid populations F₂–F₃. Evaluation of 38 accessions under conditions of a contrasting hydrothermal regime (HTC 0.55–1.34) did not reveal any genotypes with a reliable increase to the Niva 95 standard. The best in 2019 were K 3061, K 3060 (Ukraine); K 3076 (Spain); K 2850 (Vekhovskaya 1), K 1806 (Petrovskaya 4/105) with a yield of 342.5–417.0 g/m² (standard 306.3 g/m²); in 2020 – K 3057 (Ukraine), K 3082 (Canada) – 318.0–320.2 g/m² (standard 289.6 g/m²). 29 crossbreeding combinations were involved in the selection process, the hybrid bean set rate was 10.2–30.7%, a total of 105 seeds were obtained. The Sibirskaya (Invisible × Niva 95) – plate lentils and Garnet (Dezil × Orlovskaya red-grained) – small-seeded red varieties were created using the method of individual selection from hybrid populations. They were submitted to the State Variety Testing in 2024 and 2025, respectively, in 7 regions of the Russian Federation. In competitive variety testing (2021–2025), they reliably exceeded the Niva 95 standard in seed yield. The Sibirskaya variety had the highest yield in 2022 (GTK = 1.12) – 4.34 t/ha (an increase of 0.93 t/ha), and the Garnet variety had the highest yield in 2023 (GTK = 0.73) – 4.02 t/ha (an increase of 1.00 t/ha). The average yield over a five-year period was 3.16 t/ha (Sibirskaya) and 3.14 t/ha (Garnet) versus 2.54 t/ha for the standard. Under the conditions of the Altai Krai with contrasting hydrothermal conditions (2024, HTC = 0.36; 2025, HTC = 1.48), the Sibirskaya variety averaged 2.73 t/ha over two years, while the Garnet variety averaged 2.88 t/ha, exceeding the standard by 0.48 and 0.63 t/ha, respectively.

Keywords: lentil (*Lens culinaris* Medik.); collection; sources; competitive and ecological variety testing; variety; seed yield; hydrothermal coefficient (HTC).

Author Details: L. V. Omel'yanuk, D. Sc. (Agr.), chief research fellow (e-mail: omelyanyuk@anc55.ru); A. M. Asanov, Cand. Sc. (Agr.), leading research fellow, head of laboratory (e-mail: asanov@anc55.ru); A. Zh. Saurbaev, research fellow (e-mail: saurbaev@anc55.ru).

For citation: Omel'yanuk LV, Asanov AM, Saurbaev AZh. [Lentil breeding at the Omsk Agrarian Research Centre]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(4):41–7. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_41.

Одной из самых ценных продовольственных зернобобовых культур в мире по праву считают чечевицу (*Lens culinaris* Medik.), так как ее зерно отличается высоким содержанием белка и быстрой развариваемостью [1, 2, 3], а также имеет широкий спектр использования, например, для производства крахмала для текстильной и полиграфической промышленности [2], мука из чечевицы служит эффективной растительной добавкой в пищевой промышленности [4, 5, 6] и др. Общеизвестна положительная роль чечевицы в улучшении экологической обстановки агроценозов, в том числе благодаря важнейшей

биологической особенности зернобобовой культуры в симбиозе с клубеньковыми бактериями удовлетворять свои потребности в азоте на 50...70 % благодаря его фиксации из воздуха [2, 7, 8].

В мире насчитывается относительно небольшое число стран, где выращивают чечевицу в крупных объемах. В 2022 г. ТОП-5 стран обеспечили 79,2 % мирового производства: Канада – 34,6 %, Индия – 19,1 %, Австралия – 15,0 %, Турция – 6,7 %, Россия – 3,9 %. По оценкам АБ-Центр, по итогам 2023 г., доля ТОП-5 стран может превышать 85 % (<https://ab-centre.ru/news/mirovoy-rynok-chechevicy---klyuchevye-tendencii>).

Посевные площади чечевицы в России в 2023 г. находились на отметках в 354,1 тыс. га, что на 62 % (на 135 тыс. га) больше, чем в 2022 г. (<https://ab-centre.ru/news/rossiyskiy-rynok-chechevicy---klyuchevye-tendencii>) [9]. За 5 лет площади выросли на 30,5 % (+83 тыс. га), за 10 лет – в 83 раза (+318 тыс. га). Больше всего чечевицы выращивают в Приволжском и Сибирском федеральных округах – 43 % и 38 % от валового сбора в стране соответственно. В 2023 г. чечевица в Омской области была посеяна на площади 10,86 тыс. га (в 5,5 раза больше, чем в 2020 г.). С 2024 г. эту культуру в статистике Министерства сельского хозяйства и продовольствия Омской области отдельно не выделяют.

Большинство стран, где выращивают чечевицу, сталкиваются с определённым набором абиотических и биотических стрессов, которые приводят к значительному снижению темпов роста, урожайности и объёмов производства этой ценной зернобобовой культуры [9]. Урожайность этой культуры значительно зависит как от почвенно-климатических условий, так и от погоды за вегетационный период [10], большое влияние оказывает технология возделывания и генетические особенности сорта [11, 12, 13].

Создание и быстрое внедрение в производство новых высокопродуктивных, технологичных и высококачественных сортов чечевицы – один из существенных резервов увеличения объёмов и вариантов ее использования. В 2024 г. в Государственном реестре селекционных достижений РФ находилось 34 сорта чечевицы. Наибольшее количество сортов зарегистрировано для Центрально-Чернозёмного (27 сортов), Средневолжского (26), Уральского (25) и Нижневолжского (24) регионов, что свидетельствует о высокой экологической пластичности культуры [13, 14].

Селекционная работа по тарелочной чечевице в России была сосредоточена в Пензенском научно-исследовательском институте сельского хозяйства на опорном пункте Петровской селекционно-опытной станции (СОС), где она начата в 1927 г. В столетней истории Петровской СОС достижения в создании новых сортов тарелочной чечевицы занимают достойное место – выведено и передано на Государственное испытание более 26 сортов. Широко известны сорта Петровская 4/105, Пензенская 14, Петровская зеленозёрная, Петровская юбилейная, Петровская 6, Веховская, Веховская 1. С 1993 г. в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт зернобобовых и крупяных культур» (ВНИИЗБК), восстановлена работа по сортоизучению, разработке технологии возделывания и селекции чечевицы [10, 15].

В Западной Сибири селекционные исследования по чечевице начаты в 30-х годах XX века Т. З. Чвашевым в Сибирском научно-исследовательском институте сельского хозяйства (СибНИИСХоз, Омск). Методом отбора из коллекционных образцов созданы сорта Тарелочная зеленая и Мелкосемянная 4. Но селекция этой зернобобовой культуры была остановлена более чем на 50 лет. Учитывая возросший спрос на ценное высокобелковое диетическое зерно чечевицы, для снижения рисков при ее возделывании в Западной Сибири, в Омском аграрном научном центре (ранее СибНИИСХоз) возобновлены исследования по селекции этой культуры.

Мировая коллекция чечевицы Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова, наряду с лучшими селекционными сортами, а

также местными формами, собранными в различных регионах мира, остается главным источником исходного материала для отечественной селекции чечевицы пищевой [16]. Много внимания уделяют селекции этой культуры и в других странах [17, 18, 19]. Сочетание в исходном материале засухоустойчивости и способности переносить переувлажнение – важная и реальная задача селекции чечевицы [14].

Цель исследования – создать высокоурожайные и пригодные для механизированной уборки сорта чечевицы, адаптированные к условиям резко-континентального климата южной лесостепи Западной Сибири.

Условия, материалы и методы. Исследования проведены в 2018–2025 гг. в зоне южной лесостепи Омской области в Омском аграрном центре. Почва – чернозем выщелоченный среднесуглинистый, содержание гумуса 6 % (по Тюрину), $pH_{\text{сол}}$ – 6,5...6,7 ед. Содержание в слое 0...40 см нитратного азота – среднее, подвижного фосфора – повышенное, калия (по Чирикову) – высокое.

Гибридизацию и размножение F_1 выполняли в естественных погодных условиях в «сетчатом дворике» (предшественник картофеля). Исходные родительские формы высевали вручную в два срока (в первой и второй декадах мая). По мере необходимости проводили рыхление междурядий и не менее одного полива.

Посев селекционных питомников осуществляли в конце второй декады мая, предшественник – мягкая яровая пшеница. Коллекционный материал (от 13 до 38 образцов) изучали в 2018–2020 гг. согласно методическим указаниям (*Методические указания. Коллекция мировых генетических ресурсов зерновых бобовых ВИР: пополнение, сохранение и изучение* (под ред. Вишняковой М.А.). СПб.: ООП «Копи-Р. Групп», 2010. 142 с.; *Коллекция мировых генетических ресурсов зерновых бобовых ВИР: пополнение, сохранение и изучение: методические указания* / М. А. Вишнякова, И. В. Сеферова, Т. В. Буравцева и др.; под науч. ред. М. А. Вишняковой. 2-е изд., перераб. и доп. Санкт-Петербург: ВИР, 2018. 143 с.). В 2018 г. из ВИР получено 13 сортообразцов чечевицы: 7 сортов селекции Петровской селекционно-опытной станции (СОС); 2 орловских сорта, 3 украинских и 1 из Алтайского края. В 2019 и 2020 гг. вместе с этими образцами в исследования включено еще 25 номеров мировой коллекции ВИР. В полную выборку вошло 38 шт.: 14 шт. из России, 10 шт. из Украины, 5 шт. из Чили; по 1 сорту из Канады, Молдавии, Сербии, Сирии, Македонии, Ливана, Ирана, Португалии, Испании. Стандарт – Нива 95, созданный в условиях 10-го Западно-Сибирского региона (оригинатор Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный алтайский научный центр агробиотехнологий»).

Гибридные популяции $F_2...F_3$ и элитные линии высевали на делянках 2×0,4 м. Фенологические наблюдения вели в режиме 2...3 раза в неделю. Уборку проводили выборочно при наступлении полной спелости с последующим анализом элементов структуры урожая.

Селекционный питомник первого года (СП-1) закладывали сеялкой СПР 2 широкоявно по 60 семян из каждой элиты, уборку лучших линий осуществляли вручную. Остальные селекционные питомники высевали рядовым способом с нормой высева 2,1 млн всхожих зерен на 1 га с использованием ССФК 7М. После посева – обязательное прикатывание. В кон-

курсом сортоиспытании (КСИ): площадь делянок 10 м²; повторность четырёхкратная. Уборка урожая – в фазе полной спелости напрямую малогабаритным комбайном Wintersteiger Classic.

Экологическое изучение новых сортов чечевицы Сибирская и Гарнет проведено в 2024 и 2025 гг. в ООО «Гей» (село Марушка, Целинный район, Бийско-Чумышская возвышенность, Юго-восток Алтайского края). Почва – выщелоченные чернозёмы. Реакция почвенного раствора слабокислая, близкая к нейтральной. Предшественник – мягкая яровая пшеница. Под предпосевную культивацию сеялкой ДМС 9000 вносили по 100 кг/га диаммофоски (NPK 10:26:26) и КАС32 (N:32). Посев проводили 10 мая сеялкой ССН-7 с нормой 1,6 млн шт./га. Длина делянки 10,4 м в двух повторностях (7 рядков через 0,15 м), дорожка между соседними делянками 0,5 м. Уборку – в конце 2-й декады августа. В 2024 г. сравнение вели только со стандартом Нива 95, в 2025 г. – дополнительно и с новыми сортами Фламенко и Восточная (оригинатор Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный алтайский научный центр зернобобовых и крупяных культур»).

В тексте тарелочная чечевица отмечена символом Т, мелкосемянная красная – МК. Во всех селекционных питомниках стандартом был сорт Нива 95 (оригинатор – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный алтайский научный центр агробиотехнологий»).

Математическую обработку полученных данных выполняли в Microsoft Office Excel, применяли дисперсионный и корреляционный анализы (Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. 5-е изд. М.: Колос, 1985. 351 с.). Оценку степени криволинейности корреляционной зависимости выполняли по Зайцеву Г. И. (Зайцев Г. И. Математика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1990. С. 159.).

Метеорологические условия вегетационных периодов 2018–2025 гг. характеризовались высокой вариабельностью гидротермического коэффициента (ГТК 0,51...1,66). Самыми засушливыми были условия в 2020 и 2021 гг. (ГТК 0,55 и 0,51 соответственно); избыточно влажными – 2018, 2024 и 2025 гг. (ГТК от 1,34 до 1,66). Сравнительно благоприятными для чечевицы оказались 2019, 2022 и 2023 гг. Рекордное количество осадков, выпавших в репродуктивную фазу чечевицы (июль–вторая декада августа) в 2024 и 2025 гг., – соответственно 190,3 мм (186,6 % от средней многолетней) и 202,1 мм (198,1 %), стало причиной недружного созревания бобов и полегания растений, что значительно усложнило уборку (рис. 1).

Погодные условия в Целинном районе Алтайского

края в годы проведения экологического испытания новых сортов чечевицы также были контрастными (https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Целинном_Алтайский_край?ysclid=mogpc4ujfb_592518591). В 2024 г. за вегетационный период (ГТК=0,37) выпало 106 мм осадков, но их максимум приходился на май (49 мм) при том, что запасы влаги с осени составляли более 200 мм в метровом слое. Май (ГТК=0,36) был прохладным, а с 27 по 31 мая среднесуточные температуры не превышали +8...+9 °С с понижением 30 мая до 4,9 °С; поэтому 24 мм осадков, выпавших за эти четыре холодных дня, не взяты в расчет ГТК за май и в целом за период май – вторая декада августа. Июль был очень засушливым (ГТК=0,10) – выпало лишь 5,6 мм осадков. В августе 21 мм осадков (ГТК=0,53) не оказали положительного влияния на развитие чечевицы и лишь затруднили ее уборку. В 2025 г. с начала мая по вторую декаду августа выпало 282 мм осадков (ГТК=1,48). Май в целом оказался теплее обычного (ГТК=0,81), но с 27 по 29 мая резко похолодало, дневная температура не превышала +7 °С, а в ночь с 29 на 30 был непродолжительный заморозок до минус 0,9 °С. Июнь (ГТК=1,43) и июль (ГТК=1,39) были очень влажными с суммой осадков 88 мм и 81 мм, соответственно. Чечевица убрана 20 августа, не смотря на интенсивное увлажнение – 80,9 мм за первые две декады этого месяца.

Результаты и обсуждение. В очень неблагоприятных погодных условиях 2018 г. не сформировали урожай кондиционных семян крупносемянные сорта К 2692 (Веховская), К 2850 (Веховская 1) и К 3083 (Любава, Украина). Остальные образцы убраны 4 августа, но ни один из них не показал результат лучше стандарта Нива 95. Сохранность растений варьировала от 17,5 % у К 1872 (Петровская зеленозёрная, Т) до 63,8 % у К 1806 (Петровская 4/105, Т) и стандарта. Наибольший сбор зерна обеспечили российские сорта К 1871

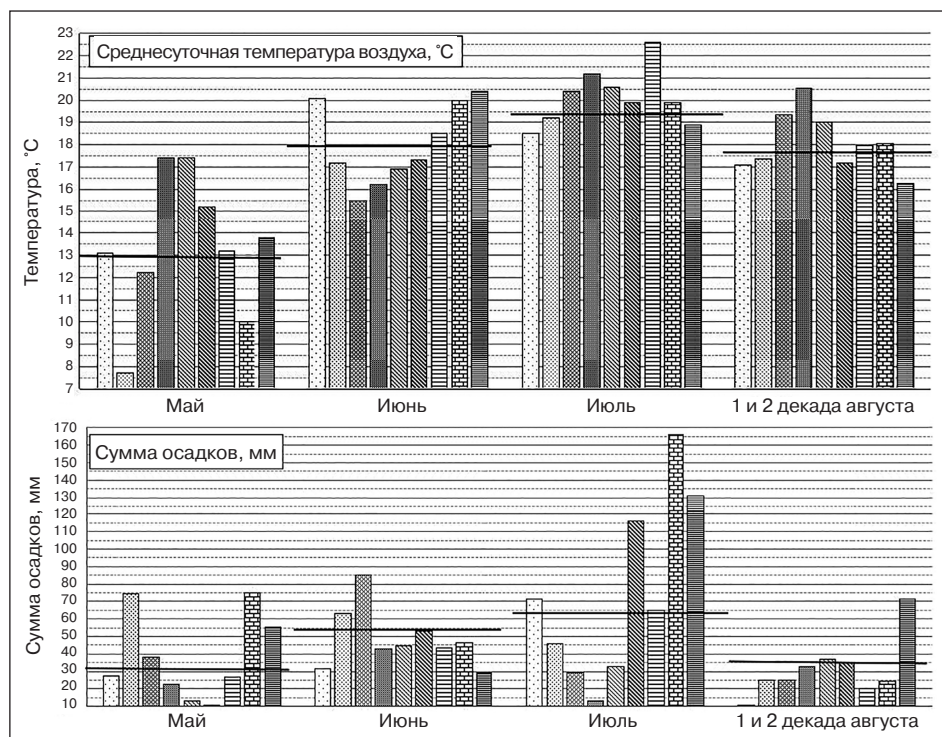


Рис. 1 Гидротермическое обеспечение периода вегетации чечевицы (2018–2025 гг.): ■ – 2017 г., ГТК = 0,80, ■ – 2018 г., ГТК = 1,34, ■ – 2019 г., ГТК = 1,00, ■ – 2020 г., ГТК = 0,55, ■ – 2021 г., ГТК = 0,51, ■ – 2022 г., ГТК = 1,12, ■ – 2023 г., ГТК = 0,73, ■ – 2024 г., ГТК = 1,66, ■ – 2025 г., ГТК = 1,49, — — среднее многолетнее значение (норма).

(Пензенская 14, Т) – 105,9 г/м² и К 2867 (Пауза, Т) – 116,6 г/м² (стандарт Нива 95, Т – 149,7 г/м²).

В 2019 г. полные всходы отмечены 28 мая, полевая всхожесть в основном была высокой. Наибольшее суточное количество атмосферной влаги (10 мм или 1/4 суммы за месяц) выпало 15 августа, когда 12 коллекционных образцов были уже убраны, а остальные еще не достигли фазы полного созревания, в том числе все образцы 2018 г. поступления. Они убраны 23 августа в фазе не полной спелости, наиболее позднеспелые из них: К 3068 (Чили), К 3069 (Сирия). Часть растений погибла из-за поражения ржавчиной и выпревания от переувлажнения почвы во время созревания. Меньше всего растений сохранилось к уборке у номера К 3089 (Любава, Украина, Т) – 43 % от взошедших (стандарт Нива 95 – 57 %).

Превысили стандарт по урожайности (рис. 2) украинские сорта К 3061 (Местная, Т) – 417,0 г/м², К 3060 (Местная, МК) – 342,5 г/м², испанский К 3076 (ILL 5029, Т) – 355,0 г/м², а также российские К 2850 (Веховская 1, Т) – 418,8 г/м² и К 1806 (Петровская 4/105, Т) – 365,0 г/м² (Нива 95 – 306,3 г/м²).

В 2020 г. все коллекционные образцы чечевицы убраны до 7 августа. Несмотря на пониженную полевую всхожесть – от 10,3 % у К 3064 (ILL 323, Сербия, Т) и К 3066 (ILL 413, Чили, Т), до 88,8 % у К 3063 (Донская краснотерная, РФ, МК) (стандарт Нива 95 – 82,5 %), сохранность растений была очень высокой – от 95 до 100 %. Наибольшую урожайность в изучаемой выборке показали К 3057 (Линза, Украина, Т) – 318,0 г/м² и К 3082 (Местная, Канада, МК) – 320,2 г/м² (стандарт Нива 95 – 289,6 г/м²).

Но ни один из самых продуктивных по результатам одного года сорт в среднем за 2019 и 2020 гг. достоверно не превысил стандарт по урожайности семян (см. рис. 2, табл. 1). Лучшими с прибавкой от 1,7 до 30,3 г/м² были российский сорт Веховская 1 и 4 иностранных номера (по два мелкозерной и тарелочной чечевицы) с менее продолжительным вегетационным периодом.

Коллекционные образцы чечевицы отличались небольшой длиной стебля (30...55 см), устойчивостью к полеганию выше среднего уровня (3,5...4,0 балла), недружным созреванием бобов на ярусах растений.

Средняя урожайность коллекционных образцов за 2019–2020 гг. в условиях южной лесостепи Омской области (298,0 г/м²) существенно превысила показатели, зафиксированные в аналогичных исследованиях в других регионах: в Акмолинской области (Республика Казахстан) максимальная урожайность сорта Красноградская 100 составила 162 г/м² при стандарте Шырайлы 107,95 г/м² [13]; в восточной зоне Краснодарского края лидер К 2924 (Болгария, МК) сформировал 135 г/м² против 38 г/м² у стандарта Веховская 1 [16]. Это свидетельствует о том, что сибирские условия для культуры сравнительно благоприятные.

Сорта тарелочной чечевицы Нива 95, Пауза, Пензенская 14, Веховская 1; мелкозерные Донская краснотерная, Орловская краснотерная и другие коллекционные образцы – ценные источники по отдельным признакам, включены в гибридизацию. За 2018–2020 гг. сделано 29 комбинаций скрещивания: опылено 316 бутонов, получено 105 семян из 77 гибридных бобов; завязываемость от 10,2 % (2020 г.) до 30,7 % (2019 г.).

Методом индивидуального отбора в 2016 и 2017 гг. из гибридных популяций созданы соответственно, новые омские сорта Сибирская (тарелочная, зеленая) – (Инвизибл × Нива 95) и Гарнет (мелкозерная, красная) – (Дезил × Орловская краснотерная), переданные в Государственное сортоиспытание в условиях 7 регионов РФ в 2024 и 2025 гг. На растениях этих сортов часто образуется по три бутона на цветоносе и трехсемянные бобы. Лучшая технологичность при их механизированной уборке обеспечена оптимальной высотой стебля (от 40 до 65 см), уровнем прикрепления нижних бобов выше 15 см, устойчивостью к полеганию не ниже 3,5 балла (табл. 2).

В конкурсном сортоиспытании (2021–2025 гг.) сорта Сибирская и Гарнет достоверно превысили стандарт Нива 95 по урожайности семян. Средняя продуктивность за пятилетний период составила 3,16 т/га (Сибирская) и 3,14 т/га (Гарнет) против 2,54 т/га у стандарта. Максимальные значения зафиксированы в благоприятные по гидротермическому режиму годы: у сорта Сибирская в 2022 г. – 4,34 т/га (прибавка к стандарту +0,93 т/га), у сорта Гарнет в 2023 г. – 4,02 т/га (прибавка +1,00 т/га). Даже в стрессовых условиях 2024 г. новые сорта сохранили преимущество: урожайность 2,42 и 2,52 т/га соответственно, что достоверно выше показателя стандарта (2,06 т/га) на 0,36 и 0,46 т/га.

В условиях Алтайского края, где производят более половины валового сбора зерна российской чечевицы, в 2024 и 2025 гг. урожайность этой зернобобовой культуры в экологическом испытании в ООО «Гей» была выше 2 т/га (рис. 3). Перспективные сорта показали существенную прибавку к стандарту Нива 95, соответственно: Сибирская – +0,37 и +0,55 т/га; Гарнет – +0,31

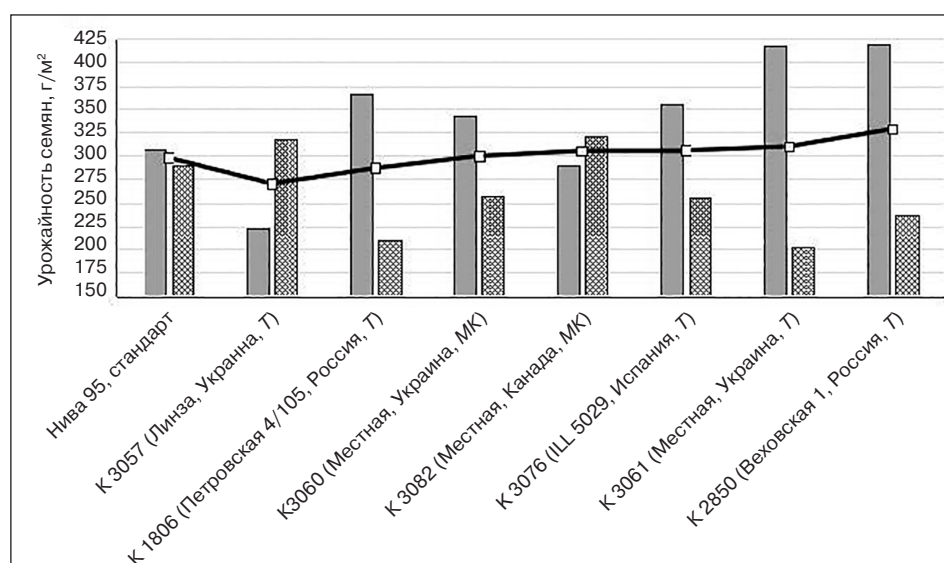


Рис. 2. Урожайность лучших образцов чечевицы, г/м² (НСР₀₅: 2019 г. – 39,0 г/м²; 2020 г. – 28,7 г/м²): ■ – 2019 г., ▨ – 2020 г., — — среднее.

Таблица 1. Характеристика наиболее урожайных (в среднем за 2019 и 2020 гг.) коллекционных образцов в сравнении со стандартом Нива 95

Показатель		Нива 95, стандарт	Номер каталога					НСР ₀₅	По всем образцам
			К 2850	К 3060	К 3061	К 3076	К 3082		
Полевая всхожесть, %	2019 г.	97	85*	84*	92	85	74*	9,5	48...100
	2020 г.	82	86	76	81	59	71*	8,3	10...89
	среднее	89,8	85,5	80,0	86,3	71,9	72,5*	10,5	10...100
Продолжительность вегетационного периода, сут.	2019 г.	88	88	89	84	84	85	9,5	78...91
	2020 г.	82	84	69*	74	78	73	8,4	65...85
	среднее	85	86	79	79	81	79	10,6	65...91
Длина стебля, см	2019 г.	55	55	53	50	48	42*	5,6	32...55
	2020 г.	45	50*	47	40*	42	38*	4,8	30...55
	среднее	50	52,5	50	45	45	40	6,1	30...55
Масса 1000 семян, г	2019 г.	66,5	60,5	47,7*	72,6	69,9	42,9*	6,6	29,5...78,3
	2020 г.	74,1	78,4	43,5*	69,8	61,1	32,5*	6,6	30,8...81,0
	среднее	70,3	69,4	45,6*	67,7	65,5	37,7*	7,7	29,5...81,0
Урожайность, г/м ²	2019 г.	306,3	418,8*	342,5	417,0*	355,0*	290,0	39,0	17,5...417,0
	2020 г.	289,6	237,8*	256,9*	202,4*	256,1*	320,2*	28,7	30,6...320,2
	среднее	298,0	328,3	299,7	309,7	305,6	305,1	40,0	17,5...320,2
Описание семян		крупные, светлые, Т			мелкие, Т		МК	Т	
					бурые, МК				

*различия со стандартом достоверны при $p \leq 0,05$.

и +0,92 т/га; в среднем за два года урожайность составила, соответственно – 2,73 и 2,88 т/га (Нива 95 – 2,25 т/га). В 2025 г. омские сорта были достоверно урожайнее орловских сортов Фламенко и Восточная. Масса 1000 семян, независимо от условий выращивания, была стабильной: у представителей крупноплодной тарелочной чечевицы Нива 95 и Сибирская – 67...69 г, у мелкосемянного сорта Гарнет – 35...38 г. Эти сорта достоверно отличались от Фламенко (красная) и Восточная (зеленая), которые сформировали массу 1000 семян, соответственно 45,9 и 43,5 г (НСР₀₅ = 4,2 г).

Таблица 2. Характеристика новых сортов чечевицы, КСИ (2021–2025 гг.)

Показатель	Нива 95, стандарт	Сибирская	Гарнет
Вегетационный период, сут.	74...78	72...75	72...76
Длина стебля, см	45...50	40...65	38...62
Высота прикрепления нижних бобов, см	7...15	15...20	15...25
Устойчивость к полеганию, балл	3,0...3,5	3,5...4,0	3,5...4,5
Пригодность к механизированной уборке, балл	3,5	4	4
Масса 1000 семян, г	61,8...75,9	67,2...78,0	34,0...38,8
Урожайность, т/га: от...до	2,06...3,41	2,42...4,34	2,52...4,02
средняя	2,54	3,16	3,14
коэффициент вариации, %	22,2	20,8	21,8
Содержание сырого протеина, %	25,6...26,9	24,6...27,8	24,9...27,8
Описание семян	крупные, светлые, Т		мелкие, бурые, МК

Анализ данных, полученных в питомнике конкурсного сортоиспытания образцов (2021–2025 гг.) в ФГБНУ «Омский АНЦ», показывает, что в условиях южной лесостепи Омской области на урожайность чечевицы очень сильное влияние оказывает режим гидротермического обеспечения (рис. 4). Связь урожайности только с ГТК в июне можно считать прямолинейной положительной: $r = 0,738$, $\eta = 0,825$ при $t=0,97$ (криволинейность не подтверждена). Влияние на анализируемый показатель ГТК за июль и за вегетационный период имеет хорошо выраженную криволинейную направленность и высокую η , поэтому коэффициенты корреляции низкие, соответственно: $r = -0,253$, $\eta = 0,804$ при $t=3,82$ и $r = -0,355$, $\eta = 0,871$ при

$t=4,30$. Наиболее высокий уровень анализируемого показателя (более 3,5 т/га) эта зернобобовая культура формирует при ГТК: за вегетационный период – от 0,8 до 1,3; в июне – около 1,0; в июле (в период формирования и начала созревания бобов) чечевица чувствительна к переувлажнению (ГТК от 1,2 до 1,8) – как недостаток, так и избыток осадков наносит большой урон урожаю.

Выводы. При изучении коллекции ВИР в экстремальных условиях 2018 г., а также в среднем за контрастные, но типичные для региона по гидротермическому режиму 2019–2020 гг., сортообразцов,

достоверно превысивших стандарт Нива 95 по урожайности семян, не выявлено. В сравнительно благоприятном 2019 г. (ГТК=1,0) лучшими были следующие образцы: украинские К 3061 (Местная, Т) – 417,0 г/м², К 3060 (Местная, МК) – 342,5 г/м²; испанский К 3076 (ILL 5029, МК) – 355,0 г/м²; российские К 2850 (Веховская 1, Т) – 418,8 г/м² и К 1806 (Петровская 4/105, Т) – 365,0 г/м² стандарт Нива 95 – 306,3 г/м²). В 2020 г.

(ГТК=0,55) превысили стандарт образцы К 3057 (Линза, Украина, Т) – 318,0 г/м² и К 3082 (Местная, Канада, МК) – 320,2 г/м² (стандарт Нива 95 – 289,6 г/м²).

Выявленные ценные источники по отдельным признакам включены в гибридизацию. За 2018–2020 гг. по 29 комбинациям скрещивания получено 105 семян из 77 гибридных бобов; завязываемость составляла от 10,2 % до 30,7 %.

В процессе исследований созданы высокоурожайные и пригодные для механизированной уборки сорта чечевицы, адаптированные к условиям резко-континентального климата южной лесостепи Западной Сибири: Сибирская (тарелочная, зеленая) и Гарнет (мелкосемянная, красная), переданные на Государствен-

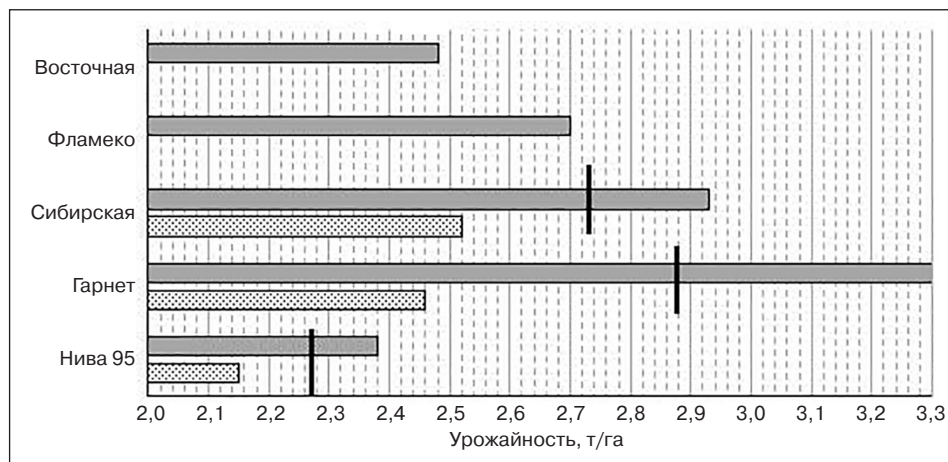


Рис. 3. Урожайность сортов чечевицы в условиях Алтайского края, т/га: ■ – 2025 г. ($HCP_{05}=0,28$), ■ – 2024 г. ($HCP_{05}=0,31$), | – среднее за 2 года.

ное сортоиспытание в 7-и регионах РФ соответственно в 2024 и 2025 гг. В контрастных погодных условиях они стабильно и достоверно превосходили стандарт, сформировав (в среднем за 2021–2025 гг.) урожайность в Омской области на уровне соответственно 3,16 и 3,14 т/га (Нива 95 – 2,54 т/га), в Алтайском крае в среднем за 2024 и 2025 гг. – 2,73 и 2,88 т/га (Нива 95

логий на основе собственных разработок научных и образовательных организаций», в целях достижения результата Федерального проекта «Реализация Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства и научное обеспечение развития отраслей агропромышленного комплекса» государственной программы Российской Федерации «Научно-

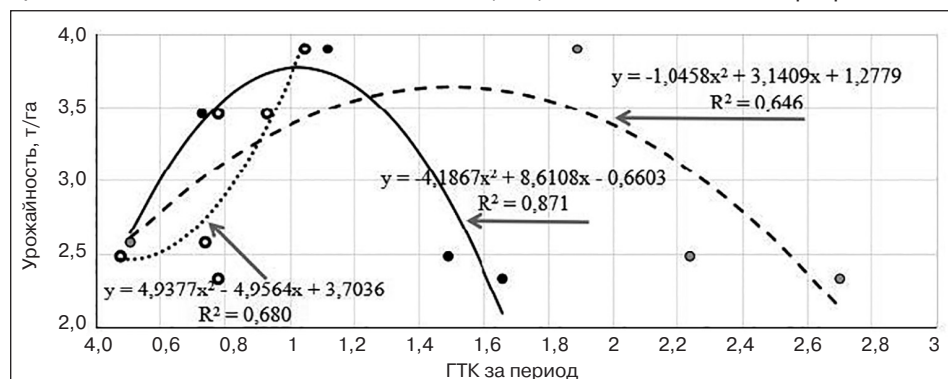


Рис. 4. Зависимость урожайности сортов чечевицы от ГТК в июне, июле и за вегетационный период (май–2 декада августа, 2021–2025 гг.): ● – урожайность × ГТК (вегетационного периода), ○ – урожайность × ГТК (июнь), ◐ – урожайность × ГТК (июль); полиномиальные — – урожайность × ГТК (вегетационного периода), – урожайность × ГТК (июня), - - - – урожайность × ГТК (июля).

– 2,27 т/га). Созданные сорта сочетают засухоустойчивость со способностью переносить переувлажнение во второй половине вегетации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках реализации мероприятий, соответствующих программе «Создание селекционно-семеноводческих центров в области сельского хозяйства для создания и внедрения в агропромышленный комплекс современных техно-

логического развитие Российской Федерации», в рамках исполнения соглашения о предоставлении из Федерального бюджета грантов в форме субсидий № 075-15-2025-192 от 17.04.2025 года.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Кондыков И. В. Культура чечевицы в мире и Российской Федерации (обзор) // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2012. № 2. С. 13–20.
2. Вошедский Н. Н., Кулыгин В. А. Влияние элементов технологии возделывания на урожайность чечевицы в богарных условиях Ростовской области // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 11. С. 43–47. doi: 10.24411/0235-2451-2020-11106.
3. Seed protein of lentils: current status, progress, and food applications / H. Khazaei, M. Subedi, et al. // *Foods*. 2019. No. 8. Article 391. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/8/9/391> (дата обращения: 02.03.2026). doi: 10.3390/foods8090391.
4. Bianchi F., Simonato B. Pulses Protein Concentrates and Isolates as stand-alone plant-based egg replacers: an explorative study of their functional properties and technological Effect in Pancakes // *Food and Bioprocess Technology*. 2025. Vol. 18. P. 6160–6175. doi: 10.1007/s11947-025-03810-z.
5. Effect of the Concentration, PH, and CA2+ Ions on the Rheological Properties of Concentrate Proteins from Quinoa, Lentil, and Black Bean / Ju. Quintero, Ju.D. Torres, et al. // *Foods*. 2022. Vol. 11. No. 19. Article 3116. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/19/3116> (дата обращения: 02.03.2026). doi: 10.3390/foods11193116.
6. Vegan Diet: a novel Trend in Healthy living / G. Kamei, P. Rasane, J. Singh, et al. // *Current Nutrition and Food Science*. 2023. Vol. 19. No. 8. P. 952–965. doi: 10.2174/0115734013258111230922051736.
7. Влияние микробиологических препаратов и предшественника на формирование симбиотического аппарата, урожайность и агрохимические показатели почвы при возделывании чечевицы, нута и чины / Г. П. Гурьев, М. В. Донская, М. М. Донской и др. // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2024. №1 (49). С. 10–18. doi: 10.24412/2309-348X-2024-1-10-18.
8. Nitrogen-fi xing soil bacteria plus mycorrhizal fungi improve seed yield and quality traits of lentil (*Lens culinaris* Medik.) / R. Amiria, M. Ghiyasi, S. Siavash Moghadda, et al. // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2019. Vol. 19. No. 3. P. 592–602.
9. Глазова З. И. Эффективность различных агрохимикатов и способов их применения при выращивании чечевицы // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2024. № 1 (49). С. 37–45. doi: 10.24412/2309-348X-2024-1-37-45.

10. Суворова Г. Н., Гурьев Г. П., Иконников А. В. Влияние метеоусловий года и инокуляции ризобиями на формирование урожайности чечевицы и показатели ее структуры // *Земледелие*. 2021. № 4. С. 3–6. doi: 10.24411/0044-3913-2021-10401.
11. Agronomic practices for red lentil in Alberta / R. Bowness, M. Olson, D. Pauly, et al. // *Canadian Journal of Plant Science*. 2019. Vol. 99. No. 6. P. 834–840. doi: 10.1139/CJPS-2018-0317.
12. Федюшкин А. В., Пасько С. В. Влияние удобрений и нормы высева на элементы продуктивности чечевицы, химический состав и вынос элементов питания с урожаем // *Земледелие*. 2023. № 5. С. 12–17. doi: 10.24412/0044-3913-2023-5-12-17.
13. Тен Е. А., Ошергина И. П. Результаты изучения коллекционных образцов чечевицы в засушливых условиях сухостепной зоны Акмолинской области // *Аграрный научный журнал*. 2025. № 2. С. 66–76. doi: 10.28983/asj.y2025i2pp66-76.
14. Старчак В. И., Деревнин А. А., Шкаберда М. А. Изучение коллекционного материала чечевицы в Нижневолжском регионе // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2025. №3 (55). С. 30–41. doi: 10.33861/zbk.2025.3.55.005.
15. Новый сорт чечевицы Фламенко / Г. Н. Суворова, А. В. Иконников, П. В. Ятчук и др. // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2020. № 4 (36). С. 42–46. doi: 10.24411/2309-348X-2020-11203.
16. Пимонов К. И., Деорянинов С. А., Коржов С. И. Продуктивность чечевицы культурной, возделываемой в условиях восточной зоны Краснодарского края // *Аграрный научный журнал*. 2020. № 9. С. 29–33. doi: 10.28983/asj.y2020i9pp29-33.
17. Optimizing Lentil Breeding Models for South-East Kazakhstan: Yield, Adaptability, and Protein enhancement / S. A. Zhumabaevna, K. M. Sarsenbekovich, K. Makpal, et al. // *OnLine Journal of Biological Sciences*. 2025. T. 25. № 3. С. 674–683. doi: 10.3844/ojbsci.2025.674.683.
18. Metabolic Mechanisms underlying heat and Drought Tolerance in lentil Accessions: Implications for Stress Tolerance Breeding / N. El Haddad, Y. En-nahli, H. Choukri, et al. // *Plants*. 2023. Vol. 12. No. 23. Article 3962. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/23/3962> (дата обращения: 02.03.2026). doi: 10.3390/plants12233962.
19. Genomic Selection for Target Traits in the Australian lentil Breeding Program / A. Gebremedhin, Y. Li, A.S.K. Shunmugam, et al. // *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 14. Article 1284781. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1284781/full> (дата обращения: 02.03.2026). doi: 10.3389/fpls.2023.1284781.

References.

1. Kondykov IV. [Culture of lentils in the world and the Russian Federation (review)]. *Zernobobovye Krupianye Kul'tury*. 2012;(2):13-20. Russian.
2. Voshedskii NN, Kulygin VA. [Influence of elements of cultivation technology on lentil yield in rainfed conditions of the Rostov region]. *Dostizh Nauki Tekh APK*. 2020;34(11):43-7. doi: 10.24411/0235-2451-2020-11106. Russian.
3. Khazaei H, Subedi M, et al. Seed protein of lentils: current status, progress, and food applications. *Foods* [Internet]. 2019 [cited 2026 Mar 2];(8):391. Available from: <https://www.mdpi.com/2304-8158/8/9/391>. doi: 10.3390/foods8090391.
4. Bianchi F, Simonato B. Pulses Protein Concentrates and Isolates as stand-alone plant-based egg replacers: an explorative study of their functional properties and technological Effect in Pancakes. *Food Bioprocess Technol*. 2025;18:6160-75. doi: 10.1007/s11947-025-03810-z.
5. Quintero Ju, Torres JuD, et al. Effect of the Concentration, pH, and Ca²⁺ Ions on the Rheological Properties of Concentrate Proteins from Quinoa, Lentil, and Black Bean. *Foods* [Internet]. 2022 [cited 2026 Mar 2];11(19):3116. Available from: <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/19/3116>. doi: 10.3390/foods11193116.
6. Kamei G, Rasane P, Singh J, et al. Vegan Diet: a novel Trend in Healthy living. *Curr Nutr Food Sci*. 2023;19(8):952-65. doi: 10.2174/0115734013258111230922051736.
7. Gur'ev GP, Donskaia MV, Donskoi MM, et al. [Influence of microbiological preparations and predecessor on the formation of the symbiotic apparatus, yield and agrochemical parameters of soil when cultivating lentils, chickpeas and grass pea]. *Zernobobovye Krupianye Kul'tury*. 2024;(1(49)):10-8. doi: 10.24412/2309-348X-2024-1-10-18. Russian.
8. Amirnia R, Ghiyasi M, Siavash Moghadda S, et al. Nitrogen-fixing soil bacteria plus mycorrhizal fungi improve seed yield and quality traits of lentil (*Lens culinaris* Medik.). *J Soil Sci Plant Nutr*. 2019;19(3):592-602.
9. Glazova ZI. [Effectiveness of various agrochemicals and methods of their application when growing lentils]. *Zernobobovye Krupianye Kul'tury*. 2024;(1(49)):37-45. doi: 10.24412/2309-348X-2024-1-37-45. Russian.
10. Suvorova GN, Gur'ev GP, Ikonnikov AV. [Influence of weather conditions of the year and inoculation with rhizobia on the formation of lentil yield and its structure indicators]. *Zemledelie*. 2021;(4):3-6. doi: 10.24411/0044-3913-2021-10401. Russian.
11. Bowness R, Olson M, Pauly D, et al. Agronomic practices for red lentil in Alberta. *Can J Plant Sci*. 2019;99(6):834-40. doi: 10.1139/CJPS-2018-0317.
12. Fedyushkin AV, Pas'ko SV. [Influence of fertilizers and seeding rate on lentil productivity elements, chemical composition and nutrient removal with harvest]. *Zemledelie*. 2023;(5):12-7. doi: 10.24412/0044-3913-2023-5-12-17. Russian.
13. Ten EA, Oshergina IP. [Results of studying collection samples of lentils in arid conditions of the dry-steppe zone of the Akmola region]. *Agrar Nauch Zhurn*. 2025;(2):66-76. doi: 10.28983/asj.y2025i2pp66-76. Russian.
14. Starchak VI, Derevnin AA, ShkabERDa MA. [Study of lentil collection material in the Lower Volga region]. *Zernobobovye Krupianye Kul'tury*. 2025;(3(55)):30-41. doi: 10.33861/zbk.2025.3.55.005. Russian.
15. Suvorova GN, Ikonnikov AV, Iatchuk PV, et al. [New lentil variety Flamenko]. *Zernobobovye Krupianye Kul'tury*. 2020;(4(36)):42-6. doi: 10.24411/2309-348X-2020-11203. Russian.
16. Pimonov KI, Dvorianinov SA, Korzhov SI. [Productivity of cultivated lentils grown in the conditions of the eastern zone of the Krasnodar Krai]. *Agrar Nauch Zhurn*. 2020;(9):29-33. doi: 10.28983/asj.y2020i9pp29-33. Russian.
17. Zhumabaevna SA, Sarsenbekovich KM, Makpal K, et al. Optimizing Lentil Breeding Models for South-East Kazakhstan: Yield, Adaptability, and Protein enhancement. *OnLine J Biol Sci*. 2025;25(3):674-83. doi: 10.3844/ojbsci.2025.674.683.
18. El Haddad N, En-nahli Y, Choukri H, et al. Metabolic Mechanisms underlying heat and Drought Tolerance in lentil Accessions: Implications for Stress Tolerance Breeding. *Plants* [Internet]. 2023 [cited 2026 Mar 2];12(23):3962. Available from: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/23/3962>. doi: 10.3390/plants12233962.
19. Gebremedhin A, Li Y, Shunmugam ASK, et al. Genomic Selection for Target Traits in the Australian lentil Breeding Program. *Front Plant Sci* [Internet]. 2024 [cited 2026 Mar 2];14:1284781. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1284781/full>. doi: 10.3389/fpls.2023.1284781.

Поступила в редакцию 22.03.2026 После доработки 13.04.2026 Принята к публикации 29.04.2026

Комплексная оценка сортов озимой мягкой пшеницы на основе параметров адаптивности и селекционных индексов

М. А. ФОМЕНКО, Т. А. ОЛЕЙНИКОВА, Е. А. БАБРОВСКАЯ

Федеральный Ростовский аграрный научный центр, ул. Институтская, 1, пос. Рассвет, Аксайский р-н, Ростовская обл., 346735, Российская Федерация

Резюме. Исследование проводили с целью выявления генотипов озимой мягкой пшеницы с высокой адаптивной способностью в степной зоне Ростовской области на основе комплексной оценки параметров пластичности и селекционных индексов. Работу выполняли в 2021–2024 гг. в северо-западной степной подзоне на черноземе южном карбонатном. Изучали 17 сортов и перспективных линий, стандарт – Дон 107. Адаптивность оценивали методами регрессионного анализа (Эберхарта и Рассела), расчёта общей адаптивной способности (Кильчевский) и гомеостатичности (Хангильдин). Прогностическую ценность системы селекционных индексов проверяли методом корреляционного анализа и путем ранжирования генотипов. Самыми благоприятными за период исследований были 2022 и 2023 гг. ($I_j = +1,70; +1,28$), неблагоприятными – 2021 ($I_j = -0,50$) и 2024 гг. ($I_j = -2,44$). Наибольшую урожайность сформировали линии 1020/21 (9,60 т/га, 2022 г.) и сорт Донья (9,69 т/га, 2023 г.). Интенсивные генотипы Донья, 1020/21 и 1063/21 ($b_i = 1,17...1,28$; $S_i^2 = 0,22...0,26$; ОАС = 0,29...0,36 т/га) проявили высокую пластичность. Экстенсивные формы ($b_i = 0,81...1,00$; $S_i^2 = 0,10...0,16$) – Вольная заря, Донская Т 20, Константа 22, Калитва, Легенда Дона, Донской рассвет, линия 930/20 и Тарасовская, а также стандарт Дон 107 – обеспечили стабильность в лимитированных условиях. По результатам интегральной оценки для ускоренного отбора пластичных генотипов целесообразно использование канадского (Ki) и финско-скандинавского индексов (FSj), индекса перспективности (J.P.), индекса отношения массы 1000 зерен к числу зерен в колосе. Сорта Донья, Донская Т 20, Константа 22 и линии 1020/21, 1063/21 рекомендованы как источники адаптивности для селекционных программ степной зоны.

Ключевые слова: пшеница мягкая озимая (*Triticum aestivum* L.), селекция, сорт, урожайность, адаптивность, селекционный индекс.

Сведения об авторах: М. А. Фоменко, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, зав. отделом (e-mail: fomenko.marina1602@mail.ru); Т. А. Олейникова, старший научный сотрудник (e-mail: ytantyana80@gmail.com); Е. А. Бабровская, научный сотрудник (e-mail: zheleznyak.elena87@mail.ru).

Для цитирования: Фоменко М. А., Олейникова Т. А., Бабровская Е. А. Комплексная оценка сортов озимой мягкой пшеницы на основе параметров адаптивности и селекционных индексов // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. № 4. С. 48–54. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_48.

Comprehensive evaluation of winter soft wheat varieties based on adaptability parameters and selection indices

М. А. Fomenko, Т. А. Oleinikova, Е. А. Babrovskaya

Federal Rostov Agrarian Scientific Center, ul. Institutskaya, 1, pos. Rassvet, Aksaiskii r-n, Rostovskaya obl., 346735, Russian Federation

Abstract. The study was conducted to identify winter soft wheat genotypes with high adaptive capacity in the steppe zone of the Rostov Region based on a comprehensive assessment of plasticity parameters and selection indices. The work was carried out from 2021 to 2024 in the north-western steppe subzone on southern carbonate chernozem. Seventeen varieties and promising lines were studied, with Don 107 as the standard. Adaptability was assessed using regression analysis (Eberhart and Russell), calculation of general adaptive capacity (Kilchevsky), and homeostasis (Khangildin). The predictive value of the selection index system was tested using correlation analysis and genotype ranking. The most favourable years during the study period were 2022 and 2023. ($I_j = +1,70; +1,28$), unfavourable – 2021 ($I_j = -0,50$) and 2024 ($I_j = -2,44$). The highest yield was achieved by the 1020/21 line (9.60 t/ha, 2022) and the Donya variety (9.69 t/ha, 2023). The intensive genotypes Donya, 1020/21 and 1063/21 ($b_i = 1.17-1.28$; $S_i^2 = 0.22-0.26$; OAC = 0.29-0.36 t/ha) showed high plasticity. Extensive varieties ($b_i = 0.81-1.00$; $S_i^2 = 0.10-0.16$) – Volnaya Zarya, Donskaya T 20, Konstanta 22, Kalitva, Legenda Dona, Donskoy Rassvet, line 930/20, and Tarasovskaya, as well as the Don 107 standard – ensured stability under limited conditions. Based on the results of the integrated assessment, the Canadian (Ki) and Finnish-Scandinavian indices (FSj), the prospects index (J.P.), and the ratio of 1000 grain weight to the number of grains per ear are advisable for the accelerated selection of flexible genotypes. The Donya, Donskaya T 20, Konstanta 22 varieties, and lines 1020/21 and 1063/21 are recommended as sources of adaptability for breeding programmes in the steppe zone.

Keywords: soft winter wheat (*Triticum aestivum* L.); selection; variety; yield; adaptability; selection index.

Author Details: M. A. Fomenko, D. Sc. (Agr.), chief research fellow, head of division (e-mail: fomenko.marina1602@mail.ru); T. A. Oleinikova, senior research fellow (e-mail: ytantyana80@gmail.com); E. A. Babrovskaya, research fellow (e-mail: zheleznyak.elena87@mail.ru).

For citation: Fomenko MA, Oleinikova TA, Babrovskaya EA. [Comprehensive evaluation of winter soft wheat varieties based on adaptability parameters and selection indices]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(4):48–54. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_48.

Пшеница мягкая озимая – стратегически значимая сельскохозяйственная культура для экономики Российской Федерации. К главным регионам по возделыванию озимой мягкой пшеницы относят Южный федеральный округ, Центральное Черноземье и Поволжье, которые характеризуются контрастностью погодно-климатических условий с возрастающей повторяемостью лет с резким дефицитом влаги [1]. В основных регионах возделывания озимой пшеницы не-

обходимы сорта, способные реализовать стабильную урожайность в различных почвенно-климатических условиях под давлением стресс-факторов среды [2, 3]. Методологию создания нового селекционного материала на продуктивность, адаптивность и качество продукции определяют в соответствии с доминирующими лимитирующими факторами экологической ниши, воздействующими на физиолого-генетический контроль хозяйственно ценных признаков и свойств сорта [4, 5].

На современном этапе развития селекции сорта с рекордно высоким потенциалом продуктивности становятся все более зависимыми от окружающей среды. Вклад генетики сорта снижается, возрастает влияние экологических факторов [6]. В условиях глобального и локального изменения климата возрастает целесообразность совершенствования селекционных исследований, направленных на повышение экологической устойчивости и адаптивности сортов. Оптимизация селекции выявляет специфическую адаптацию, включающую скрытые возможности генотипа, определяющие его степень выносливости к преобладающим условиям региона [7].

Экологически пластичный сорт характеризуется способностью формировать достаточно высокую среднюю урожайность в широком диапазоне варьирования средовых факторов. Адаптивный генотип выделяется оптимумом сочетания признаков продуктивности и засухоустойчивости, устойчивости к зимним факторам, продолжительности фаз вегетационного периода, яровизации, датами колошения и созревания, эффективностью использования факторов среды и агротехнологий для формирования урожая [8, 9].

Отбор перспективного адаптивного селекционного материала происходит в многообразных сложных генотипо-средовых взаимодействиях. В стрессовых лимитированных условиях он будет сопровождаться созданием форм с достаточной урожайностью в аналогичных средах, но не способных реализовать высокую продуктивность в более близких к оптимальным.

Для создания экологически пластичных сортов с широкой нормой реакции на взаимодействие «генотип среда» целесообразно выделение перспективных форм с максимальным проявлением признака продуктивности, ввиду его генетической вариабельности и наследуемости, с их дальнейшим испытанием в различных почвенно-климатических зонах, отличающихся лимитирующими стресс-факторами [10].

Взаимосвязь «генотип × среда» выступает как один из критериев отбора, показатель стрессоустойчивости и адаптивности к лимитирующим факторам среды. Через нее осуществляется реализация детерминированных признаков продуктивности [11]. Для селекции критически важно применение методов, которые дают возможность количественно оценивать вклад в адаптивность морфоструктурных признаков. Селекционные индексы, интегрирующие такие признаки, повышают точность отбора в лимитированных условиях [12, 13].

Для выявления эффективности применения селекционных индексов на материале озимой мягкой пшеницы необходимо проведение их верификации в специфических почвенно-климатических условиях, характерных для степного засушливого региона. Это позволит создавать сорта, максимально адаптированные к определенному региону, что делает процесс селекции более эффективным и результативным.

Новизна работы заключается в установлении прогностической ценности селекционных индексов в контрастных условиях степной засушливой зоны на Северо-Западе Ростовской области на районированных сортах и новом перспективном материале озимой мягкой пшеницы для ускоренного отбора пластичных генотипов.

Цель исследования – выявить генотипы озимой мягкой пшеницы с высокой адаптивной способностью в степной зоне Ростовской области на основе комплексной оценки параметров пластичности и селекционных индексов.

Условия, материалы и методы. Исследования проводили в 2021–2024 гг. в северо-западной сельскохозяйственной зоне Ростовской области.

Почва опытного участка представлена черноземом южным среднетяжелым карбонатным с мощностью гумусового горизонта – 30...40 см. Количество гумуса в пахотном слое было в пределах 3,6 % (ГОСТ 26213-91). Содержание подвижных форм фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) составляло 19 и 320 мг/кг (по Кирсанову, ГОСТ 26204-91), общего азота (ГОСТ Р 58596-2019) – 44 мг/кг.

Материалом для исследований служили сорта пшеницы мягкой озимой Донская Т 20 (в Госреестре РФ с 2024 г., 5, 6, 7, 8 регионы), Донья (Госреестр 2025 г., 5, 6, 7 регионы), Константа 22 (Госреестр 2025 г., 5, 7, 8, 9 регионы), Тарасовская (2026 г., 6, 8 регионы), Калитва (2026 г., 5, 6, 8 регионы), сорта Вольная заря, Легенда Дона, Реприза, Донской рассвет (в Государственном испытании), линии 929/20, 930/20, 1102/20, 1138/20, 1443/20, 1020/21, 1063/21, 1305/20 собственной селекции. Стандартом служил сорт, используемый на сортоучастках Ростовской области, Дон 107. Полевые опыты и учеты осуществляли в конкурсных сортоиспытаниях в соответствии с общепринятыми для зерновых культур методиками (*Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур*. М.: Госсортокмиссия, 2019. 329 с. URL: https://gossortrf.ru/upload/2019/08/metodica_1.pdf?ysclid=mppbqg8enh857318812; *Методические рекомендации по изучению мировых коллекций зерновых культур / Всесоюз. ордена Ленина акад. с.-х. наук им. В. И. Ленина. Всесоюз. ордена Ленина науч.-исслед ин-т растениеводства им. Н. И. Вавилова. Ленинград: 1967. 17 с.*).

Агротехника возделывания традиционная для озимой мягкой пшеницы в регионе [14]. Посев проводили сеялкой ССФК 7 с порционным высевочным аппаратом с нормой посева 4 млн всхожих семян на 1 га. Предшественник – черный пар, площадь делянки – 25 м², повторность – трехкратная, размещение систематическое. Оптимальные сроки сева в зоне проведения эксперимента – первая декада сентября. Уборка – селекционным комбайном Sampo-130.

В условиях почвенной и воздушной засухи в период посева в степном регионе получить опытные данные по непаровым предшественникам удаётся не каждый год [15]. Климат зоны – континентальный, засушливый. Период проведения исследований в 2021–2024 гг. отличался нестабильностью проявления климатических факторов в течение вегетационного периода. Вариация среднегодовой температуры составляла от +10,83°C (2023 г.) до +12,35°C (2024 г.) при среднемноголетней норме +6,94 °C. Годовое количество осадков варьировало от 490 (2024 г.) до 654 мм (2023 г.) при среднемноголетнем значении 451 мм. Гидротермический коэффициент (по Г.Т. Селянинову) за период вегетации озимых составлял: в 2021 г. – 0,6; в 2022 г. – 1,2; в 2023 г. – 1,2; в 2024 г. – 0,4. Многолетний ГТК в зоне проведения исследований составил 0,6. Интенсивность засухи по классификации ГТК была следующей: в 2021 г. – умеренная, в 2024 г. – сильная. Условия вегетации 2023 г. характеризовались периодами почвенной и воздушной засухи в период посева, в фазах кущения и выхода в трубку. Далее, в период колошения и налива зерна, наблюдалось аномально большое количество осадков для данной зоны, что вызвало полегание среднерослых и высокорослых генотипов. Зимние периоды в годы наблюдения были бла-

гоприятными для перезимовки озимых. Минимальная температура воздуха достигала $-21,0^{\circ}\text{C}$, на глубине узла кушения она составляла $-12,0^{\circ}\text{C}$ (2021 г.). В целом благоприятными для вегетации озимых были 2022 и 2023 гг.

Для выявления параметров адаптивности использовали данные урожайности сортов и линий конкурсного испытания в условиях 2021–2024 гг. Для оценки адаптивности сортов (экологическая пластичность b_i и стабильность S_i^2) использовали методику, предложенную Eberhart S.A. и Russel W.A., в изложении Зыкина В.З. (Зыкин В. З. Методика расчета и оценки параметров экологической пластичности сельскохозяйственных растений: 2-е изд., перераб. и доп. Уфа: Башкирский ГАУ, 2011. 100 с.).

Показатели общей адаптивной способности (ОАС) определяли по методике Кильчевского А. В. и Хотылевой Л. В. (Кильчевский А. В., Хотылева Л. В. Методы оценки адаптивной способности и стабильности генотипов, дифференцирующей способности среды // Генетика. 1985. Т. 21. № 9. С. 1491–1498).

Для оценки гомеостатичности (Hom) и селекционной ценности (Sc) сортов применяли методику Хангильдина В. В. с соавт. (Хангильдин В. В., Литвиненко Н. А. Гомеостатичность и адаптивность сортов озимой пшеницы // Научно-технический сборник. Одесса: ВСГИ, 1981. Вып. 1(39). С. 8–13).

Также учитывали стрессоустойчивость ($Y_{\min}-Y_{\max}$), определяемую по разнице между минимальным и максимальным значениями признака, и генетическую гибкость ($(Y_{\min}+Y_{\max})/2$), отражающую среднюю урожайность сортов в контрастных условиях (Пакудин В. З. Параметры оценки экологической пластичности сортов и гибридов. Теория отбора в популяциях растений / Новосибирск: Наука, 1976. 189 с.).

Для определения пластичности сортов использовали коэффициент мультипликативности (KM) (Драгавцев В. А., Цильке В. А., Рейтер Б. Г. Генетика признаков продуктивности яровой пшеницы в Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1984. 229 с.).

Также рассчитывали коэффициент интенсивности (КИ) (Удачин Р. А., Головаченко А. П. Методика оценки экологической пластичности сортов пшеницы // Селекция и семеноводство. 1990. № 5. С. 2–6).

Коэффициент адаптивности (КА) рассчитывали по Животкову Л. А. с соавт. (Животков Л. А., Морозова З. А., Секатева Л. И. Методика выявления потенциальной продуктивности и адаптивности сортов и селекционных форм озимой пшеницы по показателю «урожайности» // Селекция и семеноводство. 1994. № 2. С. 3–6).

Определяли индекс экологической пластичности (ИЭП), предложенный А. А. Грязновым (Грязнов А. А. Карабалыкский ячмень. Кустанай: Кустанайский печатный двор, 1996. 448 с.).

Для выявления взаимодействия генотип $\times$ среда на элементы структуры урожая, которые определяют продуктивность и адаптивность к факторам среды, применяли селекционные индексы, используемые в различных селекционных исследованиях: мексиканский индекс M_i (отношение продуктивности колоса к высоте растения), канадский индекс K_i (отношение массы зерна с колоса к его длине), индекс линейной плотности колоса ЛНК (соотношение количества зерен в колосе и длины колоса), финско-скандинавский индекс FS_j (отношение количества зерен в колосе к высоте растений), индекс перспективности растения JP (отношение массы 1000 зерен к длине соломины), индекс продуктивности растений ИПР (отношение произведения количества зерен на массу зерна к со-

лоса к длине колоса). (Драгавцев В. А. Эколого-генетическая организация полигенных признаков растений и теория селекционных индексов // Молекулярная и прикладная генетика. 2009. Т. 9. С. 8–13.)

Статистическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа с использованием компьютерной программы «Microsoft Office Excel».

Результаты и обсуждение. Согласно результатам дисперсионного анализа наибольшее влияние на варьирование урожайности линейки сортов собственной селекции за период исследований оказали условия года. Доля влияния условий среды составила 91 %, генотипического потенциала сортов – 4,8 %, взаимодействия этих двух факторов – 4,1 % при уровне значимости 5 % ($F_{\text{факт.}} > F_{\text{крит.}}$).

Более благоприятные условия вегетации (табл. 1) для формирования высокой урожайности были отмечены в 2022 ($I=1,7$) и 2023 гг. ($I=1,28$), неблагоприятные – в 2021 ($I=-0,5$) и 2024 ($I=-2,44$). Средняя урожайность варьировала от 6,34 т/га (Дон 107) до 7,13 т/га (Донья, 1063/21), среднегодовая по набору исследуемых сортов без стандарта – от 4,35 (2024 г.) до 8,47 т/га (2022 г.). Коэффициент вариации урожайности (C_v) у образцов по годам составил 24,9...40,1 %. Наименьшую изменчивость продемонстрировали сорта Вольная заря, Донская Т 20, Константа 22, Тарасовская, Калитва, Легенда Дона и Донской расцвет ($C_v=24,9...30,7\%$).

Условия вегетации 2023/24 сельскохозяйственно-го года были аномально засушливыми, с недобором влаги на всех этапах развития растений. Заморозки в начале второй декады мая ($-4...-6^{\circ}\text{C}$, в низинах до -10°C) нанесли негативное воздействие на озимые злаки, усилили действие почвенной и воздушной засухи. Особенно сильно были повреждены раннеспелые генотипы: стандарт Дон 107, сорт Реприза и линии 1102/20, 1138/20, которые начали активно выколашиваться. В стрессовых условиях данные генотипы сформировали продуктивность зерна в пределах 3,37...3,99 т/га, что обусловило снижение средней урожайности и значений показателей их адаптивности.

По коэффициенту регрессии (b_i) выделили группу генотипов со стабильной реакцией на средовые факторы: Вольная заря ($b_i=0,92$), Донская Т 20 ($b_i=0,81$), Константа 22 ($b_i=0,95$), Калитва ($b_i=0,92$), Легенда Дона ($b_i=0,88$), Донской расцвет ($b_i=0,99$), линия 930/20 ($b_i=0,94$), стандартный сорт Дон 107 ($b_i=0,97$), для которых характерна минимальная дисперсия отклонения от регрессии ($S_i^2=0,10...0,15$) (см. табл. 1), что свидетельствует об экстенсивном типе адаптации и способности сохранять продуктивность в лимитированных условиях степной зоны. В засушливом 2024 г. указанные генотипы сохранили урожайность 4,23...4,83 т/га, превысив стандарт на 0,86...1,53 т/га.

Сорт Реприза и линии 1102/20, 1138/20, 1443/20 выделяются более высокими требованиями к условиям вегетации, к агрофону и к количеству осадков ($b_i=1,05...1,17$, $S_i^2=0,16...0,22$).

Достаточно высоким сбором урожая 7,13 т/га и отзывчивостью на улучшение условий среды ($b_i=1,2$) отличается сорт Донья, при высокой стабильности признака ($S_i^2=0,23$). Этот генотип относится к интенсивным формам, что подтверждается максимально реализованной урожайностью – 9,69 т/га (+2,4 т/га к ст. 2023 г.). Сорт также адаптирован к лимитированным условиям, его минимальная урожайность – 4,63 т/га (+1,26 т/га к ст., 2024 г.).

Сорт Тарасовская при коэффициенте регрес-

Таблица 1. Урожайность и экологическая пластичность сортов и линий озимой мягкой пшеницы

Сорт/линия	Урожайность, т/га					C_v , %*	b_i *	S_i^{2*}	Sc^*	Ном*
	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.	средняя					
Дон 107, стандарт	5,70	7,10	7,20	3,37	6,34	36,2	0,97	0,15	2,97	86,1
Вольная заря	6,00	8,19	8,30	4,83	6,74	27,7	0,92	0,14	3,92	80,0
Донская Т 20	6,00	8,0	7,72	4,90	7,05	24,9	0,81	0,10	4,32	89,8
Донья	6,67	8,76	9,69	4,63	7,13	35,0	1,20	0,23	3,41	95,4
Константа 22	6,6	8,25	7,97	4,45	6,95	30,7	0,95	0,14	3,75	86,6
Тарасовская	6,29	8,85	8,28	4,88	6,87	29,2	1,00	0,16	3,79	87,3
Калитва	6,16	8,57	7,35	4,57	6,53	30,0	0,92	0,14	3,48	83,2
Реприза	6,02	8,57	7,41	3,58	6,52	40,1	1,14	0,22	2,72	81,2
Легенда Дона	6,17	8,31	7,58	4,52	6,62	29,5	0,88	0,13	3,60	82,5
929/20	5,84	8,3	8,03	4,17	6,56	33,8	1,02	0,18	3,30	77,0
930/20	6,12	8,19	7,61	4,24	6,6	31,9	0,94	0,15	3,42	80,7
1102/20	6,40	8,1	8,15	3,99	6,52	35,3	1,05	0,18	3,19	74,0
1138/20	5,79	8,42	7,66	3,61	6,65	39,3	1,17	0,22	2,85	82,2
1443/20	6,99	8,14	8,36	4,22	6,91	33,7	1,02	0,16	3,49	84,8
Донской рассвет	7,00	8,20	8,11	4,23	6,94	30,2	0,99	0,15	3,58	84,4
1020/21	6,02	9,60	7,86	4,50	7,06	35,4	1,17	0,22	3,31	98,1
1063/21	6,17	9,12	8,96	4,25	7,13	37,1	1,28	0,26	3,32	89,4
Среднее (без стандарта)	6,27	8,47	8,07	4,35	6,77	-	-	-	-	-
НСР ₀₅	0,42	0,65	0,51	0,34	-	-	-	-	-	-
I_j	-0,5	1,7	1,28	-2,44	-	-	-	-	-	-

* C_v – коэффициент вариации; b_i – пластичность, S_i^2 – стабильность; I_j – индекс условий среды; Sc – селекционная ценность; Ном – гомеостатичность.

сии b_i , равном 1, и стабильности 0,16, близкой к 0, пластичен к разнообразным условиям среды. Сорт сформировал в засушливых условиях 2024 г. 4,88 т/га (+1,51 т/га к ст.), в оптимальном по влагообеспечению 2022 г. – 8,85 т/га (+1,75 т/га к ст.).

Лучшими по показателю гомеостатичности оказались генотипы Константа 22 (Ном=86,6), Тарасовская (Ном=87,3), 1063/21 (Ном=89,4), Донская Т 20 (Ном=89,8), Донья (Ном=95,4) и 1020/21 (Ном=98,1). Высока величина этого показателя у и стандартного сорта Дон 107 (Ном=86,1).

Среди изученных сортов максимальный рейтинг селекционной ценности продемонстрировал сорт Донская Т20 ($Sc = 4,32$). Высокие параметры селекционной ценности зафиксированы у сортов Вольная заря ($Sc = 3,92$), Тарасовская ($Sc = 3,79$), Константа 22 ($Sc = 3,75$), Легенда Дона ($Sc = 3,60$) и Донской рассвет ($Sc = 3,58$). Эти результаты на 20...45 % превосходят стандарт Дон 107 ($Sc = 2,97$). Такое превышение свидетельствует о стабильной реализации генетического потенциала этих сортов в степных условиях, что делает их перспективными для селекционного отбора. Для форм с высокой селекционной ценностью ($Sc = 3,58...4,32$) выявили экстенсивный тип адаптации ($b_i = 0,88...0,99$), что указывает на их целесообразность для использования в условиях недостаточного увлажнения.

Различные методологические подходы к оценке экологической пластичности детерминируют вариативность интерпретации адаптивных параметров, что обосновывает необходимость унификации критериев отбора в селекционных программах.

Стрессоустойчивость, рассчитанную как разность между урожайностью в лимитированных и оптимальных условиях, интерпретируют как показатель реакции генотипа на контрастные факторы среды: меньшее значение модуля характеризует большую стабильность продуктивности. Высокую стрессоустойчивость ($Y_{min} - Y_{max} = -3,95...-3,47$ т/га) зафиксировали у сортов Вольная заря, Константа 22, Легенда Дона, Донской рассвет и линии 930/20, что характеризует их как экстенсивные формы с высокой стабильностью в условиях дефицита

влаги (табл. 2). Сорт Донская Т 20 продемонстрировал минимальное в опыте значение этого показателя (-3,10 т/га) при средней урожайности 7,05 т/га, что подтверждает его адаптивность к лимитированным условиям степной зоны и устойчивость к поздневесенним заморозкам. Линия 1020/21 сформировала максимальную разность (-5,16 т/га) при пиковой продуктивности 9,12 т/га в благоприятный год, что указывает на интенсивный тип адаптации с высокой зависимостью от агрофона и влагообеспеченности.

Повышенные значения генетической гибкости ($(Y_{min} + Y_{max})/2 = 6,57...7,16$ т/га) отмечены у сортов Вольная заря, Донья, Тарасовская, Калитва и линий 1020/21, 1063/21, что свидетельствует об их способности реализовывать высокий продуктивный потенциал как в оптимальных, так и в стрессовых условиях. Однако генотипы 1020/21 и Донья демонстрируют низкую стрессоустойчивость (-5,06 и -5,16). Это связано с их потенциалом достигать высокой урожайности в оптимальных условиях (9,60 т/га в 2022 г. и 9,69 т/га в 2023 г.). В условиях сильной засухи 2024 г. их урожайность снизилась (4,5 и 4,63 т/га), но её уровень значительно выше показателя стандарта (+1,2 и +1,33 т/га). Это делает их ценным материалом для селекционных программ, ориентированных на интенсивные технологии.

Генотипы Донья (КМ = 2,13), 1063/21 (2,20) и Реприза (2,18) превысили стандарт Дон 107 (1,82) на 17...21 %, что подтверждает высокий мультипликативный потенциал в благоприятные годы.

Генотипы Донья, Калитва, Реприза, линии 929/20, 1102/20, 1138/20, 1020/21 и 1063/21 превысили уровень стандарта Дон 107 (60,4 %), сформировав КИ в диапазоне 61,3...76,5 % (см. табл. 2), что свидетельствует об их устойчивости к контрастным факторам среды.

Индекс экологической пластичности (ИЭП) по А.А. Грязнову превысил единицу у сортов Константа 22, Вольная заря, Донья, Тарасовская и линий 1443/20, 1020/21, 1063/21 (ИЭП = 1,01...1,09), что подтверждает их способность формировать урожайность выше среднего в благоприятные годы. Гено-

Таблица 2. Оценка сортов и линий по различным показателям адаптивности (2021–2024 гг.)

Сорт	Стресс-соустойчивость	Генетическая гибкость	Коэффициент мультипликативности	Коэффициент интенсивности	Коэффициент адаптивности	Индекс экологической пластичности	Общая адаптивная способность	Сумма рангов
Дон 107, стандарт	-3,83	5,29	1,82	60,4	93	0,85	-0,43	91
Вольная заря	-3,47	6,57	1,92	51,5	100	1,02	-0,03	68
Донская Т 20	-3,10	6,45	1,77	44,0	104	1,00	0,28	56
Донья	-5,06	7,16	2,13	71,0	105	1,09	0,36	39
Константа 22	-3,80	6,35	1,93	54,7	103	1,01	0,18	60
Тарасовская	-3,97	6,87	1,98	57,8	101	1,05	0,10	49
Калитва	-4,00	6,57	1,95	61,3	96	0,99	-0,24	72
Реприза	-4,99	6,08	2,18	76,5	96	0,93	-0,25	84
Легенда Дона	-3,79	6,42	1,90	57,3	98	0,99	-0,15	71
929/20	-4,13	6,24	2,05	63,0	97	0,97	-0,21	82
930/20	-3,95	6,22	1,96	59,8	97	0,97	-0,17	84
1102/20	-4,16	6,07	2,09	63,8	96	0,98	-0,25	88
1138/20	-4,81	5,64	2,10	72,3	98	0,93	-0,12	80
1443/20	-4,14	6,29	1,99	59,9	102	1,02	0,14	62
Донской рассвет	-3,88	6,17	1,96	57,2	103	1,02	0,17	65
1020/21	-5,16	7,05	2,12	72,2	104	1,03	0,29	46
1063/21	-4,87	6,69	2,20	68,3	105	1,04	0,36	44

типы Калитва, Реприза, Легенда Дона, линии 929/20 и 930/20 с ИЭП 0,93...0,99 демонстрируют преимущество в лимитированных условиях.

Высокой общей адаптивной способностью (ОАС), рассчитанной по методике А. В. Кильчевского и Л. В. Хотылевой, за период исследований, характеризовались сорта Донья (0,36 т/га), Донская Т 20 (0,28 т/га), Константа 22 (0,18 т/га), Донской рассвет (0,17 т/га), Тарасовская (0,10 т/га) и линии 1063/21 (0,36 т/га), 1443/20 (0,14 т/га), 1020/21 (0,29 т/га), значительно превосходя стандарт Дон 107 (-0,43 т/га). Положительные значения ОАС у этих генотипов свидетельствуют об их способности формировать урожайность выше среднего по опыту (6,77 т/га) в варьирующихся условиях среды, что подтверждает их пластичность к контрастным факторам степной зоны. Интенсивные формы Донья, 1020/21, 1063/21 с ОАС 0,29...0,36 т/га демонстрируют максимальную реализацию продуктивного потенциала при высоком агрофоне, тогда как экстенсивные стабильные генотипы Донская Т20, Константа 22, Тарасовская, Донской рассвет (ОАС 0,10...0,28 т/га) обеспечивают устойчивую продуктивность в лимитированных условиях. Выделенные генотипы рекомендованы для использования в селекционных программах в качестве источников пластичности при создании сортов для широкого ареала возделывания в условиях неустойчивого увлажнения.

Урожайность сорта Вольная заря (6,74 т/га) достоверно не отличалась от среднесортowego показателя по опыту (6,77 т/га). Более низкую общую адаптивную способность (ОАС от -0,25 до -0,12 т/га) продемонстрировали сорта Легенда Дона (-0,15 т/га), Калитва (-0,24 т/га), Реприза (-0,25 т/га), стандарт Дон 107 (-0,43 т/га) и линии 1138/20 (-0,12 т/га), 929/20 (-0,21 т/га), 930/20 (-0,17 т/га), что ограничивает их использование в селекционных программах широкого ареала и обосновывает применение в качестве исходного материала для локальной селекции в условиях Северо-Кавказского региона.

Для интегральной оценки адаптивности применяли метод ранжирования по 17 генотипам, где минимальная сумма рангов характеризует наиболее адаптивные формы. Анализ распределения по сумме рангов параметров адаптивности выделил группу перспективных генотипов: Донья (39), 1063/21 (44), 1020/21 (46), Тарасовская (49), Донская Т20 (56),

Константа 22 (60), 1443/20 (62), Донской рассвет (65), демонстрирующих стабильную продуктивность в лимитированных условиях степной зоны (табл. 3).

Корреляционный анализ элементов структуры урожая показал достоверную связь ($p < 0,05$) урожайности с ёмкостью ценоза (числом зерен/м²) ($r = 0,94 \pm 0,02$), массой зерна с колоса ($r = 0,79 \pm 0,02$), озёрненностью колоса ($r = 0,79 \pm 0,18$), индексом урожая ($K_{\text{оз.}}$) ($r = 0,67 \pm 0,14$) и массой зерна растений ($r = 0,55 \pm 0,21$). На основе этих параметров оценили селекционные индексы, сравнив их с полевыми данными для верификации прогностической ценности.

Мексиканский индекс (Mi), характеризующий устойчивость соломины к нагрузке массы колоса, достиг максимального значения у сорта Донья (0,0143 г/см) при высоте стебля 97,6 см и массе колоса 1,4 г (см. табл. 3). Короткостебельные формы интенсивного типа (высота 85...86 см) Вольная заря, Донская Т 20, Константа 22 (0,0116 г/см), Донской рассвет (0,0128 г/см) и линия 1063/21 (0,0120 г/см) сформировали стабильные значения индекса, что свидетельствует о их устойчивости к полеганию при оптимальном агрофоне. Однако в годы с аномальными осадками и шквалистыми ветрами среднерослый сорт Донья с крупным колосом демонстрировал склонность к полеганию, что ограничивает его использование на высокоинтенсивном фоне.

Канадский индекс (Ki), отражающий отношение массы зерна с колоса к его длине, рекомендован для оценки генотипов в условиях степной зоны с частыми весенне-летними засухами. Максимальные значения зафиксированы у сорта Донья (0,17 г/см) и линии 1443/20 (0,14 г/см); группа генотипов Вольная заря, Тарасовская, Легенда Дона, Донская Т20, Донской рассвет, линия 1063/21 сформировала индекс 0,13 г/см (см. табл. 3), что подтверждает их эффективность в использовании ресурсов среды для формирования продуктивного колоса.

Индекс линейной плотности колоса (ЛНК), рассчитанный как отношение числа зёрен к длине колоса, варьировал в диапазоне 2,48...3,65 шт./см. Лидирующие позиции заняли линия 1443/20 (3,65 шт./см), сорта Тарасовская (3,54 шт./см), Донской рассвет (3,46 шт./см), Легенда Дона и Вольная заря (3,25...3,32 шт./см), что характеризует их высокую озёрненность при компактной структуре колоса.

Таблица 3. Ранжирование сортов и линий озимой мягкой пшеницы по селекционным индексам

Сорт	Селекционный индекс							Сумма рангов
	мексиканский	канадский	линейная плотность колоса	финско-скандинавский	перспективности	отношения массы 1000 зерен к числу зерен в колосе	продуктивности растения	
Дон 107	0,0116	0,12	2,84	0,244	46	1,74	2,65	54
Вольная заря	0,0116	0,13	3,32	0,304	50	1,85	3,32	33
Донская Т 20	0,0116	0,13	3,32	0,290	48	1,79	3,48	33
Донья	0,0143	0,17	3,04	0,258	45	1,49	4,25	35
Константа 22	0,0116	0,12	3,11	0,293	50	1,76	3,11	42
Тарасовская	0,0113	0,13	3,54	0,312	43	1,30	3,54	41
Калитва	0,0102	0,11	2,48	0,225	50	2,63	2,48	64
Реприза	0,0113	0,11	3,02	0,324	49	1,37	2,84	61
Легенда Дона	0,0105	0,13	3,25	0,257	46	2,00	3,25	42
929/20	0,0106	0,12	2,89	0,262	48	1,79	2,89	56
1102/20	0,0096	0,12	2,94	0,242	46	2,00	2,64	63
1138/20	0,0099	0,11	2,70	0,240	50	2,17	2,43	66
1305/20	0,0099	0,12	2,86	0,241	47	2,04	2,69	61
1443/20	0,0111	0,14	3,65	0,288	46	1,64	3,65	35
Донской рассвет	0,0128	0,13	3,46	0,330	50	1,65	3,81	23
1020/21	0,0112	0,11	2,88	0,288	47	1,71	3,01	60
1063/21	0,0120	0,13	3,11	0,295	48	1,76	3,43	39
Среднее	0,0112	0,13	3,08	0,276	47	1,81	3,15	-
Cv, %	10,2	11,6	10	11,7	4,4	17,2	16,2	-

Финско-скандинавский индекс (FSi), определяемый как отношение числа зёрен в колосе к высоте растения, варьировал от 0,244 до 0,330 шт./см. Повышенные значения (0,288...0,330 шт./см) отмечены у сортов Вольная заря, Тарасовская, Реприза, Донской рассвет и линий 1063/21, 1443/20, 1020/21, что свидетельствует об их способности формировать высокоозернённые колосья при оптимальном габитусе растения.

Индекс перспективности растения (JP), учитывающий соотношение массы 1000 зёрен к длине соломины, достиг максимума у короткостебельных форм интенсивного типа: Вольная заря (50), Константа 22 (50), Калитва (50), Донской рассвет (50), линия 1138/20 (50) в ранговой оценке (см. табл. 3).

Индекс отношения массы 1000 зёрен к числу зёрен в колосе, отражающий эффективность использования ресурсов для формирования крупных зерновок, варьировал от 1,30 (Тарасовская) до 2,63 (Калитва); высокие значения (2,00...2,17) зафиксированы у сорта Легенда Дона и линий 1102/20, 1305/20, 1138/20.

Индекс продуктивности растения (ИПР), интегрирующий число зёрен, массу зерна с колоса и длину колоса, выделил генотипы Донья (4,25), Донской рассвет (3,81), 1443/20 (3,65), Тарасовская (3,54), Донская Т20 (3,48), 1063/21 (3,43) как наиболее эффективные в реализации продукционного потенциала.

Интегральная оценка по системе рангов селекционных индексов определила преимущество сортов Донской рассвет ($\Sigma=23$), Вольная заря (33), Донская Т20 (33), Донья (35), линии 1443/20 (35), 1063/21 (39), Тарасовская (41), Константа 22 (42), Легенда Дона (42).

Наличие статистически значимой, умеренно положительной корреляции (коэффициент ранговой корреляции Спирмена $r_s=0,5$, $p \leq 0,05$) между ранжированием сортов в селекционных индексах и рангами их показателей адаптивности и стабильности, подтверждает, что морфоструктурные характеристики – ценный инструмент для прогнозирования пластичности генотипов.

Применение комплексной системы индексов минимизирует влияние средовых факторов на фенотипическое проявление признаков и повышает точность отбора на адаптивность, что обосновывает использование

индексов перспективности растения, отношения М 1000 к числу зёрен, финско-скандинавского и канадского индексов в селекционных программах степной зоны.

Выводы. Выявлены генотипы озимой мягкой пшеницы с высокой адаптивной способностью для степной зоны Ростовской области – сорта Донья, Донская Т 20 и линии 1020/21, 1063/21, характеризующиеся средней урожайностью 7,05...7,13 т/га и положительной общей адаптивной способностью (ОАС = 0,28...0,36 т/га).

Установлено два типа адаптации: интенсивный ($b_i = 1,05...1,28$; $S_i^2 = 0,16...0,26$) – генотипы с высокой отзывчивостью на улучшение условий среды (Донья, 1020/21, 1063/21, Реприза, 1102/20, 1138/20, 929/20, 1443/20); экстенсивный ($b_i = 0,81...1,00$; $S_i^2 = 0,10...0,16$) – формы, обеспечивающие стабильную продуктивность в лимитированных условиях (Вольная заря, Донская Т 20, Константа 22, Калитва, Легенда Дона, Донской рассвет, Тарасовская, линия 930/20, стандарт Дон 107).

Для ускоренного отбора пластичных генотипов в селекционных программах степной зоны целесообразно использовать селекционные индексы: перспективности (JP), канадский (Ki), финско-скандинавский (FSi) и отношение массы 1000 зерен к числу зерен в колосе.

Сорта Донья, Донская Т 20, Константа 22 и линии 1020/21, 1063/21 рекомендованы как источники адаптивности для создания нового исходного селекционного материала для условий степной зоны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный Ростовский аграрный научный центр» в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме Российской академии наук в FNFZ -2022-0002 Пер. № НИОКТР122031500222-4

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Николаев М. В. Выявление уязвимых для дефицита влаги зернопроизводящих территорий на основе мезорайонирования зоны неустойчивого увлажнения при изменении климата в европейской части России // *Сельскохозяйственная биология*. 2024. Т. 59. № 3. С. 473–491. doi: 10.15389/agrobiology.2024.3.473rus.
2. Гончаров Н. П., Косолапов В. П. Селекция растений – основа продовольственной безопасности России // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021. № 25 (4). С. 361–366. doi: 10.18699/VJ21.039.
3. Грабовец А. И., Фоменко М. А. Стабильность урожаев в широком диапазоне сред – основной параметр при селекции озимой пшеницы // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2020. № 5. С. 3–8. doi: 10.31857/S2500262720050014.
4. Практическое использование в селекции озимой ржи способов, позволяющих сочетать в сорте высокую урожайность и устойчивость к неблагоприятным условиям / А. А. Тороп, В. В. Чайкин, Е. А. Тороп и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 3. С. 32–35. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10306.
5. Гончаров Н. П. Научное обеспечение селекции и семеноводства Сибири в XXI веке // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021. Т. 25. № 4. С. 448–459. doi: 10.18699/VJ21.050.
6. Лепехов С. Б. Показатель снижения температуры растительного полога в селекции пшеницы на засухоустойчивость и жаростойкость // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2022. Т. 26. № 2. С. 193–201. doi: 10.18699/VJGB-22-24.
7. Анализ засухоустойчивости различающихся по стратегии адаптации к засухе растений пшеницы *Triticum aestivum* L. на начальном этапе онтогенеза / А. М. Авальбаев, Р. А. Юлдашев, Ч. Р. Аплагулова и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2024. Т. 59. № 1. С. 131–141. doi: 10.15389/agrobiology.2024.1.131rus.
8. Потапова Г. Н., Галимов К. А., Зобнина Н. Л. Влияние изменения климата осенью и зимой на возделывание озимой ржи // *Достижения науки и техники АПК*. 2019. Т. 33. № 6. С. 18–21. doi: 10.24411/0235-2451-2019-10604.
9. Ласточкин О. В. Адаптация и устойчивость растений пшеницы к засухе, опосредованная природными регуляторами роста *Bacillus* spp.: механизмы реализации и практическая значимость // *Сельскохозяйственная биология*. 2024. Т. 59. № 3. С. 473–491. doi: 10.15389/agrobiology.2024.3.473rus.
10. Smart Crop: база знаний молекулярно-генетических механизмов адаптации риса и пшеницы к стрессовым факторам / П. С. Деменков, Т. В. Иванисенко, М. А. Клещев и др. // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2025. Т. 29. № 8. С. 1221–1234. doi: 10.18699/vjgb-25-129.
11. Фенотипическая изменчивость селекционных линий мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по элементам структуры урожая в экологических условиях Западной Сибири и Татарстана / А. И. Стасюк, И. Н. Леонова, М. Л. Пономарева и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2021. Т. 56. № 1. С. 78–91. doi: 10.15389/agrobiology.2021.1.78rus.
12. Максимов Р. А. Метод определения параметров адаптивной способности с использованием множественного регрессионного анализа взаимосвязи урожайности и ее элементов структуры // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 6. С. 4–10. doi: 10.24411/0235-2451-2021-10601.
13. Иванисова А. С., Марченко Д. М. Использование селекционных индексов при оценке продуктивности озимой твердой пшеницы // *Зерновое хозяйство России*. 2024. № 8. С. 150–154. doi: 10.32634/0869-8155-2024-385-8-150-154.
14. Зональные системы земледелия Ростовской области на период 2022–2026 годы / А. И. Клименко, А. В. Гринько, А. И. Грабовец и др. *Министерство сельского хозяйства и продовольствия Ростовской области*. Ростов-на-Дону: ФГБНУ ФРАНЦ, 2022. 734 с.
15. Вошедский Н. Н., Кулыгин В. А. Особенности влияния отдельных технологических приёмов на водопотребление и урожайность новых сортов озимой пшеницы в Ростовской области // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 9. С. 26–31. doi: 10.53859/02352451_2022_36_9_26.

References.

1. Nikolaev MV. [Identification of grain-producing territories vulnerable to moisture deficit based on meso-zoning of the zone of unstable moisture under climate change in the European part of Russia]. *Sel'skokhoziastvennaia Biologiya*. 2024;59(3):473-91. doi: 10.15389/agrobiology.2024.3.473rus. Russian.
2. Goncharov NP, Kosolapov VP. [Plant breeding – the basis of food security in Russia]. *Vavilovskii Zhurn Genet Sel*. 2021;25(4):361-6. doi: 10.18699/VJ21.039. Russian.
3. Grabovets AI, Fomenko MA. [Stability of yields in a wide range of environments – the main parameter in breeding winter wheat]. *Russ S-kh Nauka*. 2020;(5):3-8. doi: 10.31857/S2500262720050014. Russian.
4. Torop AA, Chaikin VV, Torop EA, et al. [Practical use of methods in winter rye breeding that allow combining high yield and resistance to adverse conditions in a variety]. *Dostizh Nauki Tekh APK*. 2020;34(3):32-5. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10306. Russian.
5. Goncharov NP. [Scientific support of breeding and seed production in Siberia in the 21st century]. *Vavilovskii Zhurn Genet Sel*. 2021;25(4):448-59. doi: 10.18699/VJ21.050. Russian.
6. Lepekhov SB. [Indicator of canopy temperature depression in wheat breeding for drought and heat tolerance]. *Vavilovskii Zhurn Genet Sel*. 2022;26(2):193-201. doi: 10.18699/VJGB-22-24. Russian.
7. Aval'baev AM, Yuldashev RA, Allagulova ChR, et al. [Analysis of drought tolerance of wheat plants *Triticum aestivum* L. differing in adaptation strategy to drought at the initial stage of ontogenesis]. *Sel'skokhoziastvennaia Biologiya*. 2024;59(1):131-41. doi: 10.15389/agrobiology.2024.1.131rus. Russian.
8. Potapova GN, Galimov KA, Zobnina NL. [Influence of climate change in autumn and winter on winter rye cultivation]. *Dostizh Nauki Tekh APK*. 2019;33(6):18-21. doi: 10.24411/0235-2451-2019-10604. Russian.
9. Lastochkin OV. [Adaptation and drought tolerance of wheat plants mediated by natural growth regulators of *Bacillus* spp.: mechanisms of implementation and practical significance]. *Sel'skokhoziastvennaia Biologiya*. 2024;59(3):473-91. doi: 10.15389/agrobiology.2024.3.473rus. Russian.
10. Demenkov PS, Ivanisenko TV, Kleshchev MA, et al. [Smart Crop: a knowledge base of molecular genetic mechanisms of adaptation of rice and wheat to stress factors]. *Vavilovskii Zhurn Genet Sel*. 2025;29(8):1221-34. doi: 10.18699/vjgb-25-129. Russian.
11. Stasiuk AI, Leonova IN, Ponomareva ML, et al. [Phenotypic variability of breeding lines of soft wheat (*Triticum aestivum* L.) by yield structure elements in the ecological conditions of Western Siberia and Tatarstan]. *Sel'skokhoziastvennaia Biologiya*. 2021;56(1):78-91. doi: 10.15389/agrobiology.2021.1.78rus. Russian.
12. Maksimov RA. [Method for determining parameters of adaptive ability using multiple regression analysis of the relationship between yield and its structural elements]. *Dostizh Nauki Tekh APK*. 2021;35(6):4-10. doi: 10.24411/0235-2451-2021-10601. Russian.
13. Ivanisova AS, Marchenko DM. [Use of selection indices in assessing the productivity of winter durum wheat]. *Zernovoe Khoziaistvo Ross*. 2024;(8):150-4. doi: 10.32634/0869-8155-2024-385-8-150-154. Russian.
14. Klimenko AI, Grin'ko AV, Grabovets AI, et al. [Zonal farming systems of the Rostov region for the period 2022–2026]. *Ministry of Agriculture and Food of the Rostov Region*. Rostov-on-Don: FGBNU FRANTS; 2022. 734 p. Russian.
15. Voshedskii NN, Kulygin VA. [Features of the influence of certain technological techniques on water consumption and yield of new winter wheat varieties in the Rostov region]. *Dostizh Nauki Tekh APK*. 2022;36(9):26-31. doi: 10.53859/02352451_2022_36_9_26. Russian.

Поступила в редакцию 10.03.2026 После доработки 03.04.2026 Принята к публикации 22.04.2026

Совершенствование технологии доращивания молодняка зубров (*Bison bonasus* L.) на естественных пастбищах в центральном зубровом питомнике

А. Н. СТЕФУТИН, Н. В. СИВКИН

Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста, пос. Дубровицы, 60, Подольский р-н, Московская обл., 142132, Российская Федерация

Резюме. Исследование проводили с целью оптимизации технологии доращивания молодняка зубра (*Bison bonasus* L.) на загонных пастбищах для повышения интенсивности роста и адаптационного потенциала перед реинтродукцией. Эффективность выращивания молодняка оценивали по динамике прироста живой массы и биохимическому профилю крови. Эксперимент проводили в сентябре–октябре 2025 г. на двух опытных группах, сформированных из зубров, родившихся в 2024 г. (всего 13 голов). После отделения от матерей в возрасте 11,2...15,4 месяцев животных содержали в течение 56 дней группами в загонах № 1 (2,5 гол./га) и № 4 (0,9 гол./га) с общей биомассой и содержанием сухих веществ в пастбищной траве соответственно 70,7 ц/га, 25,8 % и 53,5 ц/га, 41,8 %. Ежедневная норма скармливания концентратов загоне № 1 составляла 4 кг/гол./сут., в загоне № 4 – 2 кг/гол./сут. За период выпаса молодняка зубров суммарная биомасса травостоя в загоне № 1 сократилась на 67,9 %, средняя урожайность трав – на 480 г/м², тогда как в загоне № 4 величины этих показателей достоверно не изменились, составив 1695 г/м² (+5,6 % к исходному уровню) и 565,0±89,6 г/м² соответственно. Интенсивная технология (2,5 гол./га, 4 кг концентратов) обеспечила суммарный прирост живой массы 29,4±5,8 кг и среднесуточный 524,8±103,5 г, что выше показателей сравняемой группы на 15,7 кг и 279,5 г соответственно. Биохимические параметры крови у животных обеих групп сохранялись в пределах физиологической нормы, что свидетельствует об устойчивом гомеостазе. На основании динамики снижения биомассы в загоне № 1 (на 67,9 % за 56 дней) оптимальным сроком стравливания пастбищ при высокой нагрузке следует считать 40...55 суток, после чего требуется ротация. Такой подход повышает эффективность доращивания молодняка для реинтродукции и снижает риск деградации кормовых угодий.

Ключевые слова: зубр (*Bison bonasus* L.), вольерное содержание, биохимический состав крови, прирост живой массы, ботанический состав пастбищ, центральный зубровый питомник.

Сведения об авторах: А. Н. Стефутин, аспирант (e-mail: stefutin@inbox.ru); Н. В. Сивкин, кандидат сельскохозяйственных наук, ученый секретарь.

Для цитирования: Стефутин А. Н., Сивкин Н. В. Совершенствование технологии доращивания молодняка зубров (*Bison bonasus* L.) на естественных пастбищах в центральном зубровом питомнике // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. № 4. С. 55–61. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_55.

Improving the technology of rearing young bison (*Bison bonasus* L.) on natural pastures in the central bison nursery

A. N. Stefutin, N. V. Sivkin

Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, pos. Dubrovitsy, 60, Podol'skii r-n, Moskovskaya obl., 142132, Russian Federation

Abstract. The study was conducted to optimise the technology for rearing young European bison (*Bison bonasus* L.) on paddock pastures to increase growth intensity and adaptive potential before reintroduction. The efficiency of rearing young animals was assessed based on live weight gain dynamics and blood biochemical profile. The experiment was conducted in September–October 2025 on two experimental groups formed from bison born in 2024 (a total of 13 animals). After separation from their mothers at the age of 11.2–15.4 months, the animals were kept for 56 days in groups in enclosures № 1 (2.5 heads/ha) and № 4 (0.9 heads/ha) with a total biomass and dry matter content in pasture grass of 70.7 c/ha, 25.8%, and 53.5 c/ha, 41.8%, respectively. The daily feed rate of concentrates in enclosure № 1 was 4 kg/head/day, and in enclosure № 4 – 2 kg/head/day. During the grazing period of young bison, the total herbage biomass in enclosure № 1 decreased by 67.9%, and the average herbage yield by 480 g/m², while in enclosure № 4 the values of these indicators did not change significantly, amounting to 1695 g/m² (+5.6% compared to the initial level) and 565.0±89.6 g/m², respectively. The intensive technology (2.5 heads/ha, 4 kg of concentrate) resulted in a total live weight gain of 29.4 ± 5.8 kg and an average daily weight gain of 524.8 ± 103.5 g, which is 15.7 kg and 279.5 g higher than the comparison group, respectively. Blood biochemical parameters in animals of both groups remained within physiological norms, indicating stable homeostasis. Based on the biomass decline in paddock №1 (67.9% in 56 days), the optimal period for grazing pastures under high load is considered to be 40–55 days, after which rotation is required. This approach increases the efficiency of rearing young animals for reintroduction and reduces the risk of forage degradation.

Keywords: European bison (*Bison bonasus* L.); enclosure housing; blood biochemistry; live weight gain; botanical composition of pastures; central bison nursery.

Author Details: A. N. Stefutin, postgraduate student (e-mail: stefutin@inbox.ru); N. V. Sivkin, Cand. Sc. (Agr.), academic secretary.

For citation: Stefutin AN, Sivkin NV. [Improving the technology of rearing young bison (*Bison bonasus* L.) on natural pastures in the central bison nursery]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(4):55–61. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_55.

История сохранения европейского зубра (*Bison bonasus* L.) – один из классических примеров спасения вида на грани исчезновения. К началу XX столетия в результате антропогенной трансформации ландшафтов и неконтролируемой охоты вид полностью исчез из дикой природы. Восстановление популяции стало возможным исключительно благодаря особям, сохранившимся в зоологических коллекциях Германии, Польши, Швеции и России,

чья численность в 1926 г. не превышала 52 особей [1, 2, 3].

Одним из ключевых направлений современной стратегии сохранения зубра – совершенствование технологических приёмов выращивания молодняка в полувольных условиях, которые предусматривают комплекс мероприятий по улучшению племенной работы, созданию и оптимизации использования кормовой базы в питомниках. ЦЗП, расположенный на тер-

ритории Приокско-Террасного заповедника, на протяжении 78 лет выполняет функцию базового резервата по разведению чистокровных кавказско-беловежских зубров и подготовке особей к интродукции в естественную среду обитания. Будучи наиболее крупным представителем наземной мегафауны, зубр сочетает в себе исключительную физическую выносливость и устойчивость к суровым климатическим воздействиям. Его пищеварительная система приспособлена к эффективному использованию грубых растительных кормов с низкой питательной ценностью [4, 5].

Успешность программы по реинтродукции напрямую зависит от качества ремонтного молодняка, его жизнеспособности, адаптационного потенциала и способности к эффективному использованию естественных кормовых ресурсов после выпуска в природу [6, 7, 8].

Технология вольерного содержания зубров базируется на использовании естественных пастбищ с луговой и лесистой растительностью. Видовая структура травостоя, его урожайность и питательная ценность выступают важнейшими факторами, лимитирующими интенсивность роста животных в осенний период, когда естественная вегетация растений замедляется. Несмотря на очевидную значимость пастбищного корма в рационах молодняка, вопросы нормирования пастбищной нагрузки, продолжительности стравливания и уровня дополнительной подкормки концентратами применительно к зуброводству остаются недостаточно изученными [7].

Организация полувольного содержания зубров, в том числе и отнятого от матерей молодняка на доращивании предусматривает использование загонных пастбищ. Видовой состав и урожайность травостоя, зависящие от многих факторов (почвенных условий, освещенности, увлажненности и др.), определяют допустимую нагрузку на пастбище, режимы стравливания и необходимость дополнительных подкормок [6, 8].

Повышение жизнеспособности молодняка предназначенного для интродукции в природу путем улучшения кормления служит одним из приемов увеличения численности популяции и группировок зубров в местах обитания [9].

Существующая в питомнике система кормления отнятого молодняка предусматривает использование пастбищ в сочетании с концентратами по общепринятым нормам. Однако изменчивость ботанического состава трав по загонам, неодинаковая скорость отрастания фитомассы и различия в её химическом составе в осенний период года создают предпосылки для дифференцированного подхода к организации пастбы [9, 10, 11]. Научное обоснование оптимизации плотности размещения зубров на пастбищах и корректировка уровня концентратной подкормки, неизменной для соответствующих возрастных групп [12, 13], могут стать действенными рычагами управления продуктивностью молодняка на заключительном этапе его подготовки к интродукции. В этой связи изучение динамики урожайности и питательности пастбищной растительности, в условиях лимитированных возможностей раздельного размещения в резервных вольерах молодняка, предназначенного на племя и реинтродукции в природу, а также оценка ответной реакции молодых зубров в виде приростов живой массы и показателей гомеостаза представляет собой актуальную научно-практическую задачу. Результаты таких исследований позволят не только повысить

эффективность доращивания, но и обеспечить более рациональное использование кормового потенциала лесных и луговых угодий питомника.

Цель исследования – на основе комплексной оценки кормовых ресурсов загонных пастбищ, живой массы и физиологического состояния молодняка зубров (*Bison bonasus* L.) усовершенствовать технологию их доращивания, обеспечивающую повышение интенсивности прироста живой массы и адаптационного потенциала перед реинтродукцией в естественную среду обитания.

Условия, материалы и методы. Работу проводили в Центральном зубровом питомнике (ЦЗП) Приокско-Террасного заповедника в 2024–2025 гг. Объект исследований – молодняк зубров в условиях полувольного содержания, разведения и селекции, направленной на сохранение генетического разнообразия и наращивания численности популяции, в рамках реализации национального проекта «Экологическое благополучие», мероприятий федерального проекта «Сохранение биологического разнообразия и развитие экологического туризма» и «Плана расселения и передачи в другие центры содержания зубров из питомников и вольных группировок на 2025–2026 гг.».

В ЦЗП используют 8 загонных разной площади. Зубровые семьи, включающие быка, коров и телят с создания и до расформирования содержатся по загонам № 3, № 5, № 6, № 7, № 8, с плотностью размещения 0,2...0,3 гол/га. Загоны № 1 и № 4 – резервные, для временного размещения зверей в периоды перегруппировок, подготовки к расселению и др.

Племенной молодняк зубров в возрасте 10...15 месяцев, предназначенный для ремонта популяции ЦЗП и интродукции в дикую природу, отбивали от матерей, в обязательном порядке проводили мечение с использованием визуальных и электронных ушных бирок, а также взвешивание. Затем в течение 2...3-х месяцев размещали в одном из резервных загонных для доращивания и социальной интеграции, а после оценки готовности к выпуску по отношению живой массы к величине этого показателя у взрослой особи (более 60 %) и физическому развитию вывозили в места вольного обитания.

В эксперименте по интенсивному формированию повышенной жизнеспособности зубров, отобранных для реинтродукции в естественную среду обитания содержали в загоне № 1 (с повышенной пастбищной нагрузкой), для замены выбракованных племенных особей – в загоне № 4 (по принятой технологии, контроль). Исследования проводили на молодняке 2024 г. рождения (всего 13 голов). В племенную группу (загон № 4) отбирали типичных хорошо развитых животных, с учетом генеалогического происхождения, поддержания разнообразия и исключения нарастания инбридинга. В экспериментальной группе (загон № 1) находился оставшийся молодняк, который готовили к расселению и передаче в разные регионы для пополнения вольных популяций.

В возрасте доращивания, с 11,2...15,4 месяца, животных на 56 дней размещали в загоне № 1 (площадь 4,0 га) из расчета 2,5 головы на 1 га (10 зубров, в том числе 4 самки, 5 самцов и 1 самец, рожденный в конце 2023 г., и поэтому исключенный из анализа динамики живой массы и показателей биохимии крови) и в загоне № 4 (площадь 4,5 га) по 0,9 голов на 1 га (4 зубра, в том числе 3 самки и 1 самец). Рацион кормления включал пастбищную траву, а также концентраты со-

ответственно по 4 кг (увеличенный опытный рацион в загоне № 1) и 2 кг (стандартный рацион питомника в загоне № 4) на голову в день.

Для контроля физиологических показателей после обездвиживания седацией препаратом Везотил из расчета 1,2 мг действующего вещества на 1 кг живой массы тела, в комплексе с седативным средством Медитин, 1 % из расчета 0,06 мг действующего вещества на 1 кг живой массы тела, проводили идентификацию животных (крепление визуальной и электронной ушных меток), отбор биологических проб (сыворотка крови, стабилизированная кровь, выпип кожной ткани), а также взвешивание с использованием специальных краповых весов «СмартВес ВЭК/2-1000» (до 1 т) и крапового манипулятора «HINO 500 с КМУ INMAN IT 150». Исследования биохимического состава крови выполняли в Федеральном научном центре животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста (ФБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста).

Анализ ботанического состава и урожайности пастбищ загонов выполняли путем полевых наблюдений и методом луговой выборки, с использованием рамки площадью 1 м². Для этого в трех выбранных точках загона, репрезентативно отражающих его территорию, скашивали траву до уровня почвы. Фитомассу каждой из луговых выборок взвешивали на переносных электронных весах (ВСП 30/05-4ТКС), после чего их объединяли и общую пробу направляли в лабораторию ФБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста для полного зоотехнического анализа питательности и содержания сухих веществ.

Состав рационов опытных групп формировали согласно установленным в ходе эксперимента нормам скормливания концентратов и пастбищной растительности, составляющим 10 % от живой массы животных [13]. Показатели питательности рационов рассчитаны на основании данных лабораторных анализов отобранных проб зеленой массы и концентратов.

Статистический анализ полученных цифровых данных выполняли с использованием общепринятых методов и программных средств в Excel, с оценкой критерия достоверности по Стьюденту и уровнем минимально значимой величины $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение. При изучении видового состава травостоя в динамике за месячный период пастбищного использования молодняка зубров на доразращивании установлено, что в загоне № 1 (с повышенной плотностью размещения) из семи выявленных видов доминирующее положение по величине проективного покрытия занимали *Carex hirta* L., *Taraxacum officinale*

Wigg. и *Alchemilla vulgaris* L. Относительная масса растений этих трёх доминирующих видов суммарно по трём луговым выборкам на конец августа составляла 34,3 %, 28,0 % и 24,3 % соответственно. За месяц (к 28.09.2025 г.) эти показатели изменились на -1,6 %, +8,3 % и +15,6 % (табл. 1).

Таблица 1. Динамика доминирующих видов в травостое загона №1, %

Вид растения	Луговая выборка с 1 м ²	
	28.08.2025 г.	28.09.2025 г.
Осока мохнатая (<i>Carex hirta</i>)	34,3±26,3	32,7±18,9
Мать и мачеха (<i>Tussilago</i> L.)	3,3±3,3	8,6±5,0
Лопух большой (<i>Arctium lappa</i>)	1,1±1,1	3,46±2,0
Одуванчик лекарственный (<i>Taraxacum officinale</i>)	28,0±28,0	36,3±21,0
Подорожник большой (<i>Plantago major</i>)	2,3±2,3	9,0±5,2
Манжетка обыкновенная (<i>Alchemilla vulgaris</i>)	24,3±24,3	39,9±23,1
Земляника лесная (<i>Fragaria vesca</i> L.)	6,7±6,7	6,9±6,9

На начало периода наблюдений (28 августа 2025 г.) общая биомасса трав в загоне № 1 варьировала по повторности от 445 до 970 г/м², составляя в среднем 706,7 г/м² на одну выборку, а суммарный запас на учётных площадках достигал 1120 г/м². К концу месячного периода пастбищного использования (28 сентября 2025 г.) отмечено существенное снижение продуктивности растительного покрова: значения биомассы в выборках составили 360, 160 и 160 г/м² соответственно, при средней величине 226,6 г/м² и общей сумме 680 г/м². Таким образом, за период выпаса молодняка зубров суммарная биомасса травостоя сократилась на 67,9 %, а среднее значение урожайности на 480 г/м² ($p \leq 0,01$).

В загоне № 4, с плотностью размещения молодняка на доразращивании 0,9 гол./га, при более богатом разнообразии трав (15 видов) преобладала осока мохнатая (*Carex hirta* L.), пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski), клевер (*Trifolium* sp.), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.), пустырник пятилопастный (*Leonurus quinquelobatus* Gilib.). За 30-дневной период стравливания трав отмечено заметное увеличение доли *Urtica dioica* (на 7,3 % $p \leq 0,001$) и *Hypêricum perforatum* (на 4,5 %), а *Leonurus quinquelobatus*, *Achillea millefolium* L. и *Trifolium* sp. снижение на 4,3 %, 4,2 % и 3,0 % соответственно, что может свидетельствовать о предпочтениях молодняка в потреблении пастбищных трав, а также и изменениях в ценозах в конце вегетационного сезона (табл. 2).

Таблица 2. Динамика доминирующих видов в травостое загона № 4, %

Вид растения	Луговая выборка с 1 м ²	
	28.08.2025 г.	28.09.2025 г.
Осока мохнатая (<i>Carex hirta</i>)	49,3±6,3	35,7±2,3
Мать и мачеха (<i>Tussilago</i> L.)	0,0±0,0	1,0±1,0
Крапива двудомная (<i>Urtica dioica</i>)	2,0±1,2 ^a	9,3±0,7 ^b
Зверобой продырявленный (<i>Hypêricum perforatum</i>)	2,0±1,5	6,5±1,8
Пустырник пятилопастный (<i>Leonurus quinquelobatus</i>)	6,7±6,7	2,3±0,9
Лопух большой (<i>Arctium lappa</i>)	0,0±0,0	2,3±1,2
Одуванчик лекарственный (<i>Taraxacum officinale</i>)	5,3±3,5	5,3±1,9
Лебеда (<i>Atriplex</i>)	0,7±0,7	3,3±1,5
Подорожник большой (<i>Plantago major</i>)	0,0±0,0	2,3±2,3
Манжетка обыкновенная (<i>Alchemilla vulgaris</i>)	3,3±3,3	8,0±0,6
Земляника лесная (<i>Fragaria vesca</i> L.)	2,0±2,0	2,0±1,2
Пырей ползучий (<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski)	12,0±7,9	9,3±1,9
Герань лесная (<i>Geranium sylvaticum</i>)	0,0±0,0 ^c	3,0±0,6 ^d
Клевер (<i>Trifolium</i> sp.)	10,3±2,9	7,3±2,4
Тысячелистник обыкновенный (<i>Achillea millefolium</i> L.)	6,3±6,3	2,2±1,5

^{a, b, c, d} в пределах одной строки значения, обозначенные разными буквами, достоверно различаются при $p \leq 0,01$.

В загоне № 4 на начало периода наблюдений (28 августа 2025 г.) общая биомасса трав варьировала по повторностям от 415 до 650 г/м², составляя в среднем 535,0 г/м² на одну выборку, при суммарном запасе на учётных площадках 1605 г/м². К концу месячного периода пастбищного использования (28 сентября 2025 г.) отмечено увеличение разнообразия урожайности по луговым выборкам с минимальной в 405 г/м² до максимальной 715 г/м² величин (Cv=27,4 %). В результате суммарная биомасса травостоя по загонам достоверно не изменилась, составив 1695 г/м² (+5,6 % к исходному уровню), при среднем значении на выборку 565,0 г/м². Полученные данные свидетельствуют о высокой пространственной неоднородности растительного покрова загона № 4 и компенсаторном характере динамики фитомассы в условиях умеренной пастбищной нагрузки.

В условиях питомника в зависимости от загона отмечена изменчивость по богатству и видовому разнообразию трав, с абсолютным доминированием в пастбищных ценозах осоки мохнатой (*Carex hirta* L.). При этом, в умеренной и интенсивной пастбищной нагрузке структура ценозов сохраняется, что обеспечивает возможности для восстановления кормовой базы в условиях введения ротационных режимов эксплуатации, с периодом отдыха 25...30 дней, или дополнительным скормливанием объемистых кормов [13].

Питательная ценность биомассы пастбищ, в изучаемых загонах, находится в прямой зависимости от видового состава трав. Так, при постановке животных

Таблица 3. Питательность биомассы трав пастбищ в загонах (28 августа)

Показатель	Загон №1 (2,5 гол./га)	Загон №4 (0,9 гол./га)
Воздушно-сухое вещество, г/кг	258,5	418,3
Сырой протеин, г/кг	35,26	57,81
Жир, г/кг	9,85	10,04
Клетчатка, г/кг	41,02	77,55
БЭВ*, г/кг	122,32	197,81
Зола, г/кг	27,07	36,56
Кальций, г/кг	2,45	3,82
Фосфор, г/кг	1,45	2,27
Обменная энергия, МДж/кг	2,3	3,63
ЭКЕ	0,23	0,36
Переваримый протеин, г/кг	29,97	49,14
ОЭ в 1 кг СВ, МДж	8,9	8,7
Сырой протеин в 1 кг СВ, %	13,64	13,82

БЭВ – безазотистые экстрактивные вещества, ЭКЕ – энергетические кормовые единицы, ОЭ – обменная энергия, СВ – сухое вещество (здесь и в табл. 4).

на дорашивание, луговые травы в загоне № 1 по сравнению с загонем № 4 характеризовались более высоким содержанием влаги и соответственно меньшим на 15,9 % содержанием сухих веществ. По концентрации в 1 кг сухих веществ травы из первого загона имели преимущество по обменной энергии на 0,2 МДж, в основном благодаря жиру (на 1,4 %). Биомасса трав с четвертого загона содержала в сухом веществе больше клетчатки (на 2,7 %) и протеина (на 0,18 %), но отличались меньшей влажно-

стью (на 15,9 %), что могло негативно отразиться на суточном ее потреблении (табл.3).

Различия во флористическом составе травостоя обусловили более высокую влажность рациона животных в загоне № 1. В пересчёте на сухое вещество концентрация обменной энергии в этом рационе была выше, чем в загоне № 4, на 0,8 МДж, сырого протеина – на 0,2 %, безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) – на 4,0 % (табл.4).

Таблица 4. Рационы опытных групп кормления молодняка на дорашивании

Показатель	Загон №1 (2,5 гол./га)	Загон №4 (0,9 гол./га)
Комбикорм, кг/гол./сут.	4	2
Трава пастбищ, кг/гол./сут.	22	22
В рационе содержится:		
сухое вещество, кг	9,36	11,04
сырой протеин, г	1339,1	1553,5
сырой жир, г	337,3	281,2
сырая клетчатка, г	1080,0	1794,9
БЭВ, г/кг, в т.ч.	5074,0	5543,3
кальций, г	79,9	97,0
фосфор, г	52,6	60,3
Обменная энергия, МДж	94,0	101,5
ЭКЕ	9,4	10,1
ОЭ в 1 кг СВ, МДж	10,0	9,2
Сырой протеин в 1 кг СВ, %	14,3	14,1
БЭВ в 1 кг СВ, %	54,2	50,2

При постановке и завершении опыта группа молодняка зубров в загоне № 1 (плотность размещения 2,5 гол./га) по сравнению с животными в загоне № 4 (0,9 гол./га) была обеспечена доступной биомассой лугопастбищных угодий в расчёте на одну голову на 32,5 и 55,2 ц меньше соответственно. Повышенная пастбищная нагрузка в загоне № 1 обусловила снижение урожайности надземной фитомассы за месяц наблюдений на 68,0 %, что соответствует среднесуточному темпу снижения 2,2 % (табл. 5). Исходя из такой динамики, а также суточной потребности в зеленой массе (22 кг/гол.) и минимально установленной урожайности на 28 сентября в 16 ц/га, предельный срок использования загона № 1, для размещения 10 молодых зубров на дорашивании, ограничен 40...55 днями, когда остаток биомассы приблизится к критической величине – 2,3 ц/га.

Биохимические показатели сыворотки крови, свидетельствующие о состоянии гемостаза и обеспеченности молодняка зубров питательными веществами кормов остаются мало изученными, ввиду ограниченной численности и сложности отбора проб у особо охраняемого вида. Поэтому в последующем эти данные могут выступать в качестве референсных, в дополнение к используемым в качестве базы сравнения соответствующих параметров молодняка крупного рогатого скота [14]. Сыворотка крови молодняка

Таблица 5. Динамика урожайности трав при разной нагрузке на пастбищные угодья (2025 г.)

Показатель	Загон №1 (2,5 гол./га)			Загон №4 (0,9 гол./га)		
	28 августа	28 сентября	изменение, %	28 августа	28 сентября	изменение, %
Средняя урожайность, ц/га	70,7	22,6	-68	53,5	56,5	5,6
Минимальная урожайность, ц/га	44,5	16	-64	41,5	40,5	-2,4
Максимальная урожайность, ц/га	97	36	-62,9	65	71,5	10
Коэффициент вариации, %	37,2	44,2	18,8	22,0	28,5	29,5
Урожайность биомассы ц/гол.	28,28	9,04	-68,0	60,8	64,2	5,6

Таблица 6. Показатели биохимических исследований сыворотки крови*

Показатель	Референтные значения [14]	Загон №1 (2,5 гол./га)			Загон №4 (0,9 гол./га)		
		телки	быки	по группе	телки	быки	по группе
При постановке на опыт							
Общий белок, г/л	67,4...74,6	72,3±3,0	67,4±2,5	69,6±2,0	71,6±1,7	64,6	69,8±2,1
Альбумин, г/л	30,3...35,5	36,3±0,8	33,8±1,0	34,9±0,7	34,8±1,3	31,6	34±1,2
Глобулин, г/л	30,0...34,8	36±2,3	33,6±2,1	34,7±1,5	36,8±2,0	33	35,9±1,7
Креатинин, ммоль/л	88,4...177	186±13,5	144,8±10,4	163,2±10,6	168,9±9,8	113,3	155±15,5
Магний, ммоль/л	0,75...1,34	1,2±0,0	1,2±0,0	1,2±0,0	1,3±0,0	1,1	1,2±0,05
АЛТ, МЕ/л	11...40	44,2±6,1	31,1±2,5	36,9±3,65	32,4±1,2	31,1	32,1±0,9
АСТ, МЕ/л	78...132	102,6±15,4	83,6±7,9	92,1±8,2	86,5±11,8	87,8	86,8±8,3
Щелочная фосфатаза, МЕ/л	4...88	66,3±8,4	64,2±11,2	65,1±6,8	69,7±10,7	45	63,5±9,7
Холестерин общий, ммоль/л	1,3...4,42	2,0±0,1	2,5±0,3	2,3±0,2	2,6±0,2	2,9	2,6±0,1
Глюкоза, ммоль/л	2,50...4,16	8,2±1,8	7,7±1,5	7,9±1,1	7,1±1,2	7,6	7,2±0,8
Мочевина, ммоль/л	3,3...6,7	6,1±0,1	5,1±0,3	5,6±0,2	5,9±0,4	4,8	5,6±0,4
Кальций, ммоль/л	2,5...3,13	2,4±0,1 ^a	2,5±0,1	2,5±0,1	2,7±0,0 ^b	2,3	2,6±0,1
Фосфор, ммоль/л	1,45...1,94	3,3±0,2 ^c	2,7±0,2	3±0,1 ^e	2,6±0,1 ^d	2,3	2,5±0,1 ^f
Билирубин общий, мкМ/л	0,17...8,55	2,2±0,3	1,4±0,2	1,8±0,2	1,6±0,2	1,7	1,6±0,16
Хлориды, ммоль/л	99,0...109,0	110,3±4,6 ^g	106,3±1,7	108,1±2,2 ⁱ	101,0±0,5 ^h	98,7	100,4±0,69 ^j
При снятии с опыта							
Общий белок, г/л	67,4...74,6	69,7±2,9	67,6±1,6	68,4±1,5	68,3±2,4	68,9	68,4±1,7
Альбумин, г/л	30,3...35,5	35,2±0,8	34±1,2	34,5±0,8	35±2,4	34,9	35±1,7
Глобулин, г/л	30,0...34,8	34,5±2,8	33,4±1,9	33,8±1,5	33,3±3,3	34	33,4±2,3
Креатинин, мкмоль/л	88,4...177	160,7±8,3	142,1±8,6	149,5±6,6	151,4±9,2	119,1	143,3±10,3
Магний, ммоль/л	0,75...1,34	1,2±0,0	1,2±0,2	1,2±0,02	1,2±0,06	1,1	1,2±0,05
АЛТ, МЕ/л	11...40	36,3±6,7	37,4±3,6	36,9±3,2	35,3±0,5	35,2	35,3±0,4
АСТ, МЕ/л	78...132	86,3±9,2	82,7±4,6	84,1±4,3	74,6±3,4	80,2	76±2,8
Щелочная, фосфатаза, МЕ/л	4...88	67,9±12,7	65,3±6,5	66,4±6,0	54,3±4,8	51	53,5±3,5
Холестерин общий, ммоль/л	1,3...4,42	2,5±0,4	2,3±0,2	2,4±0,2	2,1±0,1	2,8	2,3±0,2
Глюкоза, ммоль/л	2,50...4,16	7,1±0,8	5,4±0,3	6,1±0,4	7,3±0,5	7	7,2±0,4
Мочевина, ммоль/л	3,3...6,7	5,4±0,4	5,4±0,2	5,4±0,2	5,5±0,2	5	5,4±0,2
Кальций, ммоль/л	2,5...3,13	2,5±0,1	2,4±0,0	2,5±0,0	2,7±0,0	2,3	2,6±0,1
Фосфор, ммоль/л	1,45...1,94	2,5±0,1	2,5±0,1	2,5±0,1	2,6±0,1	2,4	2,5±0,1
Билирубин общий,	0,17...8,55	1,7±0,2	1,8±0,2	1,7±0,1	1,5±0,2	1,8	1,6±0,1
Хлориды, ммоль/л	99,0...109,0	102,9±2,7	106,6±1,1	105,1±1,3	101,8±1,8	95,1	100,1±2,0

*различия между значениями, обозначенными буквами a и b, c и d, i и j, статистически достоверны при $p \leq 0,01$; e и f, g и h – при $p \leq 0,05$. По всем показателям, за исключением креатинина и фосфора, достоверных различий между самцами и самками внутри групп не установлено.

зубров существенно не отличалась от референса по следующим показателям: общему белку, альбумину, глобулину, креатинину, магнию, АЛТ, АСТ, щелочной фосфатазе, холестерину общему, мочеvine, кальцию, билирубину и хлоридам (табл. 6.). В то же время отмечено кратное превышение по глюкозе (в 1,4...4,16 раза) и фосфору (в 1,7...19,6 раз), что можно рассматривать в качестве биологической особенности вида *Bison bonasus* L.

При постановке на опыт по дорастиванию молодняк зубров экспериментальной и контрольной групп по показателям белкового, углеводного и липидного обмена существенно не различался. В месте с тем, выявлены некоторые различия в показателях, характеризующих минеральный обмен. Так, телочки из пер-

вого загона относительно сравниваемых аналогов по полу из загона № 4 имели преимущество по содержанию в сыворотке крови фосфора на 0,4...0,8 ммоль/л ($p \leq 0,01$) и хлоридов на 7,7...9,3 ммоль/л ($p \leq 0,05$), не уступали по кальцию – на -0,1...-0,3 ммоль/л ($p \leq 0,01$). В первом загоне, телки относительно быков выделялись повышенным содержанием креатинина (на 41,4 мкмоль/л, $p \leq 0,05$) и фосфора (на 0,7 ммоль/л, $p \leq 0,05$), такая же направленность по этим показателям и в четверном загоне.

По окончании опытного периода выращивания молодняк зубров по основным показателям обмена веществ отсутствие существенных различий между группами сохранилось, не было статистически достоверных различий и между телками и быками как

Таблица 7. Интенсивность прироста и живая масса животных опытных групп*

Показатель	Загон №1 (2,5 гол./га)			Загон №4 (0,9 гол./га)		
	телки (n=4)	быки (n=5)	по группе (n=9)	телки (n=3)	быки (n=1)	по группе (n=4)
Возраст, мес.: при постановке на опыт	14,8±0,5	13,9±0,8	14,3±0,5	11,5±0,6	15,5	12,5±1,1
при снятии с опыта	16,6±0,5	15,7±0,8	16,1±0,5	13,2±0,6	17,3	14,2±1,1
Живая масса, кг: при постановке на опыт	216,5±11,8	275,9±11,7	249,5±13,0	219,3±17,3	316,4	243,6±27,2
при снятии опыта, кг	238,8±6,1	311,0±15,2	278,9±15,2	229,3±14,3	342	257,3±30,6
Прирост за опытный период (56 дней), кг	22,3±10,7	35,1±5,7	29,4±5,8	9,8±3,1	25,6	13,7±4,5
Среднесуточный прирост, г	398,2±192,1	626,1±103,1	524,8±103,5 ^a	174,7±55,6	457,1	245,3±80,8 ^b

*различия между значениями, обозначенными буквами a и b, статистически достоверны при $p \leq 0,05$. Значимые различия между самцами и самками выявлены только по суммарному и среднесуточному приросту живой массы.

внутри и между группами, что свидетельствует об относительной стабильности гомеостаза к разным кормовым условиям питомника.

Интенсивность прироста живой массы молодняка зубров изменяется в зависимости от пола и организации пастбищного содержания в осенний период года. Так, в условиях первого и четвертого загонов при совместном содержании быки превосходили телок по среднесуточному и суммарному приросту живой массы на 227,9...282,5 г и 12,8...15,8 кг соответственно (табл. 7). При сравнении зверей опытных групп, выращенных в течение 56 дней, в целом, отмечено преимущество первого относительно четвертого загонов как по суммарному приросту живой массы – на 15,7 кг ($p \leq 0,05$), так среднесуточным приростам на 279,5 г ($p \leq 0,05$). В общем все подконтрольное поголовье животных имело хорошее физическое развитие, типичное для соответствующего половозрастного периода, и были готовы к реинтродукции в естественную среду обитания.

Выводы. Интенсивное доращивание в условиях высокой плотности содержания (2,5 гол./га) и усиленного концентратами (4 кг) рациона, относительно размещения по 0,9 гол./га и скармливания 2 кг концентратов, в пастбищных загонах обеспечило существенно более высокий (на 279,5 г, $p \leq 0,05$) среднесуточный прирост живой массы, поддержание естественного гомеостаза и 100 %-ную сохранность молодняка зуб-

бров. Такой технологический подход к размещению в отдельном загоне отбитого от матерей потомства в течение 56 дней, в сочетании с оценками видового разнообразия, динамики урожайности и питательности пастбищных трав – эффективный инструмент целенаправленного формирования зубров, предназначенных для расселения и реинтродукции в вольные популяции, а также рационального использования естественных кормовых угодий.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ рег. № 124020200029-4 СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

Все процедуры проводились в соответствии с Разделом II, пункта 2) (организация и проведение научных исследований) Положения о Приокско-Террасном государственном природном биосферном заповеднике, утверждённого приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27.04.2024 № 252, а также в соответствии с этическими рекомендациями Федерального научного центра животноводства им. Л. К. Эрнста, протокол № 5 от 17 июля 2023 г. Комиссии по этике экспериментов на животных Федерального научного центра животноводства им. Л. К. Эрнста.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Wendt J. A. F. *Wisent in the Walled Garden: European Bison Alternated Between Refuge and Recovery* // *Global Change Biology*. 2025. Vol. 31. Article e70508. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.70508> (дата обращения: 19.01.2026). doi: 10.1111/gcb.70508.
2. A reduced SNP panel optimised for non-invasive genetic assessment of a genetically impoverished conservation icon, the European bison / G. Wehrenberg, M. Tokarska, B. Cocchiara, et al. // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 1875. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-51495-9/> (дата обращения: 19.01.2026). doi: 10.1038/s41598-024-52509-8.
3. Coexistence, Extinction and Survival – The Evolutionary History of Bison Species in Western Eurasia / B. Llamas, A. L. van Loenen, K. J. Mitchell, et al. // *Global Change Biology*. 2025. Vol. 31. No 8. Article e70354. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.70354/> (дата обращения: 20.01.2026). doi: 10.1111/gcb.70354.
4. Анализ особенностей разведения зубра (*Bison bonasus* L.) и американского бизона (*Bison bison* L.) в условиях Приокско-Террасного биосферного заповедника / О. В. Голубев, Т. П. Сипко, И. В. Гусаров и др. // *Проблемы биологии продуктивных животных*. 2017. № 3. С. 66–76.
5. Козло П. Г., Буневич А. Н. *Зубр в Беларуси* / науч. ред. В. П. Семенченко. 2-е изд., испр. и доп. Минск: Беларуская навука, 2011. 366 с.
6. Establishing viable European bison metapopulations in Central Europe / H. Bluhm, R. Kowalczyk, W. Olech, et al. // *Biological Conservation*. 2025. Vol. 304. Article 111074. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320725001119/> (дата обращения: 22.01.2026). doi: 10.1016/j.biocon.2025.111074.
7. Traditional and emerging visions of European bison (*Bison bonasus*) conservation and management: Implication for the IUCN conservation planning / J. Tusznió, L. S. Gutierrez, M. Strzelecka, et al. // *Environmental Science & Policy*. 2024. Vol. 158. Article 103783. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901124001175/> (дата обращения: 23.01.2026). doi: 10.1016/j.envsci.2024.103783.
8. Гусаров И. В., Остапенко В. А., Сипко Т. П. Свободно размножающиеся популяции зубра как метод сохранения вида в экологическом пространстве России // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2017. Т. 22. № 5. С. 877–880. doi: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-877-880.
9. Kowalczyk R., Kamiński T., Borowik T. Food patch selection by the largest European herbivore // *Mammalian Biology*. 2024. Vol. 104. P. 625–633. (дата обращения: 28.01.2026). doi: 10.1007/s42991-024-00426-2.
10. Гусаров И. В., Остапенко В. А., Новикова Т. В. Факторы, обуславливающие состояние здоровья зубров популяции севера европейской части России // *Известия Международной академии аграрного образования*. 2018. № 39. С. 160–164.
11. Effects of starch content of the concentrate on growth performance, temperament and carcass traits of finishing bison / C. B. Gleason, K. E. Gzyl, R. J. McKiernan, et al. // *Journal of Animal Science*. 2024. Vol. 102. P. 135–136. doi: 10.1093/jas/skae234.162.
12. Effects of supplementing crude protein to feedlot bison heifers using canola meal or wheat-based distillers' grains with solubles on feed intake, performance and carcass traits / de L. J. Alcivar, J. J. McKinnon, M. S. Feist, et al. // *Translational Animal Science*. 2025. Vol. 9. Article txaf158. <https://academic.oup.com/tas/article/doi/10.1093/tas/txaf158/8362881/> (дата обращения: 28.01.2026). doi: 10.1093/tas/txaf158.
13. Заблоцкий М. А. Загонное содержание, кормление и транспортировка зубров (инструкция) / Гл. упр. охотничьего хозяйства и заповедников при Совете Министров РСФСР. Приокско-Террасный гос. заповедник. Москва: Центр зубровый питомник, 1957. 113 с.
14. Мейер Д., Харви Д. *Ветеринарная лабораторная медицина: интерпретация и диагностика* / под ред. Ю. М. Кеда; пер. с англ. Л. А. Певницкого. Москва: Софион, 2007. 458 с.

References.

1. Wendt JAF. *Wisent in the Walled Garden: European Bison Alternated Between Refuge and Recovery*. *Glob Change Biol [Internet]*. 2025 [cited 2026 Jan 19];31:e70508. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.70508>. doi: 10.1111/gcb.70508.
2. Wehrenberg G, Tokarska M, Cocchiararo B, et al. A reduced SNP panel optimised for non-invasive genetic assessment of a genetically impoverished conservation icon, the European bison. *Sci Rep [Internet]*. 2024 [cited 2026 Jan 19];14:1875. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-51495-9/>. doi: 10.1038/s41598-024-52509-8.
3. Llamas B, van Loenen AL, Mitchell KJ, et al. Coexistence, Extinction and Survival – The Evolutionary History of Bison Species in Western Eurasia. *Glob Change Biol [Internet]*. 2025 [cited 2026 Jan 20];31(8):e70354. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.70354/>. doi: 10.1111/gcb.70354.
4. Golubev OV, Sipko TP, Gusarov IV, et al. [Analysis of breeding characteristics of European bison (*Bison bonasus* L.) and American bison (*Bison bison* L.) in the conditions of the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve]. *Probl Biol Prod Zhivotn*. 2017;(3):66-76. Russian.
5. Kozlo PG, Bunevich AN. [European bison in Belarus]. *Semenchenko VP, editor. 2nd ed., rev. and enl. Minsk: Belaruskaya Navuka*; 2011. 366 p. Russian.
6. Bluhm H, Kowalczyk R, Olech W, et al. Establishing viable European bison metapopulations in Central Europe. *Biol Conserv [Internet]*. 2025 [cited 2026 Jan 22];304:111074. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320725001119/>. doi: 10.1016/j.biocon.2025.111074.
7. Tusznió J, Gutierrez LS, Strzelecka M, et al. Traditional and emerging visions of European bison (*Bison bonasus*) conservation and management: Implication for the IUCN conservation planning. *Environ Sci Policy [Internet]*. 2024 [cited 2026 Jan 23];158:103783. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901124001175/>. doi: 10.1016/j.envsci.2024.103783.
8. Gusarov IV, Ostapenko VA, Sipko TP. [Freely breeding populations of European bison as a method of species conservation in the ecological space of Russia]. *Vestn Tambov Univ Ser Estestv Tekh Nauki*. 2017;22(5):877-80. doi: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-877-880. Russian.
9. Kowalczyk R, Kamiński T, Borowik T. Food patch selection by the largest European herbivore. *Mamm Biol [Internet]*. 2024 [cited 2026 Jan 28];104:625-33. doi: 10.1007/s42991-024-00426-2.
10. Gusarov IV, Ostapenko VA, Novikova TV. [Factors determining the health status of European bison populations in the north of the European part of Russia]. *Izv Mezhdunar Akad Agrar Obraz*. 2018;(39):160-4. Russian.
11. Gleason CB, Gzyl KE, McKiernan RJ, et al. Effects of starch content of the concentrate on growth performance, temperament and carcass traits of finishing bison. *J Anim Sci*. 2024;102(Suppl 3):135-6. doi: 10.1093/jas/skae234.162.
12. Alcivar de LJ, McKinnon JJ, Feist MS, et al. Effects of supplementing crude protein to feedlot bison heifers using canola meal or wheat-based distillers' grains with solubles on feed intake, performance and carcass traits. *Transl Anim Sci [Internet]*. 2025 [cited 2026 Jan 28];9:txaf158. Available from: <https://academic.oup.com/tas/article/doi/10.1093/tas/txaf158/8362881/>. doi: 10.1093/tas/txaf158.
13. Zablotskii MA. [Enclosure housing, feeding and transportation of European bison (instructions)]. *Moscow: Tsentral'nyi zubrovyi pitomnik*; 1957. 113 p. Russian.
14. Meyer D, Harvey D. [Veterinary Laboratory Medicine: Interpretation and Diagnosis]. *Ked YuM, editor; Pevnitskii LA, translator. Moscow: Sofion*; 2007. 458 p. Russian.

Поступила в редакцию 23.03.2026 После доработки 10.04.2026 Принята к публикации 29.04.2026

Требования к оформлению статей в журнале «Достижения науки и техники АПК»

В статье должно быть кратко изложено состояние дел по изучаемой проблеме со ссылками на публикации (желательно не менее трех ссылок). Затем указаны цели, задачи, условия и методы исследований. Подробно представлены результаты экспериментов и их анализ. Сделаны выводы и даны предложения производству. В статье следует по возможности выделять следующие блоки: введение; цель и задачи исследований; условия, материалы и методы исследований; результаты исследований; выводы.

Вместе со статьей должны быть представлены перевод названия на английский язык; аннотация (200-250 слов) на русском и английском языках; ключевые слова на русском и английском языках; полные почтовые адреса всех учреждений, в которых работают авторы, на русском и английском языке; ученые степени и должности авторов на русском и английском языке код УДК; библиографический список.

В тексте ссылка на источник отмечается соответствующей цифрой в квадратных скобках в порядке цитирования. В списке литературы приводятся только те источники, на которые есть ссылка в тексте. Использование цитат без указания источника информации запрещается.

Материал для подачи в журнал набирается в текстовом редакторе Word версия не ниже 97 файл с расширением *.rtf.

Объем публикации 12-16 стр. машинописного текста набранного шрифтом Times New Roman, размер кегля 14 с полуторным интервалом. На 2,5 страницы текста допускается не более 1 рисунка или таблицы.

Статьи необходимо направлять с сопроводительным письмом с указанием сведений об авторах (фамилия, имя, отчество – полностью, ученая степень, место работы и занимаемая должность) на русском и английском языке, контактных телефонов и адреса электронной почты для обратной связи.

На публикацию представляемых материалов необходимо письменное разрешение и рекомендация руководства организации, на средства которой проводились исследования. Его вместе с одним экземпляром рукописи, подписанным авторами, и статьей в электронном виде нужно отправлять по адресу: 101000, г. Москва, Моспочтамт, а/я 166, ООО «Редакция журнала «Достижения науки и техники АПК». Для ускорения выхода в свет материалы в электронном виде можно направлять по адресу: agroapk@mail.ru.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Несоответствие статьи по одному из перечисленных пунктов может служить основанием для отказа в публикации.

Все рукописи, содержащие сведения о результатах научных исследований, рецензируются, по итогам рецензирования принимается решение о целесообразности опубликования материалов.

Оценка качества говядины, полученной от молодняка разных сезонов рождения и убоя, по комплексу физико-химических и питательных показателей

А. Н. ФРОЛОВ, О. А. ЗАВЬЯЛОВ, А. С. КОПЫЛОВ

Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, ул. 9 Января, 29, Оренбург, 460000, Российская Федерация

Резюме. Исследование проводили с целью оценки влияния сезона рождения и убоя бычков черно-пестрой породы на мясную продуктивность и биохимический статус мышечной ткани (аминокислотный, жирнокислотный, элементный состав) для научного обоснования сезонно-дифференцированного нормирования кормления. Эксперимент выполнен в Оренбургской области на трёх группах бычков по 20 голов в каждой: I – осеннего рождения (убой в марте), II – зимнего рождения (убой в июле), III – весеннего рождения (убой в сентябре). Рационы круглогодично одинаковы для каждого возраста. Убой в 18 мес. Живая масса при убое: I группа – 537,3±5,43 кг, II – 496,8±5,72 кг и III – 505,4±5,37 кг. В длиннейшей мышце спины определяли химический состав, содержание аминокислот (ГОСТ 34132-2017), жирных кислот (ГОСТ Р 55483-2013) и 20 минеральных элементов (ICP-MS). У бычков I группы отмечали самое высокое содержание сухого вещества (24,21 %), жира (1,84 %), энергетическую ценность (4,39 МДж/кг), белково-качественный показатель (7,2). Длиннейшая мышца спины животных II группы отличалась пониженным количеством лизина (на 0,98 %), метионина (на 0,23 %), валина (на 0,62 %), аргинина (на 0,90 %), гистидина (на 0,27 %), олеиновой, линолевой, линоленовой и арахидоновой кислот, при повышенном содержании аланина, серина, глицина, пролина и пальмитиновой кислоты. Наиболее выраженные нарушения минерального обмена выявлены во II группе: снижение количества калия на 13,3 %, кальция – на 20,1 %, магния – на 20,2 %, цинка – на 20,2 %, селена – на 25,0 % при увеличении накопления свинца (в 1,98 раза) и мышьяка (в 1,68 раз). Зимнее и весеннее рождение сопровождается снижением липогенеза, нарушением аминокислотного и минерального обменов. Для такого молодняка необходима сезонно-адаптированная коррекция рационов с добавлением Zn, Se, I, Ca, K, Mg.

Ключевые слова: бычки, черно-пестрая порода, сезон рождения, говядина, качество мяса, длиннейшая мышца спины, химический состав, аминокислотный профиль, жирнокислотный состав, минеральный состав.

Сведения об авторах: А. Н. Фролов, доктор биологических наук, зав. отделом (e-mail: forleh@mail.ru); О. А. Завьялов, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник (e-mail: oleg-zavyalov83@mail.ru); А. С. Копылов, аспирант (e-mail: kas778@mail.ru).

Для цитирования: Фролов А. Н., Завьялов О. А., Копылов А. С. Оценка качества говядины, полученной от молодняка разных сезонов рождения и убоя, по комплексу физико-химических и питательных показателей // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. № 4. С. 62–8. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_62.

Evaluation of the quality of beef obtained from young animals of different seasons of birth and slaughter based on a set of physical, chemical and nutritional indicators

A. N. Frolov, O. A. Zavyalov, A. S. Kopylov

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, ul. 9 Yanvarya, 29, Orenburg, 460000, Russian Federation

Abstract. The study was conducted to evaluate the influence of the season of birth and slaughter of Black-and-White bulls on meat productivity and the biochemical status of muscle tissue (amino acid, fatty acid, and elemental composition) to scientifically substantiate seasonally differentiated feeding standards. The experiment was conducted in the Orenburg region on three groups of bulls, 20 heads each: Group I – autumn-born (slaughtered in March), Group II – winter-born (slaughtered in July), and Group III – spring-born (slaughtered in September). The rations were the same for each age year-round. Slaughter was at 18 months. Live weight at slaughter: Group I – 537.3±5.43 kg, Group II – 496.8±5.72 kg, and Group III – 505.4±5.37 kg. The chemical composition, amino acid content (GOST 34132-2017), fatty acid content (GOST R 55483-2013), and 20 mineral elements (ICP-MS) were determined in the longissimus dorsi muscle. Group I bulls had the highest dry matter content (24.21%), fat (1.84%), energy value (4.39 MJ/kg), and protein quality index (7.2). The longissimus dorsi muscle of the animals of group II was characterised by a reduced amount of lysine (by 0.98%), methionine (by 0.23%), valine (by 0.62%), arginine (by 0.90%), histidine (by 0.27%), oleic, linoleic, linolenic and arachidonic acids, with an increased content of alanine, serine, glycine, proline and palmitic acid. The most pronounced disturbances in mineral metabolism were revealed in group II: a decrease in the amount of potassium by 13.3%, calcium – by 20.1%, magnesium – by 20.2%, zinc – by 20.2%, selenium – by 25.0% with an increase in the accumulation of lead (by 1.98 times) and arsenic (by 1.68 times). Winter and spring births are associated with decreased lipogenesis and disrupted amino acid and mineral metabolism. These young animals require seasonally adapted dietary adjustments with the addition of Zn, Se, I, Ca, K, and Mg.

Keywords: bulls; Black Pied breed; birth season; beef; meat quality; longissimus dorsi muscle; chemical composition; amino acid profile; fatty acid composition; mineral composition.

Author Details: A. N. Frolov, D. Sc. (Biol.), head of division (e-mail: forleh@mail.ru); O. A. Zavyalov, D. Sc. (Biol.), leading research fellow (e-mail: oleg-zavyalov83@mail.ru); A. S. Kopylov, postgraduate student (e-mail: kas778@mail.ru).

For citation: Frolov AN, Zavyalov OA, Kopylov AS. [Evaluation of the quality of beef obtained from young animals of different seasons of birth and slaughter based on a set of physical, chemical and nutritional indicators]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(4):62–8. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_62.

Глобальные климатические изменения, характеризующиеся увеличением частоты и интенсивности экстремальных температурных явлений, формируют новые вызовы для животноводства [1, 2]. В этой связи традиционный взгляд на температурный стресс

как на краткосрочное состояние, ограниченное периодом непосредственного воздействия, уступает место более сложной концепции. Согласно современным представлениям, стресс-факторы в критические периоды онтогенеза способны оказывать долгосроч-

ное, или программирующее, влияние на метаболические процессы, предопределяя интенсивность роста и качественные характеристики продукции на последующих этапах развития [3].

Особый научный и практический интерес представляет вопрос о том, каким образом сезон рождения, определяющий температурный режим на ранних этапах постнатального развития, во взаимодействии с условиями предубойного периода может предопределять последующие качественные характеристики мясной продукции. В доступной литературе имеются сведения о влиянии сезона года на откормочные качества и убойные показатели скота [4, 5]. Вместе с тем комплексные исследования, оценивающие глубинные метаболические последствия сезонного стресса – на уровне аминокислотного, жирнокислотного и особенно элементного профиля мышечной ткани отсутствуют [6]. Остается невыясненным, являются ли изменения в качестве мяса следствием только предубойного периода (непосредственного воздействия высоких или низких температур перед убоем) или же их детерминируют условия выращивания с первых дней жизни животного, а их конечное проявление модулирует сезон убоя.

Уникальные природно-климатические условия Оренбургской области, расположенной в зоне резко-континентального климата с амплитудой температур от -35°C зимой до $+40^{\circ}\text{C}$ летом, представляют собой естественную модель для изучения долгосрочных и сочетанных эффектов температурного стресса. Контрастность сезонов позволяет сформировать группы животных, различающихся как по условиям раннего онтогенеза (сезон рождения), так и по температурному режиму в завершающий период откорма и в момент убоя, при сохранении единой технологии кормления и содержания на всех этапах выращивания.

Цель исследования – оценка влияния сезона рождения и убоя бычков черно-пестрой породы на мясную продуктивность и биохимический статус мышечной ткани (аминокислотный, жирнокислотный, элементный состав) для научного обоснования сезонно-дифференцированного нормирования кормления.

Условия, материалы и методы. Экспериментальная часть работы выполнена на базе ООО «Красногорское» Оренбургской области в условиях резко-континентального климата, позволяющего моделировать влияние экстремальных сезонных температур на организм животных.

Для оценки влияния сезона рождения на мясную продуктивность и качественные характеристики говядины были сформированы три группы бычков черно-пестрой породы (всего 60 голов), которых забивали в 18-месячном возрасте: I группа – осеннего сезона рождения (убой в марте, живая масса – $537,3 \pm 5,43$); II группа – зимнего сезона рождения (убой в июле, живая масса – $496,8 \pm 5,72$); III группа – весеннего сезона рождения (убой в сентябре, живая масса – $505,4 \pm 5,37$).

Кормление животных всех групп осуществляли по единой схеме, соответствующей детализированным нормам для данной половозрастной группы. Рационы в течение года были одинаковыми для каждого периода выращивания и включали сено, сенаж, силос кукурузный, а также концентраты (ячмень, пшеница, зерно кукурузы, овёс, жмых подсолнечный, патока кормовая, премикс, поваренная соль). До 6-месячного возраста дополнительно использовали заменитель цельного молока (ЗЦМ). В зависимости от периода выращивания (молочный, дорастивание, заключи-

тельный откорм) изменяли структуру рациона в сторону увеличения доли концентрированных кормов. Поение осуществляли водой из артезианской скважины, химический состав которой оставался стабильным в течение года.

Для оценки влияния сезонных факторов на элементный статус животных был проведён анализ проб основных кормов и питьевой воды в каждый сезон убоя (март, июль, сентябрь). Отбор проб осуществляли в день убоя животных соответствующих групп с последующей оценкой содержания эссенциальных и токсичных элементов.

Убой бычков в 18-месячном возрасте осуществляли на мясоперерабатывающем предприятии ООО «Оренбив» (Оренбургская область) с последующей оценкой туш по категории, классу и подклассу в соответствии с ГОСТ 34120-2017.

Для лабораторных исследований от каждой левой полутуши через 24 ч охлаждения ($2...4^{\circ}\text{C}$) отбирали среднюю пробу мяса-фарша массой 400 г и образец длиннейшей мышцы спины (*longissimus dorsi*) массой 200 г на уровне 9...11-го ребра. Биологическая повторяемость составила 20 голов в каждой группе ($n=20$). Аналитическая повторяемость при выполнении лабораторных анализов – трёхкратная. Результаты представлены как среднее арифметическое значение по группе.

В длиннейшей мышце спины определяли активную кислотность (pH), влагоемкость, аминокислотный состав (аргинин, лизин, тирозин, фенилаланин, гистидин, лейцин+изолейцин, метионин, валин, пролин, треонин, серин, аланин, глицин, оксипролин, триптофан) по ГОСТ 34132-2017, жирнокислотный состав (пальмитиновая, стеариновая, миристиновая, миристиолеиновая, пальмитолеиновая, олеиновая, линолевая, линоленовая, арахидоновая кислоты) по ГОСТ Р 55483-2013, а также содержание 20 химических элементов (Ca, K, Mg, Na, P, Fe, Zn, Co, Cr, Cu, I, Mn, Se, B, Ni, As, Al, Cd, Pb, Sr).

Исследования выполнены с использованием приборной базы Центра коллективного пользования ФНЦ БСТ РАН (<http://цкп-бст.рф>), включающей масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой Agilent 7900 с системой ВЭЖХ 1260 Infinity II BIO-Inert (Agilent Technologies, США), атомно-абсорбционный спектрометр КВАНТ-2АТ (КОРТЭК, Россия), газовый хроматограф Кристалл-4000 Люкс (Хроматэк, Россия), систему капиллярного электрофореза «Капель-105» (Люмэкс-Маркетинг, Россия), экстрактор Сокслета (Полтавский завод медицинского стекла, Украина), гомогенизатор TissueLyser LT (Qiagen N.V., Германия) и центрифугу MiniSpin (Eppendorf, Германия).

Цифровой материал обработан методами вариационной статистики с использованием t-критерия Стьюдента; различия считали достоверными при уровне значимости $p \leq 0,05$, данные представлены в виде средних арифметических значений со стандартной ошибкой среднего ($M \pm SEM$).

Результаты и обсуждение. По результатам анализов химического состава длиннейшей мышцы спины установили существенное влияние сезонного фактора на качественные характеристики мяса. Наибольшее содержание сухого вещества определено в длиннейшей мышце бычков I группы (24,21 %), что достоверно превышало на 0,84 % показатель II группы (23,37 %; $p \leq 0,01$). Наиболее выраженные межгрупповые различия установлены по содержанию жира. В мясе животных I группы величина этого по-

казателя составляла 1,84 %, что выше на 0,58 %, чем во II группе ($p \leq 0,001$), и на 0,28 % по сравнению с III ($p \leq 0,05$). Энергетическая ценность мяса животных I группы была равна 4,39 МДж/кг, что на 6,2 % выше, чем во II, и на 3,0 % по сравнению с III группой (табл. 1).

Таблица 1. **Химический состав и энергетическая ценность длиннейшей мышцы спины бычков черно-пестрой породы в зависимости от сезона рождения**

Показатель	Группа		
	I	II	III
Сухое вещество, %	24,21±0,19	23,37±0,20**	23,84±0,19
Протеин, %	21,38±0,16	21,12±0,19	21,28±0,17
Жир, %	1,84±0,08	1,26±0,09***	1,56±0,10*
Зола, %	0,99±0,05	0,99±0,06	1,00±0,05
Энергетическая ценность 1 кг мякоти, МДж	4,39±0,12	4,12±0,11	4,26±0,08
Триптофан, мг/ %	389,37±7,68	361,12±7,16*	372,34±7,78
Оксипролин, мг/ %	54,24±0,41	55,22±0,59	54,44±0,48
pH	5,62±0,10	5,88±0,10	5,68±0,09
Влагоёмкость, %	55,84±0,64	55,66±0,48	55,72±0,43
БКП	7,2±0,08	6,5±0,13***	6,8±0,11*

*различия со I группой достоверны при $p \leq 0,05$; **при $p \leq 0,01$, ***при $p \leq 0,001$ (здесь и в табл. 2, 3 и 4).

Важным показателем биологической полноценности белка считают содержание триптофана, которое в мясе бычков I группы превышало на 7,82 % значение II группы ($p \leq 0,05$). Белково-качественный показатель (БКП) – интегральный показатель качества мяса, наибольшее значение которого зарегистрировано в I группе – выше на 10,77 % по сравнению со II ($p \leq 0,001$) и на 5,88 % по сравнению с III ($p \leq 0,05$).

Полученные данные позволяют связать установленные ранее различия в росте и морфологии туш с глубокими изменениями в метаболизме мышечной ткани. Ключевым биохимическим маркером воздействия сезонного стресса считают снижение содержания внутримышечного жира в мышцах бычков II и III групп. Это прямое следствие нарушения липогенеза, которое можно объяснить двумя взаимосвязанными причинами. Во-первых, энергетический дефицит в раннем постнатальном периоде у животных зимнего и весеннего сезонов рождения мог привести к долгосрочному подавлению активности ключевых ферментов синтеза жирных кислот [7, 8].

Во-вторых, тепловой стресс в предубойный период для этих групп дополнительно стимулировал катаболические процессы, направленные на мобилизацию липидов как источника энергии для терморегуляции [9]. Существенное снижение белково-качественного показателя (БКП) во II и III группах на 9,7 и 5,6 % соответственно указывает на ухудшение аминокислотного баланса и биологической ценности мышечного белка. Это подтверждает достоверное снижение концентрации незаменимой аминокислоты триптофана, – лимитирующий фактор для белкового синтеза. Такое нарушение может быть следствием хронического стресс-индуцированного катаболизма белков, а также изменений в микрофлоре рубца, влияющей на синтез и усвоение аминокислот [10]. Повышенное значение pH в II группе (5,88) по сравнению с контрольной группой (5,62) свидетельствует о нарушении постмортального

гликолиза. Это может быть связано с истощением мышечных запасов гликогена у животных, подвергшихся воздействию теплового стресса перед убоем [11]. Таким образом, сезонный фактор, опосредованный температурным стрессом в критические периоды онтогенеза, оказывает программирующее воздействие на метаболические пути в мышечной ткани [12]. Это проявляется в устойчивом снижении липогенеза, нарушении аминокислотного обмена и изменении постмортальных биохимических процессов. Полученные результаты имеют важное практическое значение, так как указывают на необходимость не только компенсации ростового отставания, но и целенаправленной коррекции метаболизма в предубойный период для получения мяса со стабильными качественными, технологическими и питательными характеристиками независимо от сезона рождения и убоя животных.

Аминокислотный состав мышечной ткани – интегральный показатель, отражающий не только питательную ценность мяса, но и глубину метаболических процессов, протекавших в организме животного в течение всего периода роста и, особенно, в критические периоды развития [13]. Учитывая установленное ранее влияние сезона рождения и убоя на рост, морфологию и химический состав туш, анализ аминокислотного профиля приобретает ключевое значение. Он позволяет оценить, как температурный стресс в разные периоды онтогенеза влияет на синтез и катаболизм мышечного белка, а, следовательно, и на биологическую полноценность конечного продукта. Полученные данные демонстрируют четкую дифференциацию аминокислотного профиля в зависимости от сезона рождения [14]. У бычков осеннего сезона (I группа) отмечено наибольшее содержание незаменимых аминокислот. Напротив, у животных, рожденных зимой и весной (II и III группы), зафиксированы статистически значимые изменения. Количественная оценка в процентах относительно I группы показывает снижение незаменимых аминокислот в II группе: лизина на 0,98 %, метионина – на 0,23 %, валина – на 0,62 %, аргинина – на 0,90 %, гистидина – на 0,27 %, тирозина – на 0,32 %, комплекс лейцин+изолейцин – на 0,39 %, при повышении заменимых: аланина – на 0,65 %, серина – на 0,27 %, глицина – на 0,49 %, пролина – на 0,31 %. В III группе (весеннего рождения) характер изменений иной: содержание валина увеличилось на 0,39 % (с 4,33 % до 4,72 %; $p \leq 0,001$) по сравнению с I группой, тогда как остальные аминокислоты занимали промежуточное положение между I и II группами, демонстрируя сходие, но менее выраженные тенденции к снижению (табл. 2).

Выявленная динамика указывает на системную перестройку белкового обмена под влиянием сезонного стресса. Снижение ключевых незаменимых аминокислот, особенно лимитирующих (лизин, метионин), прямо свидетельствует об угнетении анаболизма и подтверждает ранее установленное падение биологической ценности белка (БКП). Дефицит аргинина может быть следствием его повышенной утилизации для энергообеспечения и стресс-ответа в условиях холодового (для II группы) и комбинированного стресса [15]. Одновременное увеличение доли заменимых аминокислот (аланин, серин, глицин) является маркером активации компенсаторных механизмов. Рост уровня аланина и серина характерен для интенсификации глюконеогенеза – процесса синтеза глюкозы из неуглеводных предшественников в условиях энергодифицита [16]. Повышение концентрации глицина и

Таблица 2. Аминокислотный состав длиннейшей мышцы спины бычков черно-пестрой породы, в зависимости от сезона рождения, %

Аминокислота	Группа		
	I	II	III
Аргинин	7,34±0,22	6,44±0,19**	6,74±0,17*
Лизин	9,61±0,19	8,63±0,16***	9,35±0,11
Тирозин	3,54±0,05	3,22±0,05***	3,29±0,05**
Фенилаланин	4,12±0,05	4,00±0,04	4,00±0,04
Гистидин	3,27±0,04	3,00±0,03***	3,06±0,04***
Лейцин+изолейцин	9,59±0,08	9,20±0,09**	9,24±0,07**
Метионин	2,22±0,05	1,99±0,05*	2,09±0,05
Валин	4,33±0,06	3,71±0,06***	4,72±0,05***
Пролин	5,21±0,07	5,52±0,07**	5,40±0,06*
Треонин	5,43±0,06	5,38±0,05	5,32±0,06
Серин	4,16±0,05	4,43±0,06**	4,19±0,04
Аланин	6,13±0,10	6,78±0,11***	6,47±0,09*
Глицин	3,96±0,06	4,45±0,08**	4,21±0,07*

пролина может отражать усиление синтеза соединительнотканых белков и активацию антиоксидантных систем (глицин – предшественник глутатиона) как ответ на окислительный стресс. Таким образом, сезон рождения, опосредованный стрессорным воздействием, приводит не только к количественному снижению мышечной массы, но и к качественному ухудшению её аминокислотного состава. Это обосновывает необходимость разработки точных рационов, сбалансированных по аминокислотному профилю, специально для молодняка, выращиваемого в неблагоприятные сезоны, с целью минимизации негативных последствий стресса на качество мясной продукции.

Жирнокислотный профиль внутримышечного жира считают ключевым показателем, отражающим состояние липидного метаболизма и определяющим пищевую ценность и технологические свойства говядины [17]. Учитывая установленное влияние сезона рождения и убоя на общее содержание жира, детальный анализ состава жирных кислот позволяет выявить специфические метаболические сдвиги, индуцированные температурным стрессом. Данные демонстрируют статистически значимые изменения в профиле жирных кислот у бычков II и III групп по сравнению с I (табл. 3). Наиболее выраженные различия наблюдаются в II группе (зимний сезон рождения, убой в июне-июле). Содержание пальмитиновой кислоты (C16:0) в

II группе составило 26,31 %, что на 4,26 % выше, чем в группе I ($p \leq 0,001$). Одновременно доля стеариновой кислоты (C18:0) снизилась на 1,62 % (с 19,64 % до 18,02 %; $p \leq 0,001$). Количество к мононенасыщенной олеиновой кислоты (C18:1) во II и III группах было ниже на 1,57 % и 1,41 % соответственно относительно I ($p \leq 0,05$). Среди полиненасыщенных кислот во II группе зафиксировано снижение доли линолевой (C18:2) на 0,35 % ($p \leq 0,001$) и арахидоновой (C20:4) – на 0,15 % ($p \leq 0,05$) и линоленовой (C18:3) – на 0,22 % ($p \leq 0,05$).

Полученные результаты указывают на глубокое нарушение липидного обмена под влиянием сезонного стресса, проявляющееся в качественной перестройке состава жира. Резкое увеличение доли пальмитиновой кислоты на фоне снижения стеариновой и олеиновой считают маркером подавления активности фермента $\Delta 9$ -десатуразы, чья функция ингибируется при тепловом стрессе. Это приводит к накоплению тугоплавких насыщенных жиров, что может негативно влиять на нежность мяса. Снижение доли незаменимых полиненасыщенных жирных кислот (линолевой, линоленовой) связано с уменьшением потребления корма и повышенным расходом этих соединений на синтез медиаторов стрессового ответа (эйкозаноидов), что ухудшает диетологическую ценность продукции [18]. Наиболее негативные изменения во II группе подтверждают, что тепловой стресс в предубойный период выступает мощным фактором, напрямую модифицирующим конечный жирнокислотный профиль мяса. Таким образом, для получения говядины со стабильным и оптимальным составом жирных кислот необходима разработка сезонно-адаптированных стратегий кормления в заключительный период откорма, направленных на поддержание активности десатураз и обеспечение адекватного поступления незаменимых жирных кислот.

Результаты исследований свидетельствуют о существенном влиянии сезонного фактора на минеральный обмен у бычков. Установлено, что сезон рождения детерминирует достоверные изменения элементного состава мышечной ткани, проявляющиеся в нарушении баланса макро- и микроэлементов. Наиболее выраженные нарушения отмечены в кальций-калийном гомеостазе. Содержание кальция в мышцах бычков II и III групп было снижено на 20,1 % ($p \leq 0,001$) и 14,5 % ($p \leq 0,01$) соответственно по сравнению с группой I. По сравнению с I группой, концентрация калия во II группе была ниже на 13,3% ($p \leq 0,001$), а в III группе – на 8,5% ($p \leq 0,05$). Содержание магния было минимальным во II группе, что на 20,2 % ниже, чем в I ($p \leq 0,001$). Натрий-фосфорный баланс также претерпевал изменения: содержание натрия было максимальным в III группе ($3241 \pm 32,8$ мг/кг), превышая показатель I группы на 23,0 % ($p \leq 0,001$), а концентрация фосфора прогрессивно увеличивалась от I к III группе, достигая максимального значения 8546 мг/кг (табл. 4).

Таблица 3. Жирнокислотный состав длиннейшей мышцы спины бычков черно-пестрой породы, в зависимости от сезона рождения, % к сумме жирных кислот

Кислота	Группа		
	I	II	III
Насыщенные жирные кислоты (НЖК)			
Пальмитиновая (C _{16:0})	22,054±0,204	26,305±0,207***	24,605±0,191***
Стеариновая (C _{18:0})	19,639±0,282	18,018±0,300***	18,896±0,275
Миристиновая (C _{14:0})	2,585±0,087	2,861±0,090*	2,441±0,072
Мононенасыщенные жирные кислоты (МНЖК)			
Миристолеиновая (C _{14:1})	4,001±0,186	3,688±0,188	4,159±0,189
Пальмитолеиновая (C _{16:1})	3,461±0,077	3,162±0,070**	3,279±0,057
Олеиновая (C _{18:1})	41,564±0,401	39,991±0,437*	40,154±0,414*
Полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК)			
Линолевая (C _{18:2})	4,332±0,060	3,985±0,067***	4,129±0,050*
Линоленовая (C _{18:3})	0,725±0,045	0,502±0,067*	0,707±0,047
Арахидоновая (C _{20:4})	1,643±0,044	1,491±0,050*	1,633±0,036

Таблица 4. Содержание химических элементов в длиннейшей мышце спины бычков в зависимости от сезона рождения

Показатель	Группа		
	I	II	III
Макроэлементы			
Ca	359±10	287±12***	307±14**
K	15763±361	13665±422***	14419±321*
Mg	1074±26	857±28**	1043±21
Na	2634±25	2478±38*	3241±33***
P	7591±351	7860±539	8546±314**
Эссенциальные микроэлементы			
Co	0,026±0,003	0,021±0,004	0,023±0,005
Cr	2,08±0,29	1,99±0,54	2,19±0,35
Cu	2,92±0,03	2,79±0,04*	2,86±0,04
Fe	219,6±20,0	191,8±30,4	192,6±18,0
I	0,377±0,024	0,285±0,033*	0,357±0,033
Mn	0,934±0,125	0,956±0,260	0,951±0,250
Se	0,867±0,053	0,650±0,059*	0,877±0,045
Zn	237,2±2,4	189,2±4,2***	226,7±7,3
Условно-эссенциальные микроэлементы			
B	1,52±0,07	1,58±0,10	1,56±0,06
Ni	4,13±0,22	4,66±0,20	3,13±0,38
As	0,019±0,003	0,032±0,004*	0,039±0,007*
Токсичные микроэлементы			
Al	27,6±2,97	32,5±4,07	27,9±7,60
Cd	0,411±0,06	0,515±0,07	0,468±0,09
Pb	0,043±0,01	0,085±0,01*	0,074±0,01*
Sr	0,003±0,000	0,003±0,000	0,004±0,000

ка в I группе превышала показатель II на 20,2 % ($p \leq 0,001$). Содержание селена и йода было наименьшим во II группе (0,650 и 0,285 мг/кг), что на 25, 0 и 24,4 % ниже, чем в I ($p \leq 0,05$) соответственно.

Выявлено накопление токсичных элементов в мышечной ткани при неблагоприятных условиях выращивания. Содержание свинца во II группе в 1,98 раза превышало показатель группы I. Концентрация мышьяка прогрессивно увеличивалась от I к III группе, достигая максимального значения 0,039 мг/кг ($p \leq 0,05$).

Накопление токсичных элементов (свинца и мышьяка) в мышечной ткани бычков II и III групп, по-видимому, обусловлено сезонными метаболическими перестройками. В зимний период значительная часть эссенциальных микроэлементов (Zn, Se, I, Ca, Mg) расходуется на поддержание теплового гомеостаза. Возникающий при этом дефицит эссенциальных элементов создаёт условия для пассивного замещения их токсичными аналогами (например, Pb вместо Ca, As вместо Se) в металлозависимых ферментативных системах, а также усиливает абсорбцию токсикантов из желудочно-кишечного тракта за счёт конкурентного транспорта. В летний период (убой II группы) животные, подвергающиеся тепловому стрессу, ограничивают потребление корма (снижение энергетического и минерального балансов), при этом усиливается выведение воды и минералов с потом. Дефицит эссенциальных элементов сохраняется, а интенсивная потеря жидкости и электролитов дополнительно стимулирует компенсаторное усиление абсорбции ионов из кишечника, в том числе токсичных. Таким образом, сочетанное действие холодового (в раннем онтогенезе) и теплового (в предубойный период) стресса у бычков II группы приводит к устойчивому дисбалансу элементного обмена, повышению относительной усвояемости токсичных элементов и их накоплению в мышечной ткани.

Полученные данные демонстрируют, что сезонные

стресс-факторы приводят к значительным нарушениям минерального обмена, проявляющимся в снижении содержания эссенциальных элементов (Ca, K, Mg, Zn, Se, I) и аккумуляции токсичных металлов (Pb, As) в мышечной ткани.

Выявленные нарушения минерального обмена в мышечной ткани бычков, рожденных в зимний и весенний сезоны, прямое следствие долгосрочного метаболического дисбаланса, инициированного температурным стрессом в раннем постнатальном периоде. Значительное снижение содержания калия и магния при одновременном повышении натрия в III группе указывает на глубокое нарушение функции натрий-калиевого насоса и трансмембранного потенциала клеток, что напрямую коррелирует с нарушением энергетического обмена в миоцитах и может быть одной из причин снижения синтеза мышечного белка [19]. Дефицит эссенциальных микроэлементов является ключевой причиной метаболических сбоев: недостаток цинка (на 20,2 % во II группе) подавляет клеточное деление и синтез белка; дефицит селена (на 25,1 %) снижает антиоксидантную защиту, повышая уязвимость ткани к окислительному стрессу; дефицит йода (на 24,4 %) нарушает синтез тиреоидных гормонов – главных регуляторов основного обмена, создавая энергодефицит [20]. Снижение уровня кальция на фоне тенденции к повышению фосфора нарушает оптимальное соотношение Ca:P, что может влиять на процессы мышечной дифференцировки и внутриклеточной сигнализации. Аккумуляция токсичных элементов (свинца в 1,72...1,98 раза и мышьяка в 1,68...2,05 раза) в мышечной ткани II и III групп по сравнению с контролем свидетельствует об угнетении систем детоксикации и нарушении барьерной функции кишечника под действием хронического стресса, что усугубляет окислительный стресс. Таким образом, сезонный стресс приводит к комплексному дисбалансу макро- и микроэлементов, который является одним из центральных патогенетических звеньев, объясняющих снижение продуктивности через угнетение энергетического обмена, синтеза белка и антиоксидантной защиты. Полученные данные обосновывают необходимость сезонно-адаптированной коррекции минерального состава рационов, направленной на компенсацию повышенных потерь и нарушенного усвоения элементов в условиях стресса.

Выводы. Сезон рождения бычков черно-пестрой породы оказывает существенное влияние на мясную продуктивность и химический состав длиннейшей мышцы спины. У животных осеннего сезона рождения (I группа) отмечали достоверно большее, по сравнению с бычками зимнего (II) и весеннего (III) сезонов рождения, содержание сухого вещества (24,21 %), внутримышечного жира (1,84 %) и энергетическую ценность мяса (4,39 МДж/кг). Наиболее низкие величины этих показателей установлены во II группе, что свидетельствует о негативном влиянии комплексного воздействия холодового стресса в раннем периоде онтогенеза и теплового стресса в предубойный период.

Аминокислотный профиль мышечной ткани дифференцируется в зависимости от сезона рождения. В длиннейшей мышце спины бычков I группы наблюдали максимальное в опыте содержание незаменимых аминокислот. У особей II группы установлено снижение лизина (на 0,98 %), метионина (на 0,23 %), валина (на 0,62 %), аргинина (на 0,90 %) и гистидина (на 0,27 %) при одновременном повышении заменимых аминокислот – аланина, серина, глицина и пролина, что ука-

зывает на перестройку белкового обмена в сторону компенсаторного глюконеогенеза и активации антиоксидантных механизмов в условиях стресса. Белково-качественный показатель (БКП) в I группе был выше, чем во II и III группах, соответственно на 10,8 % и 5,9 %, что подтверждает более высокую биологическую ценность мяса животных осеннего сезона рождения.

Жирынокислотный состав длиннейшей мышцы спины претерпевает значительные изменения под влиянием сезонного стресса. Наиболее значительные изменения липидного обмена зафиксированы во II группе. Они выражались в увеличении, по сравнению с другими группами, доли насыщенной пальмитиновой кислоты на 1,70...4,25 %, при снижении моно- и полиненасыщенных олеиновой (на 0,16...1,57 %), линолевой (на 0,14...0,35 %), линоленовой (на 0,21...0,22 %) и арахидоновой (на 0,14...0,15 %).

Элементный состав мышечной ткани характеризовался зависимостью от сезона рождения. У бычков II группы установлено достоверное снижение содержания калия (на 13,3 %), кальция (на 20,1 %), магния (на 20,2 %), цинка (на 20,2 %) и селена (на 25,0 %), по сравнению с I группой, что указывает на нарушение энергетического обмена, синтеза белка и антиоксидантной защиты.

Таким образом, для производства говядины с заданными качественными, технологическими и питательными характеристиками необходима разработка сезонно-адаптированных стратегий кормления, предусматривающих дифференцированную коррекцию рационов по энергетическому, аминокислотному и минеральному составам, особенно для молодняка, рожденного в зимний и весенний сезоны, с акцентом на восполнение дефицита эссенциальных микроэлементов (Zn, Se, I, Ca, K, Mg) и оптимизацию липидного обмена в заключительный период откорма.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук». Исследование выполнено в соответствии с планом научно-исследовательских работ на 2024–2026 гг. (№ государственного задания FFWZ-2024-0001). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮЖДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств "Об обращении с животными", ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г.), протоколы Женевской конвенции и принципы надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009), Руководство по работе с лабораторными животными (http://fncbst.ru/?page_id=3553). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Методика проведения эксперимента была одобрена Этическим комитетом Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук» (протокол № 1 от 05.03.2025 г.).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература.

1. Амерханов Х. А. Роль молочного и мясного скотоводства в обеспечении продовольственной безопасности России // *Сельскохозяйственный журнал*. 2025. № 4 (18). С. 80–89. doi: 10.48612/FARC/2687-1254/008.4.18.2025.
2. Амерханов Х. А. Роль и место животноводства в обеспечении продовольственной безопасности России // *Молочное и мясное скотоводство*. 2024. № 4. С. 3–6. doi: 10.33943/MMS.2024.65.11.001.
3. Review: Biological determinants of between-animal variation in feed efficiency of growing beef cattle / G. Cantalapiedra-Hijar, M. Abo-Ismael, G.E. Carstens, et al. // *Animal*. 2018. Vol. 12. No. 2. P. 321–335. doi: 10.1017/S1751731118001489.
4. Animal board invited review: Genomic-based improvement of cattle in response to climate change / I. Strandén, J. Kantanen, M. H. Lidauer, et al. // *Animal*. 2022. Vol. 16. No. 12. Article 100673. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731122002300?via%3Dihub> (дата обращения: 18.02.2026). doi: 10.1016/j.animal.2022.100673.
5. Heat Stress as a Barrier to Successful Reproduction and Potential Alleviation Strategies in Cattle / I. Khan, A. Mesalam, Y. S. Heo, et al. // *Animals (Basel)*. 2023. Vol. 13. No. 14. Article 2359. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/13/14/2359> (дата обращения: 18.02.2026). doi: 10.3390/ani13142359.
6. Poultry Response to Heat Stress: Its Physiological, Metabolic, and Genetic Implications on Meat Production and Quality Including Strategies to Improve Broiler Production in a Warming World / A. H. Nawaz, K. Amoah, Q. Y. Leng, et al. // *Frontiers in Veterinary Science*. 2021. Vol. 8. Article 699081. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/veterinary-science/articles/10.3389/fvets.2021.699081/full> (дата обращения: 18.02.2026). doi: 10.3389/fvets.2021.699081.
7. Fetal programming of skeletal muscle development in ruminant animals / M. Du, J. Tong, J. Zhao, et al. // *Journal of Animal Science*. 2010. Vol. 88. No. 13. P. E51–E60. URL: https://academic.oup.com/jas/article-abstract/88/suppl_13/E51/4779802?redirectedFrom=fulltext&login=true (дата обращения: 18.02.2026). doi: 10.2527/jas.2009-2311.
8. Review: Enhancing intramuscular fat development via targeting fibro-adipogenic progenitor cells in meat animals / X. Li, X. Fu, G. Yang, et al. // *Animal*. 2020. Vol. 14. No. 2. P. 312–321. doi: 10.1017/S175173111900209X.
9. Baumgard L. H., Rhoads R. P. Jr. Effects of heat stress on postabsorptive metabolism and energetics // *Annual Review of Animal Biosciences*. 2013. Vol. 1. P. 311–337. doi: 10.1146/annurev-animal-031412-103644.
10. Patra A. K., Kar I. Heat stress on microbiota composition, barrier integrity, and nutrient transport in gut, production performance, and its amelioration in farm animals // *Journal of Animal Science and Technology*. 2021. Vol. 63. No. 2. P. 211–247. doi: 10.5187/jast.2021.e48.
11. Ferguson D. M., Warner R. D. Have we underestimated the impact of pre-slaughter stress on meat quality in ruminants? // *Meat Science*. 2008. Vol. 80. No. 1. P. 12–19. doi: 10.1016/j.meatsci.2008.05.004.
12. Costa T. C., Gionbelli M. P., Duarte M. S. Fetal programming in ruminant animals: understanding the skeletal muscle development to improve meat quality // *Animal Frontiers*. 2021. Vol. 11. No. 6. P. 66–73. doi: 10.1093/af/vfab061.
13. How Muscle Structure and Composition Influence Meat and Flesh Quality / A. Listrat, B. Lebret, I. Louveau, et al. // *The Scientific World Journal*. 2016. Vol. 2016. Article 3182746. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2016/3182746> (дата обращения: 18.02.2026). doi: 10.1155/2016/3182746.
14. Physiological impact of amino acids during heat stress in ruminants / J.J. Looor, V. Lopreiato, V. Palombo, et al. // *Animal Frontiers*. 2023. Vol. 13. No. 5. P. 69–80. doi: 10.1093/af/vfad052.

15. Morris S. M. Jr. Arginine Metabolism Revisited // *The Journal of Nutrition*. 2016. Vol. 146. No. 12. P. 2579S–2586S. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022316623008106?via%3Dihub> (дата обращения: 18.02.2026). doi: 10.3945/jn.115.226621.
16. Wu G. Amino acids: metabolism, functions, and nutrition // *Amino Acids*. 2009. Vol. 37. No. 1. P. 1–17. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00726-009-0269-0> (дата обращения: 18.02.2026). doi: 10.1007/s00726-009-0269-0.
17. Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: A review / J.D. Wood, M. Enser, A.V. Fisher, et al. // *Meat Science*. 2008. Vol. 78. No. 4. P. 343–358. doi: 10.1016/j.meatsci.2007.07.019.
18. A preliminary investigation for the dietary inclusion of calcareous marine algae for grain-fed beef steers during a simulated heat wave / S. L. Sammes, J. B. Gaughan, S. O'Connell, et al. // *Journal of Thermal Biology*. 2025. Vol. 133. Article 104291. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306456525002487?via%3Dihub> (дата обращения: 18.02.2026). doi: 10.1016/j.jtherbio.2025.104291.
19. Effect of organic mineral supplementation in reducing oxidative stress in Holstein calves during short-term heat stress and recovery conditions / A. R. Son, S. H. Kim, M. Islam, et al. // *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2023. Vol. 14. No. 1. Article 156. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40104-023-00961-x> (дата обращения: 18.02.2026). doi: 10.1186/s40104-023-00961-x.
20. Effects of Microminerals on Performance and Metabolic Adaptation in Heat-Stressed Dairy Cows: A Review / M. R. Rezaei-Ahvanooei, M. Lamanna, R. Colleluori, et al. // *Biological Trace Element Research*. 2025. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12011-025-04911-8> (дата обращения: 18.02.2026). doi: 10.1007/s12011-025-04911-8.

References.

1. Amerkhanov KhA. [The role of dairy and beef cattle breeding in ensuring food security in Russia]. *Sel'skokhoziastvennyi Zhurn*. 2025;(4(18)):80–9. doi: 10.48612/FARC/2687-1254/008.4.18.2025. Russian.
2. Amerkhanov KhA. [The role and place of animal husbandry in ensuring food security in Russia]. *Molochn Myasn Skotovod*. 2024;(4):3–6. doi: 10.33943/MMS.2024.65.11.001. Russian.
3. Cantalapiedra-Hijar G, Abo-Ismael M, Carstens GE, et al. Review: Biological determinants of between-animal variation in feed efficiency of growing beef cattle. *Animal*. 2018;12(12):321–35. doi: 10.1017/S1751731118001489.
4. Strandén I, Kantanen J, Lidauer MH, et al. Animal board invited review: Genomic-based improvement of cattle in response to climate change. *Animal [Internet]*. 2022[cited 2026 Feb 18];16(12):100673. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731122002300?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.animal.2022.100673.
5. Khan I, Mesalam A, Heo YS, et al. Heat Stress as a Barrier to Successful Reproduction and Potential Alleviation Strategies in Cattle. *Animals (Basel) [Internet]*. 2023[cited 2026 Feb 18];13(14):2359. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-2615/13/14/2359>. doi: 10.3390/ani13142359.
6. Nawaz AH, Amoah K, Leng QY, et al. Poultry Response to Heat Stress: Its Physiological, Metabolic, and Genetic Implications on Meat Production and Quality Including Strategies to Improve Broiler Production in a Warming World. *Front Vet Sci [Internet]*. 2021[cited 2026 Feb 18];8:699081. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/veterinary-science/articles/10.3389/fvets.2021.699081/full>. doi: 10.3389/fvets.2021.699081.
7. Du M, Tong J, Zhao J, et al. Fetal programming of skeletal muscle development in ruminant animals. *J Anim Sci [Internet]*. 2010[cited 2026 Feb 18];88(Suppl 13):E51–60. Available from: https://academic.oup.com/jas/article-abstract/88/suppl_13/E51/4779802?redirectedFrom=fulltext&login=true. doi: 10.2527/jas.2009-2311.
8. Li X, Fu X, Yang G, et al. Review: Enhancing intramuscular fat development via targeting fibro-adipogenic progenitor cells in meat animals. *Animal*. 2020;14(2):312–21. doi: 10.1017/S175173111900209X.
9. Baumgard LH, Rhoads RP Jr. Effects of heat stress on postabsorptive metabolism and energetics. *Annu Rev Anim Biosci*. 2013;1:311–37. doi: 10.1146/annurev-animal-031412-103644.
10. Patra AK, Kar I. Heat stress on microbiota composition, barrier integrity, and nutrient transport in gut, production performance, and its amelioration in farm animals. *J Anim Sci Technol*. 2021;63(2):211–47. doi: 10.5187/jast.2021.e48.
11. Ferguson DM, Warner RD. Have we underestimated the impact of pre-slaughter stress on meat quality in ruminants? *Meat Sci*. 2008;80(1):12–9. doi: 10.1016/j.meatsci.2008.05.004.
12. Costa TC, Gionbelli MP, Duarte MS. Fetal programming in ruminant animals: understanding the skeletal muscle development to improve meat quality. *Anim Front*. 2021;11(6):66–73. doi: 10.1093/af/vfab061.
13. Listrat A, Lebret B, Louveau I, et al. How Muscle Structure and Composition Influence Meat and Flesh Quality. *Sci World J [Internet]*. 2016[cited 2026 Feb 18];2016:3182746. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2016/3182746>. doi: 10.1155/2016/3182746.
14. Lóor JJ, Lopreiato V, Palombo V, et al. Physiological impact of amino acids during heat stress in ruminants. *Anim Front*. 2023;13(5):69–80. doi: 10.1093/af/vfad052.
15. Morris SM Jr. Arginine Metabolism Revisited. *J Nutr [Internet]*. 2016[cited 2026 Feb 18];146(12):2579S–86S. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022316623008106?via%3Dihub>. doi: 10.3945/jn.115.226621.
16. Wu G. Amino acids: metabolism, functions, and nutrition. *Amino Acids [Internet]*. 2009[cited 2026 Feb 18];37(1):1–17 Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00726-009-0269-0>. doi: 10.1007/s00726-009-0269-0.
17. Wood JD, Enser M, Fisher AV, et al. Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: A review. *Meat Sci*. 2008;78(4):343–58. doi: 10.1016/j.meatsci.2007.07.019.
18. Sammes SL, Gaughan JB, O'Connell S, et al. A preliminary investigation for the dietary inclusion of calcareous marine algae for grain-fed beef steers during a simulated heat wave. *J Therm Biol [Internet]*. 2025[cited 2026 Feb 18];133:104291. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306456525002487?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.jtherbio.2025.104291.
19. Son AR, Kim SH, Islam M, et al. Effect of organic mineral supplementation in reducing oxidative stress in Holstein calves during short-term heat stress and recovery conditions. *J Anim Sci Biotechnol [Internet]*. 2023[cited 2026 Feb 18];14(1):156. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40104-023-00961-x>. doi: 10.1186/s40104-023-00961-x.
20. Rezaei-Ahvanooei MR, Lamanna M, Colleluori R, et al. Effects of Microminerals on Performance and Metabolic Adaptation in Heat-Stressed Dairy Cows: A Review. *Biol Trace Elem Res [Internet]*. 2025[cited 2026 Feb 18]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12011-025-04911-8>. doi: 10.1007/s12011-025-04911-8.

Поступила в редакцию 06.03.2026 После доработки 27.03.2026 Принята к публикации 22.04.2026

Влияние полиморфизма CSN2 на молочную продуктивность и минеральный статус коров красной степной породы Оренбургской области

Е. И. ТАРАСОВА, Е. В. ЯУШЕВА, Е. А. СИЗОВА

Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН, ул. 9 Января, Оренбург, Оренбургская обл., 460000, Российская Федерация

Резюме. Исследования проводили с целью выявления закономерностей формирования молочной продуктивности и минерального статуса коров красной степной породы при сопряженном воздействии геохимических факторов среды и генотипа CSN2 (A1/A2) для оптимизации племенного отбора скота. Объект исследования – коровы красной степной породы трех районов Оренбургской области (n=150, возраст 3...5 лет, вторая стадия лактации, 100...200 дней после отела). Животных разделили на три группы по локусу Pro67His гена β-казеина (CSN2): CC – тип A2A2; CA – тип A1A2; AA – тип A1A1. В молоке, сыворотке крови и волосе методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой определяли концентрацию макро- и микроэлементов. Генотипирование осуществляли методом полимеразной цепной реакции в реальном времени. Оценивали показатели молочной продуктивности (удой, содержание жира, белка, сухого обезжиренного молочного остатка (СОМО), лактозы). Генотип CC (тип A2A2) ассоциирован с максимальным содержанием жира в молоке, превышающим альтернативные группы на 13,1...20,4 %, а также более высокими концентрациями в сыворотке крови Co – на 25,0...45,4 %, Cu – на 10,0...23,9 %, Se – на 23,5...26,3 %, в волосе Zn – на 4,1...79,9 % (p<0,05). Генотип CA (тип A1A2) характеризовался наибольшим удоём (выше альтернативных групп более чем на 10,5 %), содержанием сухого обезжиренного молочного остатка и лактозы (выше на 2,4 %, p=0,04). Животные с генотипом AA (тип A1A1) демонстрировали чувствительность к среде и специфическую минерализацию молока превосходя группы CA и CC по концентрации Mg на 10,2...40,3 % и I – на 18,1...144,0 % (p<0,05). Геохимическая среда оказывала доминирующее влияние на формирование молочной продуктивности и минерального статуса животных, а полиморфизм гена CSN2 выступал модификатором метаболизма.

Ключевые слова: CSN2, β-казеин, красная степная порода, минеральный состав, сыворотка крови, волос, молочная продуктивность.

Сведения об авторах: Е. И. Тарасова, младший научный сотрудник (e-mail: ekivtarasova@mail.ru); Е. В. Яушева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник; Е. А. Сизова, доктор биологических наук, главный научный сотрудник.

Для цитирования: Тарасова Е. И., Яушева, Е. В., Сизова Е. А. Влияние полиморфизма CSN2 на молочную продуктивность и минеральный статус коров красной степной породы Оренбургской области // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. № 4. С. 69–75. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_69.

The influence of CSN2 polymorphism on milk productivity and mineral status of Red Steppe cows in the Orenburg region

E. I. Tarasova, E. V. Yausheva, E. A. Sizova

Federal Scientific Center of Biological Systems and Agrotechnologies, Russian Academy of Sciences, ul. 9 Yanvarya, Orenburg, Orenburgskaya obl., 460000, Russian Federation

Abstract. The study was conducted to identify patterns in the formation of milk productivity and mineral status in Red Steppe cows under the combined influence of geochemical environmental factors and the CSN2 (A1/A2) genotype for the optimisation of cattle breeding selection. The object of the study was Red Steppe cows from three districts of the Orenburg region (n=150, aged 3-5 years, second stage of lactation, 100-200 days after calving). The animals were divided into three groups based on the Pro67His locus of the β-casein gene (CSN2): CC – type A2A2; CA – type A1A2; AA – type A1A1. The concentration of macro- and microelements in milk, blood serum, and hair was determined using inductively coupled plasma mass spectrometry. Genotyping was performed using real-time polymerase chain reaction. The milk productivity parameters (milk yield, fat, protein, nonfat milk solids (NMS), and lactose content) were assessed. The CC genotype (A2A2 type) was associated with the highest fat content in milk, exceeding the alternative groups by 13.1-20.4%, as well as higher concentrations of Co in blood serum (by 25.0-45.4%), Cu (by 10.0-23.9%), Se (by 23.5-26.3%), and Zn in hair (by 4.1-79.9%) (p<0.05). The CA genotype (A1A2 type) was characterised by the highest milk yield (more than 10.5% higher than the alternative groups), NMS and lactose content (2.4% higher, p=0.04). Animals with the AA genotype (type A1A1) demonstrated environmental sensitivity and specific milk mineralisation, exceeding the CA and CC groups in Mg concentration by 10.2-40.3% and I concentration by 18.1-144.0% (p<0.05). The geochemical environment had a dominant influence on milk productivity and mineral status, while the CSN2 gene polymorphism acted as a metabolic modifier.

Keywords: CSN2; β-casein; Red Steppe cattle; mineral composition; serum; hair; milk productivity.

Author Details: E. I. Tarasova, junior research fellow (e-mail: ekivtarasova@mail.ru); E. V. Yausheva, Cand. Sc. (Biol.), senior research fellow; E. A. Sizova, D. Sc. (Biol.), chief research fellow.

For citation: Tarasova EI, Yausheva EV, Sizova EA. [The influence of CSN2 polymorphism on milk productivity and mineral status of Red Steppe cows in the Orenburg region]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(4):69–75. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_69.

Красная степная порода крупного рогатого скота занимает важное место в молочном животноводстве южных регионов России благодаря своей адаптивности к засушливым условиям и способности сохранять продуктивность при ограниченных кормовых ресурсах. В условиях степных экосистем особую значимость приобретает изучение физиологических механизмов, обеспечивающих устойчивость животных к воздействию факторов

среды, в том числе особенностей минерального обмена.

Минеральный статус животных – один из ключевых показателей, отражающих как уровень обеспеченности организма макро- и микроэлементами, так и адаптационные возможности к условиям содержания и кормления. При этом элементный состав биологических субстратов (молока, крови, волос) формируется под влиянием комплекса факторов, включая

геохимические особенности региона, кормовую базу и индивидуальные генетические характеристики животных [1, 2].

В последние годы особое внимание уделяют изучению полиморфизмов генов молочных белков, оказывающих влияние не только на технологические и пищевые свойства молока, но и на метаболические процессы в организме животных. Один из наиболее изученных ген β -казеина (CSN2), характеризующийся полиморфизмом Pro67His, который определяет формирование вариантов белка A1 и A2. Различия между этими вариантами обусловлены заменой одной аминокислоты (гистидин в A1 и пролин в A2), что влияет на структуру белка и его биологические свойства [3].

Исследования показывают, что генотип по β -казеину может быть связан с показателями молочной продуктивности, а также с технологическими качествами молока [4]. В то же время потенциальное влияние данного полиморфизма на минеральный обмен изучено недостаточно. Учитывая роль белков молока в транспорте и связывании минеральных веществ, можно предположить наличие взаимосвязи между генотипом животных и особенностями распределения элементов в организме.

Особую актуальность эта проблема приобретает в условиях биогеохимической неоднородности территорий, таких как Оренбургская область, где содержание химических элементов в почвах и кормах может существенно варьировать. Это создаёт предпосылки для формирования различного минерального статуса у животных даже в пределах одной породы и требует комплексного подхода к его оценке с учётом генетических факторов.

Цель исследования – выявление закономерностей формирования молочной продуктивности и минерального статуса коров красной степной породы при сопряженном воздействии геохимических факторов среды и генотипа CSN2 (A1/A2) для оптимизации племенного отбора скота.

Условия, материалы и методы. В исследование было включено 150 коров красной степной породы, отобранных в хозяйствах Саракташского, Матвеевского и Соль-Илецкого районов Оренбургской области (по $n=50$). После проведения генотипирования по гену β -казеина (CSN2) животных разделили на три группы по локусу Pro67His: CC – тип A2A2; CA – тип A1A2; AA – тип A1A1. Распределение в Саракташском районе составило CC – $n=11$, CA – $n=29$, AA – $n=10$; в Матвеевском районе – соответственно $n=18$, $n=18$, $n=14$; в Соль-Илецком районе – $n=9$, $n=9$, $n=32$. Животные всех групп были сопоставимы по возрасту (3...5 лет), стадии лактации (вторая стадия лактации, 100...200 дней после отёла) и живой массе (480...520 кг). В Саракташском и Матвеевском районах популяции коров находились в состоянии генетического равновесия. В Соль-Илецком районе зафиксировано статистически значимое отклонение от равновесия Харди-Вайнберга ($\chi^2=14,76$; $p < 0,05$).

Научно-хозяйственный опыт проводили в весенний период 2025 г. Кормление подопытных животных осуществляли в условиях хозяйств, включённых в исследование, по рационам стойлового периода. Рационы были сбалансированы по основным питательным веществам и включали сено бобово-злаковое, сенаж разнотравный, силос кукурузный, корнеплоды и концентраты, а также минеральные добавки (соль, динатрий-

фосфат, премикс). Энергетическая и протеиновая питательность рационов составляла 14,9 ЭКЕ, 152,2 МДж обменной энергии и 1998 г сырого протеина. Элементный состав воды и рационов (табл. 1) соответствовал зоотехническим нормам; существенных межгрупповых различий не зафиксировано.

Таблица 1. Элементный состав воды и рационов, мг/кг

Элемент	Вода	Рацион
Li	0,0090±0,0006	0,00040±0,00002
Be	–	0,0040±0,0001
B	0,040±0,002	8,39±1,10
Na	–	339,0±18,0
Mg	36,0±2,0	1702,0±90,0
Al	–	343,6±1,4
P	–	1444,0±62,0
K	2,0±0,0	9351,0±449,0
Ca	56,0±3,0	2351,0±106,0
Mn	0,0003±0,0002	19,40±1,05
Co	0,00010±0,00001	0,120±0,001
Ni	0,00080±0,00001	3,42±0,27
Cu	0,0010±0,0002	4,42±0,17
Se	0,0010±0,0003	3,57±0,98
Br	0,23±0,01	22,4±2,5
Sr	0,47±0,02	28,8±1,5
Mo	0,000200±0,000001	4,37±0,18
Ag	–	1,78±0,48
Cd	–	0,14±0,01
Sn	–	0,060±0,002
Sb	0,00010±0,00001	0,060±0,003
I	0,0034±0,0002	0,24±0,01
Ba	0,000600±0,000002	14,80±1,48
Hg	–	0,150±0,001
Pb	–	0,27±0,01
Bi	–	0,0020±0,0003
Cr	0,00013±0,00001	2,67±0,28
Fe	0,00050±0,00001	156,5±0,3
Zn	0,0107±0,0009	10,7±0,6
As	0,0050±0,0003	2,70±0,28

В качестве биосубстратов использовали образцы волос, молока и цельной крови животных. Образцы волос отбирали с верхней части холки – не менее 0,4 г. Кровь из хвостовой вены отбирали в пробирки VACUETTE с активатором свёртывания крови и гелем для отделения эритроцитарной массы (Greiner Bio-One International AG, Австрия). Для проведения генетических исследований кровь отбирали в пробирки VACUETTE с антикоагулянтом К2-ЭДТА (2-замещенная калиевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты) (Greiner Bio-One International AG, Австрия). Образцы молока отбирали индивидуально от каждой коровы ежедневно в течение трёх дней подряд.

Лабораторные исследования выполняли с использованием материально технической и методической базы Центра коллективного пользования (ЦКП) Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (ФНЦ БСТ РАН). Содержание химических элементов в волосе, молоке и сыворотке крови определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (Agilent 7900 ICP-MS, США).

Среднесуточный удой рассчитывали, как среднее значение по результатам индивидуального взвешивания надоенного молока от каждой коровы в течение трёх последовательных суток. Анализ физико-химических показателей молока проводили в соответствии с

процедурой FIL-IDF с использованием инфракрасного анализатора MilkoScan™ FT1 (Foss Electric, Дания).

Геномную ДНК выделяли из цельной крови с использованием набора «М-сорб кровь» («Синтол», Россия). Концентрацию и качество ДНК оценивали на флуориметре Qubit 4.0 (Invitrogen, США). Генотипирование по CSN2 проводили методом ПЦР в реальном времени с использованием коммерческого набора «Набор реагентов для определения полиморфизма Pro67His гена CASB крупного рогатого скота (определение молока A1/A2)» («Синтол», Россия) на амплификаторе CFX96 Touch (Bio-Rad, США). Условия амплификации включали начальную денатурацию при 95 °C (2 мин.), затем 40 циклов: 95 °C – 20 с, 63 °C – 40 с с регистрацией флуоресцентного сигнала на стадии элонгации. Детекцию флуоресценции осуществляли по каналам FAM (6-карбоксифлуоресцеин)/HEX (гексахлоро-6-карбоксифлуоресцеин).

Статистическую обработку полученных данных проводили методами вариационной статистики с применением статистического пакета STATISTICA 10 (StatSoft Inc., США). Проверку данных на нормальность распределения осуществляли с использованием критерия Шапиро-Уилка. В связи с распределением, отличным от нормального, для межгрупповых сравнений использовали непараметрический U-критерий Манна-Уитни. Для оценки влияния исследуемого фактора на элементный статус применялся многомерный дисперсионный анализ (MANOVA). Критическое значение уровня статистической значимости (p) при проверке нулевых гипотез принимали равным 5 %. Данные о концентрации химических элементов представлены в формате Me (Q1-Q3), где Me – медиана, Q1 и Q3 – 25-й и 75-й процентиля.

Результаты и обсуждение. Согласно результатам анализа молочной продуктивности коров красной степной породы Оренбургской области генотип по локусу CSN2 оказывал влияние на ряд показателей. Коровы с генотипом СА демонстрировали максимальный среднесуточный удой, превышающий показатели гомозиготных животных более чем на 10,5 % (табл. 2).

Полиморфизм Pro67His гена CSN2 оказывал избирательное влияние на показатели молочной продуктивности коров красной степной породы. Животные с генотипом СС характеризовались максимальным содержанием жира в молоке, которое было выше на 13,1 % ($p=0,04$) по сравнению с генотипом АА и на 20,4 % ($p=0,02$) по сравнению с генотипом СА. Для коров с генотипом СА установлено статистически значимое преимущество по показателям углеводно-белкового комплекса: уровень СОМО и концентрация лактозы превышали аналогичные показатели альтернативных генотипов (СС и АА) в среднем на 2,4 % ($p=0,04$). Выявленные закономерности определяют технологические преимущества молока от коров с генотипом СА при переработке за счет повышенного выхода сухого остатка и лактозы, в то время как генотип СС служит маркером высокой жирномолочности.

В то же время данные литературы о влиянии генотипов CSN2 на молочную продуктивность остаются неоднозначными. Ряд исследований показывает отсутствие статистически значимых различий между генотипами по основным продуктивным признакам. Так, на крупных выборках голштино-фризского и ай-ширского скота установлено, что наличие варианта A2 β -казеина не оказывает негативного влияния на удой за 305 дней лактации, а также на содержание жира и белка в молоке [5, 6].

Вместе с тем имеются данные, свидетельствующие о преимуществе генотипа A2A2 по отдельным показателям продуктивности. Голштинские коровы с таким генотипом за 305 дней второй лактации достоверно превосходят животных с генотипами A1A1 и A1A2 по удою (на 369 и 360 кг соответственно), а также характеризуются более высокими значениями содержания жира, лактозы и сухого вещества в молоке [4, 7].

Кроме того, в работах отечественных авторов отмечена выраженная варибельность показателей молочной продуктивности у коров, различающихся по генотипу β -казеина, в зависимости от породной принадлежности и условий содержания. В частности, для красной степной породы установлены различия по уровню удоя и его компонентам в разных регионах России, что подчеркивает значимость взаимодействия генотипа и среды [8].

Таким образом, влияние полиморфизма CSN2 на молочную продуктивность носит комплексный и неоднозначный характер. С одной стороны, отдельные генотипы могут быть ассоциированы с преимуществами по удою или компонентному составу молока, с другой – степень реализации этих преимуществ во многом определяется породными особенностями и условиями кормления и содержания животных.

В результате анализа элементного состава молока коров с учетом генотипа по локусу CSN2 и района содержания установлено, что варибельность показателей обусловлена как генетическими, так и средовыми факторами, что подтверждается результатами теста MANOVA. Влияние генотипа было статистически значимым для магния (Mg) и йода (I) ($p < 0,05$).

Для магния (Mg) отмечена относительно устойчивая тенденция к повышению его содержания у животных с генотипом АА. Так, в Матвеевском районе содержание Mg у носителей АА генотипа статистически значимо превышало уровень элемента у животных с генотипом СС на 19,5 % и у СА – на 10,2 %. В Саракташском районе значения Mg также оказались выше у представителей АА, различия с группой СА составили 18,7 %. В Соль-Илецком районе различия между группами с генотипами АА и СС оказались равными 40,3 %.

Для йода (I) также выявлены генотипические различия. В Матвеевском районе содержание I у генотипа коров с генотипом АА было выше по сравнению с СА на 47,7 % и с СС – на 18,1 %. В Саракташском районе максимальные значения также характерны для АА

Таблица 2. Молочная продуктивность коров с разным генотипом CSN2

Генотип CSN2	Среднесуточный удой, кг	Содержание в молоке, %				Плотность молока, кг/м³	Точка замерзания молока, °C
		жира	СОМО	белка	лактозы		
СС	17,70±1,17	4,49±0,35	8,47±0,11	3,03±0,04	4,66±0,06	1029,50±0,58	-0,520±0,002
СА	19,68±0,69	3,73±0,24*	8,68±0,07*	3,09±0,02	4,77±0,04*	1030,64±0,39	-0,530±0,001
АА	17,80±0,80	3,97±0,37*	8,48±0,14	3,03±0,05	4,67±0,08	1029,86±0,71	-0,520±0,002

*различия с группой СС статистически значимы при уровне значимости $p < 0,05$ (достоверность различий между группами оценивали с использованием непараметрического U-критерия Манна-Уитни).

и превышали уровень СА на 46,6 %. В Соль-Илецком районе значимые различия между генотипами АА и СС составили 144 %.

Взаимодействие «район × генотип» ($p < 0,05$) для I меняло ранжирование групп: в Матвеевском и Саракташском районах по концентрации элемента в молоке лидировали животные с генотипом АА, тогда как в Соль-Илецком районе межгенотипические различия между носителями аллеля А (АА и СА) практически полностью сглаживались, а показатели коров с генотипом СС, напротив, снижались относительно альтернативных групп.

Взаимодействие факторов также определяло вариабельность Na и K, при этом устойчивые межгенотипические различия отсутствовали.

В целом, для большинства макро- и микроэлементов (Са, К, Na, Р, Fe, Cu, Zn и др.) отмечена значительная изменчивость показателей между районами области, что подтверждает доминирующее влияние среды ($p < 0,05$) по данным MANOVA.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что, несмотря на наличие статистически значимого влияния генотипа на отдельные элементы (Mg, I), основная роль в формировании элементного состава молока принадлежит средовым факторам, при этом для ряда элементов (Na, K) характерно значимое взаимодействие генотипа и среды, определяющее вариабельность их содержания.

В результате анализа элементного состава сыворотки крови красных степных коров Оренбургской области были зафиксированы различия показателей, обусловленных как генетическими, так и средовыми факторами, что подтверждается результатами теста MANOVA. Согласно полученным данным, влияние генотипа было статистически значимым для меди (Cu, $p = 0,028$), кобальта (Co, $p = 0,030$), селена (Se, $p = 0,007$), а также хрома (Cr) и мышьяка (As), что согласуется с выявленными различиями между генотипическими группами.

Для кобальта (Co) отмечена устойчивая тенденция к более высоким концентрациям в крови животных с генотипом СС. Так, в Матвеевском и Соль-Илецком районе концентрация Co у гомозиготных животных СС превышала уровень у АА на 25,0 %, а в Саракташском районе – на 45,4 %.

Для меди (Cu) также выявлены генотипические различия. В Матвеевском районе концентрация меди у СС оказалась выше по сравнению с АА на 10,0 % и сравнима с СА. В Саракташском районе концентрация меди у СС превышала АА на 14,3 % и СА – на 10,0 %. В Соль-Илецком районе различия между группами были наиболее выражены: показатели группы СС превышали АА на 21,2 % и СА – на 23,9 %, что указывает на стабильность генотипического эффекта для меди.

Для селена (Se) наблюдали близкие показатели концентраций у животных с генотипами СА и СС в Матвеевском и Саракташском районах, с более низкими показателями у коров с генотипом АА. В Соль-Илецком районе различия с СС были более выражены и составляли 26,3 % и 23,5 % для генотипов АА и СА соответственно. Данные отражают значимое взаимодействие факторов «район × генотип» ($p < 0,05$) и проявляется в изменении величины генотипического эффекта в зависимости от района (табл. 3).

Для других микроэлементов (Cr, As, Fe, Zn, Li, Mn) выявлены районные различия и умеренные генотипические эффекты, однако тенденции были менее выражены и демонстрировали значительную зависимость от среды. Макроэлементы (Са, К, Mg, Na, Р) в большей

степени контролировали гомеостатические механизмы и не показывали устойчивых различий между генотипами, хотя наблюдали выраженные межрайонные колебания, обусловленные экологическими условиями.

В целом результаты анализа элементного анализа сыворотки крови подтвердили, что генотип СС обеспечивал стабильное поддержание концентраций жизненно важных микроэлементов – Cu, Co и Se, в то время как АА проявлял повышенную чувствительность к условиям среды. Генотип СА занимал промежуточное положение, демонстрируя умеренные значения по ключевым элементам.

Результаты MANOVA теста показали, что экологические условия оказывали статистически значимое влияние на концентрацию большинства макро- и микроэлементов в волосе коров ($p < 0,05$), включая Li, Na, Mg, Al, Mn, Zn и As. Генотип статистически значимо влиял на содержание Na и Zn ($p < 0,05$), а взаимодействие факторов «район × генотип» оказалось значимым для Na, Se и Zn ($p < 0,05$).

Для натрия (Na) была выявлена выраженная зависимость показателей от условий содержания. В Матвеевском районе максимальная концентрация Na отмечалась у животных с генотипом СА, превышая уровень СС на 32,9 %. В Саракташском районе наибольший показатель Na наблюдался у группы АА, различия с генотипом СА составили 77,4 %. В Соль-Илецком районе отмечалась обратная тенденция и по показателю Na доминировал генотип СС, концентрация которого была почти в два раза выше, чем у СА и АА. Эти данные свидетельствуют о том, что проявление генотипических различий по Na сильно модифицируется условиями среды, что подтверждается статистически значимым взаимодействием факторов «район × генотип».

Селен (Se) демонстрировал умеренные генотипические различия с влиянием среды. В Матвеевском районе особи группы АА имели наибольшую концентрацию Se, в Саракташском районе СС и АА были близки по уровню, тогда как СА немного уступал. В Соль-Илецком районе особи с СС показывали максимальный уровень Se, превышая АА на 41,6 %.

Накопление Zn в волосе демонстрировало устойчивую генетическую детерминацию: генотип СС стабильно превосходил СА и АА на 4,1...79,9 % во всех исследованных биогеохимических зонах. В Матвеевском районе СС превышал СА и АА в среднем на 8,1 %, в Саракташском районе – на 4,1...5,2 %, а в Соль-Илецком районе различия были особенно выражены: концентрация Zn у животных с генотипом СС оказалась на 55,7 % выше, чем у СА, и на 79,9 % выше, чем у АА (см. табл. 3). Таким образом, генотип СС стабильно обеспечивает более высокий уровень Zn, что свидетельствует о выраженной генетической детерминированности данного элемента.

Такие элементы, как Li, Mg, Al, Mn и As, в основном были подвержены влиянию экологических факторов, тогда как эффект генотипа и взаимодействие «район × генотип» проявляются выборочно. В целом, результаты анализа подтвердили ключевую роль факторов среды в минерализации волоса, при этом генетические особенности проявились преимущественно для Na, Se и Zn, причём Zn демонстрировал общую, устойчивую тенденцию превышения у генотипа СС во всех районах.

Полученные результаты свидетельствуют о сложном характере регуляции минерального обмена у коров красной степной породы, определяемом взаимодействием генетических и экологических факторов. В

Таблица 3. Содержание макро- и микроэлементов в биосубстратах красных степных коров в зависимости от генотипа CSN2

Биосуб-страт	Гено-тип	Матвеевский район	Сараташский район	Соль-Илецкий район
Mg, мг/л				
Молоко	СС	95,0 (88,2...105,0)	126,2 (119,0...135,8)	116,5 (114,0...122,7)
	СА	103,0 (98,2...120,0)	110,1* (104,1...127,3)	153,0 (120,7...186,2)
	АА	113,5* (97,2...129,0)	130,7 (126,9...132,1)	163,5* (134,0...199,2)
I, мкг/л				
	СС	0,063 (0,059...0,079)	0,355 (0,335...0,510)	0,117 (0,108...0,137)
	СА	0,050 (0,045...0,068)	0,307 (0,238...0,383)	0,279* (0,234...0,318)
	АА	0,075* (0,063...0,090)	0,450* (0,417...0,476)	0,285* (0,233...0,361)
Сыворотка крови	Со, мкг/л			
	СС	0,0005 (0,0004...0,0007)	0,0003 (0,0002...0,0007)	0,0017 (0,0013...0,0025)
	СА	0,0004 (0,0004...0,0005)	0,0002 (0,00016...0,00061)	0,0011* (0,0010...0,0014)
	Си, мкг/л			
	СС	0,572 (0,481...0,592)	0,973 (0,919...1,095)	1,018 (0,855...1,246)
	СА	0,590 (0,483...0,635)	0,884 (0,783...0,945)	0,821* (0,662...0,983)
	АА	0,519* (0,412...0,602)	0,851* (0,776...0,915)	0,839* (0,752...1,084)
	Se, мкг/л			
	СС	0,1056 (0,0928...0,1145)	0,0543 (0,0449...0,0626)	0,2580 (0,2435...0,2745)
	СА	0,1047 (0,0883...0,1147)	0,0526 (0,0466...0,0612)	0,2089* (0,1848...0,2333)
	АА	0,1043 (0,0905...0,1108)	0,0518* (0,0482...0,0566)	0,2042* (0,1560...0,2314)
Волос	Na, мг/л			
	СС	315,5 (243,2...395,0)	882,0 (784,0...1078,2)	1125,0 (1074,5...1158,2)
	СА	419,5* (359,2...518,0)	752,0 (704,5...939,5)	549,0* (470,2...716,2)
	Se, мкг/л			
	СС	0,280 (0,253...0,306)	0,579 (0,541...0,990)	0,510 (0,411...0,610)
	СА	0,317 (0,287...0,341)	0,547* (0,532...0,620)	0,441 (0,390...0,501)
	АА	0,323* (0,277...0,353)	0,577 (0,564...0,590)	0,360* (0,291...0,470)
	Zn, мкг/л			
	СС	69,27 (65,72...75,66)	66,83 (61,63...133,30)	173,81 (140,59...200,62)
	СА	64,04* (58,24...73,10)	63,73* (58,15...65,81)	111,59* (100,41...127,88)
	АА	64,12* (57,40...82,65)	64,47 (60,69...68,25)	96,63* (85,18...133,12)

*различия с группой СС статистически значимы при $p < 0,05$ (достоверность различий между группами оценивали с использованием непараметрического U-критерия Манна-Уитни).

настоящем исследовании установлено, что полиморфизм гена β -казеина (CSN2, Pro67His, A1/A2) оказывал избирательное влияние на распределение макро- и микроэлементов в молоке, сыворотке крови и волосах, при этом степень выраженности этих эффектов существенно модифицировалась условиями среды.

Анализ различных биологических субстратов показал многоуровневую организацию минерального статуса. Сыворотка крови отражала текущие метаболические процессы и характеризовалась относительно быстрыми изменениями элементного состава, молоко – особенности секреции и продуктивности, а волос служил индикатором длительного накопления элементов. Выявленные различия между генотипами носили неоднородный характер, что указывает на дифференцированную регуляцию минерального обмена.

Для носителей генотипа АА была характерна специфическая направленность минерализации молока, проявляющаяся в накоплении магния (Mg) и йода (I). Кальций и магний считают критическими структурными компонентами, участвующими в формировании мостиковых связей между субмицеллами казеина [9]. Появление гистидина в 67-й позиции модифицирует

электростатический профиль молекулы и её конформационную гибкость, что потенциально увеличивает энергию связывания с двухвалентными катионами. Учитывая, что мицеллы типа А1 склонны к формированию более крупных агрегатов, вовлечение дополнительного количества Mg выступает критическим фактором стабилизации коллоидной системы, предотвращая спонтанную дестабилизацию белков [10, 11].

Повышенное содержание йода (I) у генотипа АА может объясняться его физико-химическим взаимодействием с тирозиновыми остатками белковой молекулы [12]. Известно, что казеины – основные акцепторы йода в молоке. Вероятно, специфическая конформация варианта А1 β -казеина делает определенные участки полипептидной цепи более доступными для включения ионов йода в структуру белка [13, 14]. Однако стоит отметить, что содержание йода в молоке не имеет прямой генетической детерминации через варианты казеина и определяется преимущественно рационом животных.

Животные с генотипом СС демонстрировали наиболее сбалансированный минеральный профиль и высокую эффективность систем микроэлементного гомеостаза. Стабильно высокие уровни меди (Cu), кобальта (Co) и селена (Se) в сыворотке крови формируют надежный антиоксидантный статус организма [15]. Медь и селен являются кофакторами ключевых ферментов (супероксиддисмутазы и глутатионпероксидазы), а устойчивость их концентраций у типа А2 указывает на генетически детерминированную интенсивность работы специфических транспортных белков (например, церрулоплазмينا) [16, 17]. Высокий уровень кобальта (Co) имеет критическое значение для рубцовой микрофлоры и синтеза витамина В12, что коррелирует с общей интенсивностью метаболизма [18]. Генотип СС (А2) выступает маркером физиологической резистентности. Животные этой группы вероятно лучше аккумулируют и удерживают критически важные микроэлементы, что создает метаболический фундамент для высокой продуктивности и долголетия без истощения внутренних депо организма».

Особого внимания заслуживает устойчиво высокое содержание цинка (Zn) в волосяном покрове у коров генотипа СС, сохраняющееся во всех районах независимо от геохимических условий.

Поскольку волос отражает обеспеченность организма элементами за длительный период, высокий

уровень Zn в данном биосубстрате у коров с генотипом CC указывает на перспективность использования данного показателя в качестве дополнительного индикатора адаптивного потенциала животных типа A2. У носителей варианта A2 механизмы гомеостатического контроля цинка настроены на более высокий порог накопления, что может быть связано с эффективной работой кишечных транспортеров [19]. В условиях геохимического стресса генотип CC демонстрирует большую резистентность, что делает селекцию в пользу типа A2 важным инструментом для поддержания здоровья и воспроизводительной функции животных в неблагоприятных экологических зонах.

Несмотря на выявленные генетические эффекты, основная вариабельность большинства макроэлементов (Na, K, Ca в крови) определяется средовыми факторами. Статистически значимое взаимодействие «район × генотип» для натрия (Na) и калия (K) подтверждает, что генетический потенциал минерального обмена реализуется специфично для каждого района.

Выводы. Установлено доминирующее влияние экологических факторов (биогеохимической неоднородности Оренбургской области) над генетическими при формировании минерального статуса организма коров красной степной породы. Полиморфизм Pro67His гена CSN2 при этом выступал в роли избирательного модификатора и стабилизатора молочной продуктивности и минерального статуса животных.

Носители гомозиготного генотипа CC (тип A2A2) характеризовались наиболее устойчивыми гомеостатическими механизмами в различных экологических условиях. Это подтверждает стабильно повышенный уровень эссенциальных элементов в сыворотке крови: Co – на 25,0...45,4 %, Cu – на 10,0...23,9 %, Se – на 23,5...26,3 %, а также Zn в волосе – на 4,1...79,9 % ($p < 0,05$), на фоне максимальной жирномолочности, превосходящей показатели группы AA на 13,1 % ($p=0,04$) и CA – на 20,4 % ($p=0,02$).

Коровы с гетерозиготным генотипом CA (тип A1A2) отличались максимальным проявлением признаков мо-

лочной продуктивности при умеренном уровне минерализации биосубстратов. Удой у особей этой группы оказался выше показателей альтернативных генотипов более чем на 10,5 %, а содержание СОМО и лактозы было достоверно выше в среднем на 2,4 % ($p = 0,04$).

Для коров с генотипом AA (тип A1A1) была характерна повышенная чувствительность к среде, высокая вариабельность элементного состава крови и специфическая минерализация молока: концентрация Mg превосходила величину этого показателя в альтернативных группах на 10,2...40,3 % и I – на 18,1...144,0 % ($p < 0,05$).

Полученные результаты обосновывают целесообразность использования генотипирования по локусу CSN2 крупного рогатого скота в селекционно-племенных программах. Это позволяет использовать полиморфизм Pro67His как прогностический маркер для оптимизации отбора животных, сочетающих высокую продуктивность с выраженным адаптивным потенциалом в условиях конкретных биогеохимических провинций.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР за 2025-2027 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ FNWZ-2025-0001).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии Модельным законом Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств «Об обращении с животными», статья 20 (постановление 29 Межпарламентской Ассамблеи государств-участников СНГ N 29-17 от 31 октября 2007 года). Протокол настоящего исследования одобрен комитетом по биоэтике ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (протокол № 1 от 17.01.2025).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

- Нотова С. В., Маршинская О. В., Казакова Т. В. Содержание макро- и микроэлементов в шерсти коров из различных регионов России // *Животноводство и кормопроизводство*. 2021. Т. 104. № 3. С. 8–16. doi: 10.33284/2658-3135-104-3-8.
- Ассоциация полиморфизма rs8193046 гена TLR4 с элементным составом сыворотки крови коров красной степной породы / Е. И. Тарасова, Е. А. Сизова, Е. В. Яшуева и др. // *Аграрная наука*. 2025. № 10. С. 121–132. doi: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-121-132.
- Analysis of beta-casein gene (CSN2) polymorphism in Tharparkar and Frieswal cattle / S. Kumar, R. V. Singh, A. Chauhan, et al. // *Indian Journal of Animal Research*. 2020. Vol. 54. No. 1. P. 1–5. URL: <https://arccjournals.com/journal/indian-journal-of-animal-research/B-3724> (дата обращения 23.02.2026). doi: 10.18805/ijar.B-3724.
- Ковалюк Н. В., Шахназарова Ю. Ю., Юницкая В. В. Влияние CSN2 генотипа на молочную продуктивность коров // *Сборник научных трудов Краснодарского научного центра по зоотехнии и ветеринарии*. 2019. Т. 8. № 3. С. 4–7. doi: 10.34617/kg1a-ez25.
- Rapid direct CSN2 genotyping by PCR and its application in population genetics and A2 milk selection in Holstein cattle / L. Sandorova, P. A. Feher, A. C. Ambagan, et al. // *Dairy*. 2026. Vol. 7. No. 1. Article 12. URL: <https://www.mdpi.com/2624-862X/7/1/12> (дата обращения: 23.02.2026). doi: 10.3390/dairy7010012.
- Влияние CSN2- и CSN3-генотипов на молочную продуктивность коров айрширской породы / Н. В. Ковалюк, В. Ф. Сацук, Е. А. Кулешова и др. // *Молочное и мясное скотоводство*. 2021. № 2. С. 25–28. doi: 10.33943/MMS.2021.96.45.006.
- Корнелеева М. В., Карликова Г. Г., Сермягин А. А. Влияние генотипа по гену CSN2 на качественные и количественные характеристики молока коров голштинской породы // *Journal of Agriculture and Environment*. 2024. № 8 (48). С. 1–10. URL: <https://jae.cifra.science/archive/8-48-2024-august/10.60797/JAE.2024.48.2> (дата обращения: 23.02.2026). doi: 10.60797/JAE.2024.48.2.
- Молочная продуктивность коров красно-пестрой породы с разными генотипами бета-казеина / Л. А. Калашникова, Я. А. Хабибрахманова, А. И. Голубков и др. // *Молочное и мясное скотоводство*. 2022. № 1. С. 13–16. doi: 10.33943/MMS.2022.82.31.005.
- Tsioulpas A., Lewis M., Grandison A. Effect of Minerals on Casein Micelle Stability of Cows' Milk // *The Journal of dairy research*. 2007. Vol. 74. P. 167–173. doi: 10.1017/S0022029906002330.
- Caseins: Versatility of Their Micellar Organization in Relation to the Functional and Nutritional Properties of Milk / A. Runthala, M. Mbye, M. Ayyash, et al. // *Molecules*. 2023. Vol. 28. No. 5. Article. 2023. URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/28/5/2023> (дата обращения: 23.02.2026). doi: 10.3390/molecules28052023.

11. An overview of interactions between goat milk casein and other food components: polysaccharides, polyphenols, and metal ions / B. Ma, M. Al-Wraikat, Q. Shu, et al. // *Foods*. 2024. Vol. 13. No. 18. Article 2903. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/13/18/2903> (дата обращения: 23.02.2026). doi: 10.3390/foods13182903.
12. Recent advances in the bovine β -casein gene mutants on functional characteristics and nutritional health of dairy products: Status, challenges, and prospects / Y. Sun, Y. Ding, B. Liu, et al. // *Food Chemistry*. 2024. Vol. 443. Article 138510. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814624001584> (дата обращения: 23.02.2026). doi: 10.1016/j.foodchem.2024.138510.
13. What is the impact of amino acid mutations in the primary structure of caseins on the composition and functionality of milk and dairy products? / D. Daniloski, N. A. McCarthy, T. Huppertz, et al. // *Current Research in Food Science*. 2022. Vol. 5. P. 1701–1712. doi: 10.1016/j.crf.2022.09.026.
14. Invited review: Iodine level in dairy products – A feed-to-fork overview / G. Niero, G. Visentin, S. Censi, et al. // *Journal of Dairy Science*. 2023. Vol. 106. No. 4. P. 2213–2229. doi: 10.3168/jds.2022-22599.
15. The role of five key minerals (Cu, Se, Zn, Co, Fe) in reproductive function of female cattle: current insights and future directions / B. Wang, X. Li, Z. Zhou, et al. // *Veterinary Sciences*. 2026. Vol. 13. No. 2. Article 208. URL: <https://www.mdpi.com/2306-7381/13/2/208> (дата обращения: 28.02.2026). doi: 10.3390/vetsci1302020.
16. Spears J. W. Trace mineral bioavailability in ruminants // *Journal of Nutrition*. 2003. Vol. 133. No. 5. P. 1506–1509. doi: 10.1093/jn/133.5.1506S.
17. Lopez-Alonso M., Miranda M. Copper Supplementation, A Challenge in Cattle // *Animals (Basel)*. 2020. Vol. 10. No. 10. Article 1890. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/10/10/1890> (дата обращения: 23.02.2026). doi: 10.3390/ani10101890.
18. Siregar M., Salas-Solis G., Faciola A. P. Cobalt and Vitamin B12 in Dairy Cattle Nutrition: Requirements, Functions, and Interactions // *Animals (Basel)*. 2025. Vol. 15. No. 23. Article 3477. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/15/23/3477> (дата обращения: 23.02.2026). doi: 10.3390/ani15233477.
19. Effects of Zinc (Zn) from Different Sources on Production Performance, Health Status, Antioxidant Properties and Immune Regulation of Dairy Cows in Early Lactation / X. Li, J. Wang, M. Jiang, et al. // *Veterinary Sciences*. 2025. Vol. 12. No. 6. Article 545. URL: <https://www.mdpi.com/2306-7381/12/6/545> (дата обращения: 23.02.2026). doi: 10.3390/vetsci12060545.

References.

1. Notova SV, Marshinskaia OV, Kazakova TV. [Content of macro- and microelements in cow hair from different regions of Russia]. *Zhivotnovod Kormoproizvod*. 2021;104(3):8-16. doi: 10.33284/2658-3135-104-3-8. Russian.
2. Tarasova EI, Sizova EA, lausheva EV, et al. [Association of rs8193046 polymorphism of the TLR4 gene with the elemental composition of blood serum of Red Steppe cows]. *Agrar Nauka*. 2025;(10):121-32. doi: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-121-132. Russian.
3. Kumar S, Singh RV, Chauhan A, et al. Analysis of beta-casein gene (CSN2) polymorphism in Tharparkar and Frieswal cattle. *Indian J Anim Res [Internet]*. 2020 [cited 2026 Feb 23];54(1):1-5. Available from: <https://arccjournals.com/journal/indian-journal-of-animal-research/B-3724>. doi: 10.18805/ijar.B-3724.
4. Kovalyuk NV, Shakhnazarova YuYu, Iunitskaia VV. [Influence of CSN2 genotype on milk productivity of cows]. *Sbornik Nauch Trudov Krasnodar Nauchn Tsentr Zootekh Vet*. 2019;8(3):4-7. doi: 10.34617/kg1a-ez25. Russian.
5. Sandorova L, Feher PA, Ambagan AC, et al. Rapid direct CSN2 genotyping by PCR and its application in population genetics and A2 milk selection in Holstein cattle. *Dairy [Internet]*. 2026 [cited 2026 Feb 23];7(1):12. Available from: <https://www.mdpi.com/2624-862X/7/1/12>. doi: 10.3390/dairy7010012.
6. Kovalyuk NV, Satsuk VF, Kuleshova EA, et al. [Influence of CSN2 and CSN3 genotypes on milk productivity of Ayrshire cows]. *Molochn Myasn Skotovod*. 2021;(2):25-8. doi: 10.33943/MMS.2021.96.45.006. Russian.
7. Korneelaeva MV, Karlikova GG, Sermiagin AA. [Influence of CSN2 genotype on qualitative and quantitative characteristics of milk of Holstein cows]. *J Agric Environ [Internet]*. 2024 [cited 2026 Feb 23];(8(48)):1-10. Available from: <https://jae.cifra.science/archive/8-48-2024-august/10.60797/JAE.2024.48.2>. doi: 10.60797/JAE.2024.48.2.
8. Kalashnikova LA, Khabibrakhmanova YaA, Golubkov AI, et al. [Milk productivity of Red-Motley cows with different beta-casein genotypes]. *Molochn Myasn Skotovod*. 2022;(1):13-6. doi: 10.33943/MMS.2022.82.31.005. Russian.
9. Tsioulpas A, Lewis M, Grandison A. Effect of Minerals on Casein Micelle Stability of Cows' Milk. *J Dairy Res*. 2007;74:167-73. doi: 10.1017/S0022029906002330.
10. Runthala A, Mbye M, Ayyash M, et al. Caseins: Versatility of Their Micellar Organization in Relation to the Functional and Nutritional Properties of Milk. *Molecules [Internet]*. 2023 [cited 2026 Feb 23];28(5):2023. Available from: <https://www.mdpi.com/1420-3049/28/5/2023>. doi: 10.3390/molecules28052023.
11. Ma B, Al-Wraikat M, Shu Q, et al. An overview of interactions between goat milk casein and other food components: polysaccharides, polyphenols, and metal ions. *Foods [Internet]*. 2024 [cited 2026 Feb 23];13(18):2903. Available from: <https://www.mdpi.com/2304-8158/13/18/2903>. doi: 10.3390/foods13182903.
12. Sun Y, Ding Y, Liu B, et al. Recent advances in the bovine β -casein gene mutants on functional characteristics and nutritional health of dairy products: Status, challenges, and prospects. *Food Chem [Internet]*. 2024 [cited 2026 Feb 23];443:138510. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814624001584>. doi: 10.1016/j.foodchem.2024.138510.
13. Daniloski D, McCarthy NA, Huppertz T, et al. What is the impact of amino acid mutations in the primary structure of caseins on the composition and functionality of milk and dairy products? *Curr Res Food Sci*. 2022;5:1701-12. doi: 10.1016/j.crf.2022.09.026.
14. Niero G, Visentin G, Censi S, et al. Invited review: Iodine level in dairy products – A feed-to-fork overview. *J Dairy Sci*. 2023;106(4):2213-29. doi: 10.3168/jds.2022-22599.
15. Wang B, Li X, Zhou Z, et al. The role of five key minerals (Cu, Se, Zn, Co, Fe) in reproductive function of female cattle: current insights and future directions. *Vet Sci [Internet]*. 2026 [cited 2026 Feb 28];13(2):208. Available from: <https://www.mdpi.com/2306-7381/13/2/208>. doi: 10.3390/vetsci13020208.
16. Spears JW. Trace mineral bioavailability in ruminants. *J Nutr*. 2003;133(5):1506-9. doi: 10.1093/jn/133.5.1506S.
17. Lopez-Alonso M, Miranda M. Copper Supplementation, A Challenge in Cattle. *Animals (Basel) [Internet]*. 2020 [cited 2026 Feb 23];10(10):1890. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-2615/10/10/1890>. doi: 10.3390/ani10101890.
18. Siregar M, Salas-Solis G, Faciola AP, Cobalt and Vitamin B12 in Dairy Cattle Nutrition: Requirements, Functions, and Interactions. *Animals (Basel) [Internet]*. 2025 [cited 2026 Feb 23];15(23):3477. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-2615/15/23/3477>. doi: 10.3390/ani15233477.
19. Li X, Wang J, Jiang M, et al. Effects of Zinc (Zn) from Different Sources on Production Performance, Health Status, Antioxidant Properties and Immune Regulation of Dairy Cows in Early Lactation. *Vet Sci [Internet]*. 2025 [cited 2026 Feb 23];12(6):545. Available from: <https://www.mdpi.com/2306-7381/12/6/545>. doi: 10.3390/vetsci12060545.

Поступила в редакцию 09.03.2026 После доработки 30.03.2026 Принята к публикации 22.04.2026

Ассоциация полиморфизмов в генах *GHRL*, *GAST*, *SCTR* с конверсией корма и продуктивными показателями мясных кур селекции СГЦ «Смена»

Л. Г. КОРШУНОВА, Е. И. КУЛИКОВ, Д. М. ДМИТРЕНКО, Р. В. КАРАПЕТАН, А. К. КРАВЧЕНКО, В. Н. МАРТЫНОВА

Федеральный научный центр Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт птицеводства, ул. Птицеградская, 10, Сергиев Посад, Московская обл., 141311, Российская Федерация

Резюме. Исследования проводили с целью выявления генотипов однонуклеотидных полиморфизмов (SNP) в генах *GHRL*, *GAST* и *SCTR* для ранней оценки продуктивности птиц кросса «Смена 9». Работу выполняли на 170 петухах линий CM5/CM7 и 750 цыплятах-бройлерах финального гибрида CM5679 при индивидуальном контроле потребления корма в возрасте соответственно 36...42 суток и 21...42 сутки. Формирование групп осуществляли методом случайной выборки. Для идентификации полиморфизмов использовали генотипирование методом ПЦР-РВ с флуоресцентно-мечеными зондами. У петухов линии CM 5 гомозиготных по аллелю Т и гетерозиготных (ТС) по полиморфизму rs312295326, наблюдали лучшую конверсию корма в интервале с 36-го по 42-й день выращивания. Коэффициент конверсии корма (FCR) за этот период для птиц с генотипом ТТ был равен 1,89, ТС – 1,91. Генотип СС ассоциирован с ухудшением FCR на 7,3...8,5 % ($p < 0,05$). У бройлеров с полиморфными вариантами гена *SCTR* (rs314830059 и rs736374789) отмечены статистически значимые различия по эффективности конверсии корма (FCR). У птиц обоих полов с генотипом GG полиморфного варианта rs314830059 наблюдали ухудшение FCR на 8,6...16,9 %, по сравнению с генотипами GT и TT с 24-го по 33-й день ($p < 0,05$). У самок с генотипом GG полиморфного варианта rs736374789 зафиксировано более низкое значение FCR (от 2,18 до 2,48), по сравнению с особями, имеющими генотип GT (от 2,41 до 2,89), на 39, 40 и 42 сутки ($p < 0,05$). Выявленные SNP в генах *GHRL* (rs312295326), *SCTR* (rs314830059) и *SCTR* (rs736374789) могут быть интегрированы в программы геномной селекции, направленные на снижение FCR у кур мясного направления продуктивности.

Ключевые слова: куры, геном, SNP, конверсия корма, генотипирование, *GHRL*, *SCTR*, *GAST*, селекция, мясная продуктивность. **Сведения об авторах:** Л. Г. Коршунова, доктор биологических наук, главный научный сотрудник; Е. И. Куликов, научный сотрудник (e-mail: kulikovegor33@yandex.ru); Д. М. Дмитренко, аспирант; Р. В. Карапетян, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник; А. К. Кравченко, аспирант; В. Н. Мартынова, аспирант.

Для цитирования: Ассоциация полиморфизмов в генах *GHRL*, *GAST*, *SCTR* с конверсией корма и продуктивными показателями мясных кур селекции СГЦ «Смена» / Л. Г. Коршунова, Е. И. Куликов, Д. М. Дмитренко и др. // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. № 4. С. 76–82. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_76.

Association of polymorphisms in the *GHRL*, *GAST*, and *SCTR* genes with feed conversion and productivity indicators of meat chickens bred at the Smena Breeding Centre

L. G. Korshunova, E. I. Kulikov, D. M. Dmitrenko, R. V. Karapetyan, A. K. Kravchenko, V. N. Martynova

Federal Scientific Center All-Russian Research and Technological Poultry Institute, ul. Ptitsegradskaya, 10, Sergiev Posad, Moskovskaya obl., 141311, Russian Federation

Abstract. The study was conducted to identify the genotypes of single-nucleotide polymorphisms (SNPs) in the *GHRL*, *GAST*, and *SCTR* genes for early performance assessment in Smena 9 poultry. The study was performed on 170 CM5/CM7 roosters and 750 final-hybrid CM5679 broiler chickens with individual feed intake monitoring at ages 36-42 days and 21-42 days, respectively. Groups were formed randomly. Polymorphisms were identified using genotyping using real-time PCR with fluorescently labelled probes. CM5 roosters homozygous for the T allele and heterozygous (TC) for the rs312295326 polymorphism demonstrated improved feed conversion in the 36-42-day period. The feed conversion ratio (FCR) for this period was 1.89 for birds with the TT genotype and 1.91 for TC. The CC genotype was associated with a 7.3-8.5% decrease in FCR ($p < 0.05$). Statistically significant differences in feed conversion efficiency (FCR) were observed in broilers with polymorphic variants of the *SCTR* gene (rs314830059 and rs736374789). In birds of both sexes with the GG genotype of the rs314830059 polymorphic variant, a decrease in FCR by 8.6-16.9% was observed compared to the GT and TT genotypes from the 24th to the 33rd day ($p < 0.05$). Females with the GG genotype of the rs736374789 polymorphism showed a lower FCR (2.18 to 2.48) compared to individuals with the GT genotype (2.41 to 2.89) on days 39, 40, and 42 ($p < 0.05$). The identified SNPs in the *GHRL* (rs312295326), *SCTR* (rs314830059), and *SCTR* (rs736374789) genes can be integrated into genomic selection programmes aimed at reducing FCR in meat-producing chickens.

Keywords: chickens; genome; SNP; feed conversion ratio; genotyping; *GHRL*; *SCTR*; *GAST*; selection; meat productivity.

Author Details: L. G. Korshunova, D. Sc. (Biol.), chief research fellow; E. I. Kulikov, research fellow (e-mail: kulikovegor33@yandex.ru); D. M. Dmitrenko, post graduate student; R. V. Karapetyan, Cand. Sc. (Biol.), leading research fellow; A. K. Kravchenko, post graduate student; V. N. Martynova, post graduate student.

For citation: Korshunova LG, Kulikov EI, Dmitrenko DM, et al. [Association of polymorphisms in the *GHRL*, *GAST*, and *SCTR* genes with feed conversion and productivity indicators of meat chickens bred at the Smena Breeding Centre]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(4):76–82. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_76.

В селекции мясной птицы ключевой задачей считают повышение эффективности использования кормов, поскольку их стоимость составляет значительную часть себестоимости производства мяса. У современных бройлеров расходы на корма достигают 70 % от общих затрат, и только 55...60 % кормов используется на прирост и поддержание жизнедеятельности организма [1, 2].

Ранее селекционная работа с бройлерами была направлена на ускорение роста, при этом повышая эффективность использования кормов благодаря высокой корреляции между темпом роста и потреблением корма на килограмм прироста массы тела (косвенная селекция). В 1990-е годы акцент сместился на прямую селекцию с целью улучшения конверсии корма [3].

В СГЦ «Смена» применяют как косвенную (отбор по живой массе и мясным качествам), так и прямую (индивидуальная оценка потребления корма петухами) селекцию. За шесть поколений живая масса в 7...35 дней увеличилась на 3,3...19,3 %, а затраты корма снизились на 2,9...3,4 % [4].

Генетические аспекты потребления корма и биологические механизмы, регулирующие этот признак у кур, нуждаются в дополнительных исследованиях [5, 6]. Независимо от биологических процессов, оказывающих влияние на конверсию, получение ранних предиктивных маркеров эффективности потребления корма имеет первостепенное значение. В этом контексте геномная селекция представляет собой актуальный и необходимый инструмент, поскольку позволяет осуществлять раннюю селекцию без непосредственного измерения потребления корма [7, 8, 9]. На сегодняшний день селекционно-генетический центр по птицеводству не располагает техническими возможностями для проведения измерений коэффициента конверсии корма у большого поголовья птиц. Для получения высокоточных данных требуется организация кормления вволю, что при применении к самкам может негативно сказаться на яичной продуктивности кур в будущем из-за чрезмерного увеличения живой массы в раннем возрасте. В то же время, нормированное кормление позволяет контролировать физиологическое развитие птиц и обеспечивает оптимальное производство яиц, необходимое для воспроизводства и формирования последующих генераций исходных линий кросса.

Важность генетического компонента показателя конверсии корма стимулирует исследования по поиску однонуклеотидных полиморфизмов (SNP) в генах-кандидатах, регулирующих этот процесс.

В исследовании Esmatgholi B.H. с соавторами выявлено 119 однонуклеотидных полиморфизмов (SNP) в 20 хромосомах бройлеров, связанных с потреблением корма (FI), приростом массы тела (BWG) и коэффициентом конверсии корма (FCR). В эксперименте участвовало 1430 птиц, генотипированных микрочипом Affymetrix 600K. Определены новые геномные регионы и гены-кандидаты (*ATRNL1*, *PIK3C2A*, *PTPRN2*, *SORCS3*, *gga-mir-1759*), способствующие пониманию геномной архитектуры, влияющей на эффективность потребления корма. Результаты полезны для дальнейших исследований и практического применения в птицеводстве [10]. Marchesi J. с соавторами генотипировали 529 кур F_2 с использованием SNP-чипов (600K, Affymetrix®) и оценили наследуемость продуктивных характеристик. Показатели потребления, конверсии и эффективности корма имели низкую наследуемость (0,0002...0,1300), тогда как масса тела при вылуплении и в возрасте 35 и 41 дня имела высокую наследуемость (0,60...0,73). Анализ выявил 20 уникальных участков генома (1 Мб) на хромосомах GGA1–4, 6–7, 10, 14, 24, 27 и 28, связанных с массой тела. В этих областях обнаружено 38 генов-кандидатов, три из которых имели перекрывающиеся сигнатуры отбора. Шестнадцать SNP аннотированы в одиннадцати генах, связанных с остеогенезом, развитием мышц, ростом, метаболизмом и липидным обменом [11].

Результаты показывают возможность использования SNP-массива для выявления QTL, связанных с массой тела и ожирением. Они создают основу для функциональных исследований генов, регулирующих массу тела и отложения жира у кур, значимых для программ селекции [12].

Cai K. с соавторами провели анализ GWAS на курах породы Wenchang, выявив гены-кандидаты (*PLCE1*, *LAP3*, *MED28*, *QDPR*, *LDB2*, *SEL1L3*), влияющие на эффективность потребления корма и рост. Оценки наследуемости генома варьировали от 0,30 до 0,44 [13].

Цель исследования – выявить маркерные генотипы однонуклеотидных полиморфизмов (SNP) в генах *GHRL*, *GAST* и *SCTR*, ассоциированные с FCR, показателями убойного выхода и массой органов бройлеров для ранней оценки конверсии корма у кур и петухов кросса «Смена 9».

Условия, материалы и методы. Кросс мясных кур «Смена 9» выведен в рамках селекционной программы по созданию высокопродуктивной отечественной птицы. В процессе создания этого кросса реализован генетический потенциал двух исходных линий породы белый корниш для формирования отцовской формы (СМ 5 и СМ 6) и двух исходных линий породы белый плимутрок для создания материнской формы (СМ 7 и СМ 9) [14]. Линии СМ 5 и СМ 6 характеризуются высокой скоростью роста и значительным процентом выхода мышечной ткани, особенно в области грудных мышц у линии СМ 5. Линии СМ 7 и СМ 9 обладают генетическими вариантами, отвечающими за высокую и стабильную яйценоскость, раннее половое созревание, плотную конституцию, хорошую иммунологическую реактивность и резистентность, а также быструю адаптацию к условиям содержания и кормления. Линия СМ 7, как и линия СМ 5, выделяется по вкусовым качествам мясной продукции среди других линий.

Финальные гибриды, представляющие собой бройлеров, – четырехлинейные и их обозначают как СМ 5679 [14].

Исследование проведено на петухах (170 голов) двух отцовских линий (СМ 5, СМ 7) и финальном гибриде (цыплята-бройлеры, 750 голов) кросса «Смена 9». Эксперимент на линейной птице осуществлен в селекционно-генетическом центре (СГЦ) «Смена» (филиал Федерального научного центра «Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт птицеводства» (ФНЦ «ВНИТИП»)), применена методика прямой селекции, включающая индивидуальный анализ продуктивности петухов в возрасте 36...42 суток. Отбор выполняли на основе наилучших показателей живой массы, полученных у птиц, содержащихся в индивидуальных клетках, с дополнительным учетом потребления кормов и расчетом затрат корма на единицу прироста живой массы в течение семидневного периода. Учет поедаемости кормов вели по каждому петуху индивидуально за 7 суток (с 36 до 42 суток жизни). В возрасте 42 дней петухов взвешивали и рассчитывали затраты корма на 1 кг прироста живой массы за неделю. Содержание птицы – напольное, кормление – по нормам, принятым в СГЦ «Смена» и в соответствии с рекомендациями ВНИТИП [15].

Эксперимент на цыплятах-бройлерах проводили на базе СГЦ «Загорское ЭПХ» (филиал ФНЦ «ВНИТИП»). Эксперимент длился 42 дня. После вывода цыплята помечены специальными крыломметками для последующей их идентификации. Выращивание осуществляли в клеточных батареях с плотностью посадки 25 голов на 1 м² площади пола клетки. Кормление птицы осуществляли вволю, с использованием полнорационных рассыпных комбикормов, произведенных в кормоцехе «Загорское ЭПХ». Птица получала полнорационный комбикорм стартового (0...7 суток), ростового (8...21 суток) и финишного (22...42 суток)

периодов. Нормы питательности комбикормов соответствовали рекомендациям для бройлеров кросса «Смена 9» [15]. Учет индивидуального потребления корма проводили у цыплят, отобранных методом случайной выборки (100 голов) в возрасте 21...42 суток.

У всей опытной птицы отбирали пробы биоматериала (пульпа из маховых перьев крыла) для дальнейшего выделения и анализа ДНК.

ДНК выделяли набором ExtractDNA Blood & Cells, концентрацию и чистоту оценивали спектрофотометрически (Nanodrop 2000, Nano-500). Экзоны генов-кандидатов секвенировали по методу Сэнгера на анализаторе Нанофор-05; полиморфизмы отбирали на основании зоотехнических показателей (живая масса в 35 сут, FCR).

Для отобранных полиморфизмов создали и апробировали тест-системы с флуоресцентно-меченными зондами типа TaqMan для генотипирования методом ПЦР-РВ. ПЦР-РВ проводили на амплификаторе QuantStudio 5 Real-Time по следующему протоколу: первоначальная денатурация при 95 °C в течение 5 мин; далее 40 циклов: 95 °C – 30 сек; 55 °C – 30 сек; 72 °C – 30 сек. Детекцию флуоресценции проводили на стадии отжига праймеров и зондов. ПЦР-смесь для амплификации готовили из расчета на 1 пробу: 5 мкл смеси 5X qPCRmix-HS LowROX (Евроген, Россия), по 400 нг каждого праймера и по 250 нг каждого зонда, 1 мкл ДНК пробы (если её концентрация ≥ 100 нг/мкл), деионизированной водой доводили до финального объема 25 мкл.

На 36-е сутки провели убой 15 кур и 15 петухов для оценки убойных показателей и массы органов. На 42-е сутки эксперимента выполнили убой 25 голов петухов, у которых оценивали конверсию корма. Показатели убойных характеристик и массу органов оценивали на основании результатов анатомической разделки, выполненной в соответствии с методическими рекомендациями ВНИТИП [16].

Статистический анализ проводили в компьютерной программе Excel с помощью пакета «Анализ данных». Для анализа данных по фенотипическим признакам рассчитывали среднее значение признаков (M), стандартную ошибку среднего (m) и уровень статистической значимости различий (p). Оценку достоверности различий между группами проводили с использованием двухвыборочного t -критерия Стьюдента с неравными дисперсиями.

Результаты и обсуждение. Для анализа генетических факторов хозяйственно значимых фенотипов провели систематический поиск генов, связанных с эффективностью использования корма. В результате этого исследования идентифицированы и отобраны гены-кандидаты, включая *GHRL* (*Ghrelin*), *GAST* (*Gastrin*) и *SCTR* (*Secretin Receptor*).

В отобранных генах-кандидатах определено 4 полиморфизма в кодирующих частях генов (табл. 1), приводящих к замене аминокислотной последовательности (missense). У полиморфизма rs312295326 в гене *GHRL* происходит замена нуклеотида А на G во второй позиции кодона cAg $\rightarrow$ cGg, что приводит к аминокислотной замене глутамина (Q) на аргинин (R). У полиморфизма rs737207816 в гене *GAST* про-

исходит замена нуклеотида С на А во второй позиции кодона aCc $\rightarrow$ aAc, что приводит к замене треонина (Т) на аспарагин (N). У полиморфизма rs314830059 в гене *SCTR* происходит замена нуклеотида G на Т во второй позиции кодона tGt $\rightarrow$ tTt, что приводит к замене цистеина (C) на фенилаланин (F). У полиморфизма rs736374789 в гене *SCTR* происходит замена нуклеотида G на Т во второй позиции кодона aGc $\rightarrow$ aTc, что приводит к замене серина (S) на изолейцин (I).

Таблица 1. Однонуклеотидные полиморфизмы генов-кандидатов, связанных с конверсией и усвояемостью корма

Ген	Хромосома	Позиция полиморфизма в хромосоме (bGalGal1.mat.broiler.GRCg7b)	Название полиморфизма	Тип мутации	Кодон	Аминокислота
<i>GHRL</i>	12	19631150	rs312295326	missense	cAg/cGg	Q/R
<i>GAST</i>	27	4644972	rs737207816	missense	aCc/aAc	T/N
<i>SCTR</i>	7	27977752	rs314830059	missense	tGt/tTt	C/F
<i>SCTR</i>	7	27971055	rs736374789	missense	aGc/aTc	S/I

По результатам проведенного секвенирования разработаны тест-системы для полиморфизмов-кандидатов генов *GHRL*, *SCTR* и *GAST*:

Для rs312295326 использовали праймеры прямой (TACTCAAGTTCATGTRCTTC) и обратный (AGAATGTAACCATGTGAAAG), а также аллель-специфические зонды: 5'-FAM-TTAGAAACTCAGACAAAA-BHQ1 и 5'-VIC-TTAGAAACTCGGACAAAA-BHQ2.

Для rs314830059 использовали праймеры прямой (CTTCTCTTCAACCTATAGMC) и обратный (AGTCCTGCCCRRAACATC), а также аллель-специфические зонды: 5'-FAM-CCATTTTCTCCTGTGAG-BHQ1 и 5'-VIC-CCATTTTCTCCTGTGAG-BHQ2.

Для rs736374789 использовали праймеры прямой (KGAAGAGAAGCATTGGC) и обратный (AAGCACCTACCAGAACG), а также аллель-специфические зонды: 5'-FAM-AGGGGAGCTGAGAGCCAG-BHQ1 и 5'-VIC-AGGGGAGCTGAGATCCAG-BHQ2.

Для rs737207816 использовали праймеры прямой (CCATGAAACGAAGGTG) и обратный (TGAAGGGAGAGGGTCAG), а также аллель-специфические зонды: 5'-FAM-CAGGCTGGAGGTGGGGC-BHQ1 и 5'-VIC-CAGGCTGGAGTTGGGGC-BHQ2.

Разработанные тест-системы обеспечивают специфичную амплификацию и детекцию целевых аллелей в условиях ПЦР в реальном времени.

Проведен анализ FCR у петухов исходных линий породы Корниш с различными генотипами по полиморфизмам генов *GHRL* и *GAST* за период с 36 по 42 сутки и показано, что частоты встречаемости аллеля Т полиморфизма rs312295326 и аллеля А полиморфизма rs737207816 были значительно выше альтернативных аллелей и составляли более 77 % по всем группам (табл. 2).

У петухов линии CM 5, гомозиготных по аллели ТТ и гетерозиготных ТС в гене *GHRL* (rs312295326), наблюдали лучшую конверсию корма в интервале с 36-го по 42-й день выращивания. Коэффициент конверсии корма (FCR) за этот период составил 1,89 и 1,91 для аллели ТТ и ТС соответственно. Генотип СС характеризуется увеличением FCR до 2,05. Аллельный вариант СС полиморфизма rs312295326 гена *GHRL* приводит к ухудшению показателя FCR на 7,3...8,5 %, что оказывает отрицательное влияние на экономическую эффективность производства бройлеров. Различия по показателю FCR были статистически значимыми у петухов

Таблица 2. Коэффициент конверсии корма в зависимости от генотипа по SNP в генах *GHRL*, *GAST* у петухов (♂) линий CM5 и CM7 кросса «Смена 9» за период с 36 по 42 сутки, кг корма/кг прироста

Ген (полиморфизм)	Линия кур	Генотип (число носителей)		
<i>GHRL</i> rs312295326	CM 5	TT (n = 59)	TC (n = 25)	CC (n = 2)
		1,89±0,04 ^A	1,91±0,07 ^A	2,05±0,01 ^B
	CM 7	TT (n = 52)	TC (n = 27)	CC (n = 5)
<i>GAST</i> rs737207816	CM 5	CC (n = 5)	CA (n = 8)	AA (n = 73)
		1,94±0,20	1,89±0,12	1,90±0,04
	CM 7	CC	CA (n = 22)	AA (n = 62)
		–	2,02±0,07	2,03±0,05

^{A, B} различия между средними значениями в группах, обозначенных разными буквами, достоверны при $p < 0,05$ (здесь и далее).

линии CM5 ($p < 0,05$) и демонстрируют схожую тенденцию у петухов линии CM7, но без статистически значимых различий в связи с высокой вариабельностью исследуемого показателя у особей с генотипом CC.

Эффективность использования кормов – основополагающий экономический фактор, который определяет успешность селекционных программ в птицеводстве. В последние годы проведен обширный комплекс экспериментальных исследований, направленных на выявление биологических различий между фенотипами кур с высокой и низкой конверсией корма. Результаты этих исследований находят практическое применение в селекционных программах, ориентированных на улучшение продуктивных показателей птицы [11, 17].

Для выявления генетических вариаций, влияющих на конверсию корма у бройлеров в исследовании Shah T.M. et al., анализировали

SNP по всему геному. В экспериментальной популяции обнаружено 192119 высококачественных SNP, из которых 30380 кодирующих. Выявлены SNP, коррелирующие с коэффициентом конверсии корма [9].

Гены грелина (*GHRL*) и его рецептора (*GHSR*) оказывают существенное влияние на массу тела, прирост массы, потребление корма и коэффициент конверсии корма у различных видов животных. Тем не менее, исследования, направленные на изучение связи генов *GHRL* с указанными показателями у кур, представлены в научной литературе относительно редко.

Продemonстрировано, что однонуклеотидный полиморфизм (SNP) rs15675067 гена *GHRL* достоверно коррелирует с показателями живой массы, прироста живой массы и коэффициента конверсии корма ($p < 0,05$). Более того, гаплотипы на основе трех SNP: rs14986828, rs15675067 и rs15675065 гена *GHRL*, также достоверно связаны с живой массой и коэффициентом конверсии корма у бройлеров ($p < 0,05$) [18].

В результате исследований выявлено влияние полиморфизма rs312295326 гена *GHRL* на показатель конверсии корма самок с генотипом CC полиморфизма rs312295326 за 36...42 сутки выращивания (табл. 3).

Статистически значимые различия с ухудшением FCR на 6,5...10,2 % определены у самок в возрастной пе-

риод с 36 по 42 день. Кроме того, наблюдали тенденцию к увеличению коэффициента конверсии у особей обоих полов в течение предшествующих 24...35 дней эксперимента.

В ходе исследования не выявлено статистически значимых ассоциаций между показателями FCR и генотипами *GAST* (полиморфизм rs737207816) ни в одном из возрастных периодов птицы. Важно отметить, что для отдельных генотипов (например, CC в линии CM5) объем выборки был недостаточен ($n=5$), что привело к высокой стандартной ошибке среднего значения. В связи с этим при интерпретации отсутствия статистически значимых различий по гену *GAST* нельзя исключить вероятность ошибки II рода, так как малый объем выборки не позволяет сделать однозначных выводов об отсутствии эффекта.

Аллельный вариант CC полиморфизма rs312295326 гена *GHRL* приводит к ухудшению показателя FCR. Исследование, проведенное как для исходных линий, так и для цыплят-бройлеров, показало согласованность результатов. Эти данные свидетельствуют о том, что генотип CC – фактор, оказывающий негативное влияние на коэффициент конверсии корма у кур и, соответственно, на экономическую эффективность производства бройлеров.

Таблица 3. Динамика коэффициента конверсии корма в зависимости от возрастного периода бройлеров и генотипа по SNP в генах *GHRL*, *GAST*, кг корма/кг прироста

Период, сутки	Генотип (число носителей)					
	самцы			самки		
GHRL rs312295326						
	TT (n = 31)	TC (n = 10)	CC (n = 5)	TT (n = 26)	TC (n = 10)	CC (n = 10)
24...28	1,73±0,02	1,72±0,04	1,99±0,22	1,85±0,05	1,88±0,08	1,94±0,09
29...35	1,92±0,03	1,92±0,09	1,97±0,12	2,05±0,06	2,03±0,06	2,14±0,08
36...42	2,52±0,09	2,54±0,12	2,69±0,23	2,47±0,08 ^A	2,57±0,08 ^{AB}	2,75±0,13 ^B
GAST rs737207816						
	CC	CA (n = 12)	AA (n = 33)	CC	CA (n = 19)	AA (n = 26)
24...28	—	1,77±0,05	1,75±0,04	—	1,91±0,07	1,85±0,04
29...35	—	1,89±0,04	1,94±0,04	—	2,09±0,07	2,05±0,05
36...42	—	2,61±0,12	2,53±0,09	—	2,60±0,11	2,50±0,07
24...42	—	2,11±0,07	2,04±0,04	—	2,17±0,08	2,04±0,07

Частота встречаемости аллеля G полиморфизма rs314830059 в гене *SCTR* у самцов составила 45 %, у самок – 56 %, что свидетельствует о равновесии с альтернативным аллелем T (табл. 4). Выявлены статистически значимые различия в коэффициенте конверсии корма в зависимости от генотипа как у петушков, так и у курочек. В частности, наблюдали повышение этого показателя у птиц с генотипом GG. У петухов с генотипом GG наблюдалось повышение FCR в диапазоне от 12,9% до 24,7%, в то время как у кур этот показатель увеличивался на 8,6%...16,4% по сравнению с генотипами GT/TT. Эта тенденция сохранялась на 26, 30 и 33 у самцов и на 27-29, 32 и 33 сутки у самок. Следует отметить, что при проведении множественных сравнений возрастает риск ошибки I рода. В настоящем исследовании поправки на множественные сравнения не применялись, что необходимо учитывать при интерпретации полученных результатов.

При проведении анализа влияния полиморфизма rs736374789 в гене *SCTR* на показатель коэффициента конверсии корма у цыплят-бройлеров с 36 по 42 сутки жизни определено только два генотипа GG и GT при доминировании гомозиготного генотипа с частотой встречаемости 68 % у самцов и 70 % у самок (табл. 5). Установлены статистически значимые различия в

Таблица 4. Ассоциация SNP rs314830059 в гене SCTR с FCR у бройлеров в период ежедневного мониторинга с 24-го по 33-й день жизни, кг корма/кг прироста

Воз- раст, сутки	Генотип (число носителей)					
	самцы			самки		
	GG (n = 10)	GT (n = 22)	TT (n = 15)	GG (n = 15)	GT (n = 23)	TT (n = 9)
24	1,66±0,08	1,72±0,07	1,84±0,08	2,01±0,08	2,03±0,10	1,75±0,15
25	1,62±0,07	1,55±0,07	1,55±0,06	1,76±0,08	1,67±0,08	1,87±0,16
26	1,75±0,07 ^A	1,57±0,04 ^B	1,55±0,06 ^B	1,73±0,09	1,66±0,04	1,73±0,08
27	2,08±0,12	1,91±0,09	1,89±0,05	2,00±0,08 ^A	1,83±0,05 ^B	2,00±0,12 ^{AB}
28	1,91±0,10	1,92±0,06	1,81±0,06	2,02±0,05 ^A	1,86±0,08 ^B	2,03±0,14 ^{AB}
29	2,08±0,15	1,95±0,10	1,90±0,08	2,27±0,10 ^A	1,95±0,06 ^B	2,03±0,12 ^{AB}
30	2,07±0,13 ^A	1,68±0,08 ^B	1,66±0,04 ^B	2,01±0,09	1,82±0,09	2,07±0,15
31	1,82±0,15	1,91±0,07	1,83±0,10	1,96±0,10	1,97±0,07	1,98±0,09
32	1,85±0,09	1,91±0,10	1,92±0,10	2,27±0,12 ^A	2,02±0,08 ^B	2,02±0,17 ^{AB}
33	2,04±0,13 ^A	1,74±0,07 ^B	1,84±0,09 ^{AB}	2,08±0,11 ^A	1,89±0,09 ^{AB}	1,78±0,10 ^B

эффективности усвоения корма между самками с генотипами GT и GG на 39, 40 и 42 дни эксперимента. Бройлеры (♀) с генотипом GG показали более низкий FCR в диапазоне от 2,18 до 2,48, в сравнении с особями, имеющими генотип GT, у которых FCR составил от 2,41 до 2,89. В исследуемой выборке не выявлено птиц с генотипом TT, что может быть связано с его негативным влиянием и последующим исключением в процессе селекции. Для группы самцов не установлено статистически значимых корреляций с показателем конверсии корма.

Таблица 5. Ассоциация полиморфизма rs736374789 в гене SCTR с коэффициентом конверсии корма у бройлеров в период ежедневного мониторинга с 36-го по 42-й день жизни, кг корма/кг прироста

Воз- раст, сутки	Генотип (число носителей)			
	самки		самцы	
	GG (n = 30)	GT (n = 14)	GG (n = 33)	GT (n = 14)
36	2,52±0,09	2,72±0,14	2,23±0,09	2,35±0,16
37	1,95±0,10	2,11±0,15	2,23±0,11	2,15±0,25
38	2,40±0,10	2,40±0,15	2,29±0,10	2,42±0,19
39	2,18±0,08 ^A	2,41±0,10 ^B	2,19±0,12	2,21±0,18
40	2,36±0,09 ^A	2,63±0,13 ^B	2,44±0,11	2,23±0,16
41	2,58±0,09	2,73±0,14	2,66±0,13	2,61±0,16
42	2,48±0,12 ^A	2,89±0,16 ^B	2,23±0,12	2,11±0,17
36...42	2,50±0,08	2,64±0,07	2,55±0,09	2,55±0,09

Значительная часть энергии для организма поступает через метаболизм в желудочно-кишечном тракте и печени. Изучение этих органов важно для понимания генетических механизмов, влияющих на коэффициент конверсии корма. Для изучения показателей убойного выхода и массы внутренних органов у бройлеров, ассоциированных с полиморфизмом гена *GHRL*, проведён убой в возрасте 36 дней. При исследовании самцов определена всего одна особь с генотипом CC, что не позволяет проводить сравнения с остальными группами (табл. 6).

Таблица 6. Ассоциации генотипических вариаций по SNP rs312295326 в гене GHRL с показателями убойного выхода и массы органов бройлеров в возрасте 36 дней

Показатель	Самки			Самцы		
	TT (n=9)	TC (n=5)	CC (n=1)*	TT (n=7)	TC (n=3)	CC (n=5)
Масса, г: предубойная живая	2288,2±56,7	2112,0±92,3	-	2571,1±66,2	2536,0±160,8	2645,8±97,1
потрошенной тушки	1696,6±43,8	1594,7±77,7	-	1883,5±48,1	1845,0±121,0	1959,0±67,0
Убойный выход, %	74,1	75,4	-	73,3	72,7	74,1
Масса печени, г	55,3±3,7 ^A	45,3±2,6 ^B	-	64,5±3,6	60,9±3,7	57,9±4,9
Масса желудка, г	12,7±0,7	12,0±0,7	-	13,4±1,4	17,2±4,1	14,9±0,5

*данные не получены из-за малой численности группы.

Результаты показали увеличение убойного выхода и массы потрошённой тушки у особей, обладающих генотипом TC, по сравнению с представителями групп с генотипами TT и CC. Также установлено достоверное увеличение массы печени у курочек 36-дневного возраста с генотипом TT. Масса печени у курочек с генотипом TT составила 55,27±3,71 г, тогда как у особей с генотипом TC – 45,28±2,63 г.

Масса печени бройлеров зависела от генотипа *GHRL* (rs312295326), что указывает на возможное влияние грелина на метаболизм липидов и углеводов. При проведении сравнительного анализа генетических вариантов TT и TC в аспекте массы печени и продуктивности следует принимать во внимание возрастные особенности динамики морфологических изменений внутренних органов, в особенности пищеварительной системы, у цыплят-бройлеров [19]. На 36-е сутки у самок с генотипом TT наблюдается более высокая масса печени и предубойная живая масса по сравнению с гетерозиготами TC. Это может свидетельствовать о более интенсивных процессах роста и липогенеза на ранних стадиях онтогенеза. Увеличение массы печени у быстрорастущих бройлеров часто коррелирует с усилением липогенеза и накоплением липидов.

Для подтверждения влияния исследуемого полиморфизма на убойные показатели и массу внутренних органов, выполнен убой 25 самцов в возрасте 42 суток. Результаты убоя на 42-е сутки эксперимента демонстрируют, что у особей с генотипом TC наблюдаются более высокие убойный выход и масса потрошённой тушки по сравнению с представителями групп с генотипами TT и CC полиморфизма rs312295326 гена *GHRL* (табл. 7).

Данные результаты указывают на более эффективное использование питательных веществ на заключительных этапах выращивания. Примечательно, что при повышении убойного выхода у цыплят с генотипом TC отмечается достоверное снижение массы желудка до 15,7±0,7 в сравнении с особями, обладающими генотипом CC, у которых величина этого показателя составляла 17,8±0,7 г.

Выявленные различия могут свидетельствовать о смене метаболических приоритетов в зависимости от возраста. Генотип TT ассоциирован с более интенсивным ростом и, вероятно, накоплением липидов на 36-е сутки выращивания, тогда как генотип TC связан с более эффективным перераспределением питательных

Таблица 7. Ассоциация генотипа по SNP rs312295326 в гене *GHRL* с показателями убойного выхода и массы органов бройлеров (♂) в возрасте 42 дня

Показатель	ТТ (n = 14)	ТС (n = 6)	СС (n = 5)
Предубойная живая масса, г	3254,3±53,0	3343,0±65,7	3291,8±153,7
Масса потрошенной тушки, г	2388,1±43,8 ^А	2565,7±59,2 ^В	2452,0±124,0 ^{АВ}
Убойный выход, %	73,4 ^В	76,7 ^А	74,5 ^В
Масса печени, г	62,56±2,5	66,2±3,0	62,3±4,4
Желудок, г	17,3±0,5 ^{АВ}	15,7±0,7 ^А	17,8±0,7 ^В

веществ в пользу мышечной ткани и повышением убойного выхода на заключительных этапах выращивания. Снижение массы печени у гетерозигот ТС не следует однозначно интерпретировать как признак замедленного роста; скорее, это может отражать особенности метаболической регуляции, проявляющиеся на различных возрастных этапах [20]. Генетические факторы оказывают значительное влияние на метаболизм белков и рост животных, включая птиц. Ранее установлены корреляции между SNP генов грелина и грелин-рецептора и процессами жиросотложения у птиц [21].

Выводы. Ассоциации SNP в генетических локусах *GHRL* (rs312295326) и *SCTR* (rs736374789, rs314830059) с показателями конверсии корма, убойными характеристиками и массой внутренних органов выявили значимые генотипы. Генотип СС гена *GHRL* (rs312295326) характеризуется ухудшением коэффициента конверсии корма (FCR) на 7,3...8,5% по сравнению с аллельными вариантами Т и гетерозиготой ТС.

В отношении полиморфного варианта гена *SCTR* (rs314830059), генотип GG демонстрирует увеличение FCR на 8,6...16,9 % по сравнению с генотипами GT и TT в период с 24-го по 33-й день. Для полиморфного варианта гена *SCTR* (rs736374789) у самок бройлеров с генотипом GG наблюдается более низкое значение FCR, варьирующее от 2,18 до 2,58, в сравнении с особями с генотипом GT, у которых FCR составляет от 2,41 до 2,73, в возрастной период с 39-го по 42-й день.

Выявленные генотипы могут быть полезны для

практического применения в программах геномной селекции, направленных на улучшение показателей конверсии корма у мясных кур селекции СГЦ «Смена». Необходимо вести отбор особей с генотипом ТТ гена *GHRL*

(rs312295326), ТТ гена *SCTR* (rs314830059) и GG гена *SCTR* (rs736374789) для дальнейшего разведения с целью снижения коэффициента конверсии корма. Наиболее эффективная методика закрепления таких генотипов – отбор по полиморфизмам в исходных линиях кросса. Использование пульпы пера, как материала для исследований, позволяет проводить генотипирование уже на ранних этапах бонитировки птицы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Статья подготовлена в соответствии с тематическим планом ФНЦ «ВНИТИП» (№ Гос. рег. 124031400010-6) «Изучение генетической структуры и идентификация генов, ассоциированных с хозяйственно-полезными и воспроизводительными качествами кур отечественных кроссов с целью разработки эффективных технологий маркер-ассоциированной селекции в птицеводстве».

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Исследования проведены в соответствии с Рекомендацией Коллегии Евразийской экономической комиссии от 14 ноября 2023 г. № 33 «О Руководстве по работе с лабораторными (экспериментальными) животными при проведении доклинических (неклинических) исследований». Протоколы с использованием животных были одобрены Комиссией по биоэтике ФНЦ «ВНИТИП» (протокол № 7 от 3 февраля 2025 г.).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Feed Conversion Ratio (FCR) and Performance Group Estimation Based on Predicted Feed Intake for the Optimisation of Beef Production / C. Davison, C. Michie, C. Tachtatzis, et al. // *Sensors* (Basel). 2023. Vol. 23. No. 10. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/10/4621> (дата обращения: 20.11.2025). doi: 10.3390/s23104621.
2. Prakash A., Saxena V., Singh M. Genetic analysis of residual feed intake, feed conversion ratio and related growth parameters in broiler chicken: a review // *World's Poultry Science Journal*. 2020. Vol. 76. No. 2. P. 309–322. doi: 10.1080/00439339.2020.1735978.
3. Гальперн И. Л. Селекционно-генетические методы и программы выведения новых линий и создания конкурентноспособных кроссов яичных и мясных кур. Санкт-Петербург: ВНИИГРЖ, 2010. 264 с.
4. Индивидуальная прямая селекция по конверсии корма племенных мясных петухов породы корниш в СГЦ «Смена» / Ж. В. Емануйлова, А. В. Егорова, Д. Н. Ефимов и др. // *Птицеводство*. 2024. № 11. С. 17–24. doi: 10.33845/0033-3239-2024-73-11-17-24.
5. Pedigree and genomic analyses of feed consumption and residual feed intake in laying hens / A. Wolc, J. Arango, T. Jankowski, et al. // *Poult Sci*. 2013. Vol. 92. No. 9. P. 2270–2275. doi: 10.3382/ps.2013-03085.
6. Genetic aspects of feed efficiency and reduction of environmental footprint in broilers: a review / E. Sell-Kubiak, K. Wimmers, H. Reyer, et al. // *J Appl Genet*. 2017. Vol. 58. No. 4. P. 487–498. doi: 10.1007/s13353-017-0392-7.
7. Ассоциации однонуклеотидных замен в генах-кандидатах с хозяйственно полезными признаками у кур (*Gallus gallus domesticus* L.) (обзор) / Л. Г. Коршунова, Р. В. Карапетян, А. С. Комарчев и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2023. Т. 58. № 2. С. 205–222. doi: 10.15389/agrobiol.2023.2.205rus.
8. Novel insight into the feed conversion ratio in laying hens and construction of its prediction model / Y. Li, R. Ma, R. Qi, et al. // *Poult Sci*. 2024. Vol. 103. No. 10. Article 104013. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579124005923> (дата обращения: 20.11.2025). doi: 10.1016/j.psj.2024.104013.
9. A genome-wide approach to screen for genetic variants in broilers (*Gallus gallus*) with divergent feed conversion ratio / T. M. Shah, N. V. Patel, A. B. Patel, et al. // *Mol Genet Genomics*. 2016. Vol. 291. No. 4. P. 1715–1725. doi: 10.1007/s00438-016-1213-0.
10. Genomic dissection and prediction of feed intake and residual feed intake traits using a longitudinal model in F2 chickens / H. Emamgholi Begli, R. Vaez Torshizi, A. Masoudi, et al. // *Animal*. 2018. Vol. 12. No. 9. P. 1792–1798. doi: 10.1017/s1751731117003354.
11. Exploring the genetic architecture of feed efficiency traits in chickens / J. Marchesi, R. Ono, M. Cantao, et al. // *Sci Rep*. 2021. Vol. 11. No. 1. Article 4622. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-84125-9> (дата обращения: 21.11.2025). doi: 10.1038/s41598-021-84125-9.
12. Unraveling genomic associations with feed efficiency and body weight traits in chickens through an integrative approach / G. Moreira, M. Poleti, F. Pertille, et al. // *BMC Genet*. 2019. Vol. 20. No. 1. Article 83. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s12863-019-0783-3> (дата обращения: 21.11.2025). doi: 10.1186/s12863-019-0783-3.

13. Genome-wide association analysis identify candidate genes for feed efficiency and growth traits in Wenchang chickens / K. Cai, R. Liu, L. Wei, et al. // *BMC Genomics*. 2024. Vol. 25. No. 1. Article 645. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s12864-024-10559-w> (дата обращения: 21.11.2025). doi: 10.1186/s12864-024-10559-w.
14. Новый высокопродуктивный отечественный кросс мясных кур "Смена 9" / Ж. В. Емануилова, А. В. Егорова, Д. Н. Ефимов и др. // *Аграрная наука*. 2021. № 7-8. С. 33–36. doi: 10.32634/0869-8155-2021-351-7-8-33-36.
15. Руководство по работе с птицей мясного кросса "Смена 9" с аутоксесной материнской родительской формой. / Ефимов Д.Н., Егорова А.В., Емануилова Ж.В. и др. / ред. В. И. Фисинин. Сергиев Посад: ФНЦ "ВНИТИП" РАН, 2021. 95 с.
16. Методика проведения анатомической разделки тушек, органолептической оценки качества мяса и яиц сельскохозяйственной птицы и морфологии яиц / М. А. Лысенко, Т. А. Столляр, А. Ш. Кавтарашвили и др. Сергиев Посад: ВНИТИП РАН, 2013. 35 с.
17. Urgessa O., Woldesemayat A. OMICs approaches and technologies for understanding low-high feed efficiency traits in chicken: implication to breeding // *Anim Biotechnol*. 2023. Vol. 34. No. 8. P. 4147–4166. doi: 10.1080/10495398.2023.2187404.
18. Associations of polymorphisms in GHRL, GHSR, and IGF1R genes with feed efficiency in chickens / S. Jin, S. Chen, H. Li, et al. // *Mol Biol Rep*. 2014. Vol. 41. No. 6. P. 3973–3979. doi: 10.1007/s11033-014-3265-8.
19. Дымков А. Б., Ядрищенская О. А., Егорова Т. А. Возрастная динамика усвоения питательных веществ корма и развития органов пищеварения цыплят-бройлеров // *Птицеводство*. 2026. No. 2. P. 36–41 doi: 10.33845/0033-3239-2026-75-2-36-41.
20. Effect of Dietary Crude Protein Reduction Levels on Performance, Nutrient Digestibility, Nitrogen Utilization, Blood Parameters, Meat Quality, and Welfare Index of Broilers in Welfare-Friendly Environments / J. Son, W. D. Lee, C. H. Kim, et al. // *Animals (Basel)*. 2024. Vol. 14. No. 21. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/14/21/3131> (дата обращения: 25.11.2025). doi: 10.3390/ani14213131.
21. Molecular characterization of the ghrelin and ghrelin receptor genes and effects on fat deposition in chicken and duck / Q. Nie, M. Fang, L. Xie, et al. // *J Biomed Biotechnol*. 2009. Vol. 2009. Article 567120. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2009/567120> (дата обращения: 25.11.2025). doi: 10.1155/2009/567120.

References.

1. Davison C, Michie C, Tachtatzis C, et al. Feed Conversion Ratio (FCR) and Performance Group Estimation Based on Predicted Feed Intake for the Optimisation of Beef Production. *Sensors (Basel)* [Internet]. 2023[cited 2025 Nov 20];23(10):4621. Available from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/10/4621>. doi: 10.3390/s23104621.
2. Prakash A, Saxena V, Singh M. Genetic analysis of residual feed intake, feed conversion ratio and related growth parameters in broiler chicken: a review. *Worlds Poult Sci J*. 2020;76(2):309-22. doi: 10.1080/00439339.2020.1735978.
3. Gal'pern IL. [Selection-genetic methods and programs for breeding new lines and creating competitive crosses of egg and meat chickens]. Saint Petersburg: VNIIGRZh; 2010. 264 p. Russian.
4. Emanuilova ZhV, Egorova AV, Efimov DN, et al. [Individual direct selection for feed conversion of breeding meat roosters of the Cornish breed at SGC "Smena"]. *Ptitsevodstvo*. 2024;(11):17-24. doi: 10.33845/0033-3239-2024-73-11-17-24. Russian.
5. Wolc A, Arango J, Jankowski T, et al. Pedigree and genomic analyses of feed consumption and residual feed intake in laying hens. *Poult Sci*. 2013;92(9):2270-5. doi: 10.3382/ps.2013-03085.
6. Sell-Kubiak E, Wimmers K, Reyer H, et al. Genetic aspects of feed efficiency and reduction of environmental footprint in broilers: a review. *J Appl Genet*. 2017;58(4):487-98. doi: 10.1007/s13353-017-0392-7.
7. Korshunova LG, Karapetian RV, Komarchev AS, et al. [Associations of single nucleotide substitutions in candidate genes with economically useful traits in chickens (*Gallus gallus domesticus* L.) (review)]. *Sel'sk Khoziastvennaia Biologiya*. 2023;58(2):205-22. doi: 10.15389/agrobiologiya.2023.2.205rus. Russian.
8. Li Y, Ma R, Qi R, et al. Novel insight into the feed conversion ratio in laying hens and construction of its prediction model. *Poult Sci* [Internet]. 2024[cited 2025 Nov 20];103(10):104013. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579124005923>. doi: 10.1016/j.psj.2024.104013.
9. Shah TM, Patel NV, Patel AB, et al. A genome-wide approach to screen for genetic variants in broilers (*Gallus gallus*) with divergent feed conversion ratio. *Mol Genet Genomics*. 2016;291(4):1715-25. doi: 10.1007/s00438-016-1213-0.
10. Emamgholi Begli H, Vaez Torshizi R, Masoudi A, et al. Genomic dissection and prediction of feed intake and residual feed intake traits using a longitudinal model in F2 chickens. *Animal*. 2018;12(9):1792-8. doi: 10.1017/s1751731117003354.
11. Marchesi J, Ono R, Cantao M, et al. Exploring the genetic architecture of feed efficiency traits in chickens. *Sci Rep* [Internet]. 2021[cited 2025 Nov 21];11(1):4622. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-84125-9>. doi: 10.1038/s41598-021-84125-9.
12. Moreira G, Poletti M, Pertille F, et al. Unraveling genomic associations with feed efficiency and body weight traits in chickens through an integrative approach. *BMC Genet* [Internet]. 2019[cited 2025 Nov 21];20(1):83. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1186/s12863-019-0783-3>. doi: 10.1186/s12863-019-0783-3.
13. Cai K, Liu R, Wei L, et al. Genome-wide association analysis identify candidate genes for feed efficiency and growth traits in Wenchang chickens. *BMC Genomics* [Internet]. 2024[cited 2025 Nov 21];25(1):645. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1186/s12864-024-10559-w>. doi: 10.1186/s12864-024-10559-w.
14. Emanuilova ZhV, Egorova AV, Efimov DN, et al. [New highly productive domestic cross of meat chickens "Smena 9"]. *Agrar Nauka*. 2021;(7-8):33-6. doi: 10.32634/0869-8155-2021-351-7-8-33-36. Russian.
15. Efimov DN, Egorova AV, Emanuilova ZhV, et al. [Manual for working with meat cross "Smena 9" with autosex maternal parent form]. Fisinin VI, editor. Serгиеv Posad: FNTs "VNIITIP" RAN; 2021. 95 p. Russian.
16. Lysenko MA, Stollar TA, Kavtarashvili AS, et al. [Methodology for anatomical dissection of carcasses, organoleptic assessment of meat and egg quality of poultry and egg morphology]. Serгиеv Posad: VNIITIP RAN; 2013. 35 p. Russian.
17. Urgessa O, Woldesemayat A. OMICs approaches and technologies for understanding low-high feed efficiency traits in chicken: implication to breeding. *Anim Biotechnol*. 2023;34(8):4147-66. doi: 10.1080/10495398.2023.2187404.
18. Jin S, Chen S, Li H, et al. Associations of polymorphisms in GHRL, GHSR, and IGF1R genes with feed efficiency in chickens. *Mol Biol Rep*. 2014;41(6):3973-9. doi: 10.1007/s11033-014-3265-8.
19. Dymkov AB, Iadrishchenskaia OA, Egorova TA. [Age-related dynamics of nutrient assimilation and development of the digestive system of broiler chickens]. *Ptitsevodstvo*. 2026;(2):36-41. doi: 10.33845/0033-3239-2026-75-2-36-41. Russian.
20. Son J, Lee WD, Kim CH, et al. Effect of Dietary Crude Protein Reduction Levels on Performance, Nutrient Digestibility, Nitrogen Utilization, Blood Parameters, Meat Quality, and Welfare Index of Broilers in Welfare-Friendly Environments. *Animals (Basel)* [Internet]. 2024[cited 2025 Nov 25];14(21):3131. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-2615/14/21/3131>. doi: 10.3390/ani14213131.
21. Nie Q, Fang M, Xie L, et al. Molecular characterization of the ghrelin and ghrelin receptor genes and effects on fat deposition in chicken and duck. *J Biomed Biotechnol* [Internet]. 2009[cited 2025 Nov 25];2009:567120. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2009/567120>. doi: 10.1155/2009/567120.

Поступила в редакцию 02.03.2026 После доработки 07.04.2026 Принята к публикации 22.04.2026

Иммуногематологические показатели у коров в зависимости от функционального состояния печени и стадии производственного цикла

Е. О. КУЗНЕЦОВА, А. И. БЕЛОУСОВ, О. Ю. ОПАРИНА, А. С. КРАСНОПЕРОВ, А. Е. ЧЕРНИЦКИЙ

Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», ул. Белинского, 112а, Екатеринбург, 620142, Российская Федерация

Резюме. Цель исследований – выявить и количественно описать изменения иммуногематологических показателей у коров на разных стадиях производственного цикла в зависимости от функционального состояния их печени для разработки диагностических и лечебно-профилактических мероприятий. Исследование проводили на 274 коровах: новотельных ($n = 60$), лактирующих ($n = 60$), раннего ($n = 87$) и позднего сухостоя ($n = 67$). Функциональное состояние печени классифицировали ретроспективно на нормальный (NMP), напряжённый (SMP) и патологический профили (PMP) по пороговым значениям активности в сыворотке крови аспартатаминотрансферазы, глутаматдегидрогеназы, гамма-глутамилтрансферазы, щелочной фосфатазы и содержания общего билирубина, иммуногематологический профиль оценивали по лейкоцитарной формуле, значениям фагоцитарной активности (ФА) и фагоцитарного индекса. У SMP-животных ФА была снижена до 44,0 % (при NMP 49,0 %), а содержание лейкоцитов в крови – до $7,65 \times 10^9/\text{л}$ (при NMP $9,34 \times 10^9/\text{л}$). У новотельных коров с PMP абсолютное содержание лейкоцитов в крови снижалось до $7,53 \times 10^9/\text{л}$, а ФА составила 48,0 %. Для лактирующих животных с SMP и PMP типичными были супрессия адаптивного иммунитета и активация воспалительного ответа: относительное содержание лимфоцитов в их крови уменьшалось соответственно до 44,0 % и 45,5 %, сегментоядерных нейтрофилов – возрастало до 41,5 % и 41,0 %. У коров с SMP супрессия адаптивного иммунитета сохранялась и в ранний сухостойный период: относительное содержание лимфоцитов в крови было понижено до 44,0 %, а сегментоядерных нейтрофилов – повышено до 43,0 %, происходило снижение ФА до 45,0 %. Для PMP-животных в этот период типичным было повышение в крови относительного содержания моноцитов до 4,50 %. В поздний сухостойный период у коров с SMP наблюдали снижение в крови относительного содержания эозинофилов (до 4,0 %) и моноцитов (3,0 %), с PMP – снижение фагоцитарной активности нейтрофилов и моноцитов (до 38,0 %) при росте доли сегментоядерных нейтрофилов (до 35,0 %). Таким образом, показатели лейкоцитарной формулы и ФА у коров с SMP и PMP на разных стадиях производственного цикла имеют специфический профиль, отличающий их от здоровых животных, что необходимо учитывать при разработке диагностических и лечебно-профилактических мероприятий.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, иммунный профиль, лейкоцитарная формула, производственный цикл, функциональное состояние печени.

Сведения об авторах: Е. О. Кузнецова, старший специалист (e-mail: kuzjene@gmail.com); А. И. Белоусов, доктор ветеринарных наук, ведущий научный сотрудник (e-mail: white-knight@mail.ru); О. Ю. Опарина, кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник (e-mail: olia91oparina@yandex.ru); А. С. Красноперов, кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник (e-mail: marafon.86@list.ru); А. Е. Черницкий, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник (e-mail: cherae@mail.ru).

Для цитирования: Иммуногематологические показатели у коров в зависимости от функционального состояния печени и стадии производственного цикла / Е. О. Кузнецова, А. И. Белоусов, О. Ю. Опарина и др. // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. № 4. С. 83–90. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_83.

Immunohematological parameters in cows depending on the functional state of the liver and the stage of the production cycle

E. O. Kuznetsova, A. I. Belousov, O. Yu. Oparina, A. S. Krasnoperov, A. E. Chernitskiy

Ural Federal Agrarian Scientific Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Belinskogo, 112a, Yekaterinburg, 620142, Russian Federation

Abstract. The study aimed to identify and quantify changes in immunohematological parameters in cows at different stages of the production cycle depending on the functional state of their liver, to develop diagnostic, therapeutic and preventive measures. The study was conducted on 274 cows: fresh ($n = 60$), lactating ($n = 60$), early ($n = 87$) and late dry cows ($n = 67$). The functional state of the liver was classified retrospectively into normal (NMP), stressed (SMP) and pathological profiles (PMP) based on the threshold values of aspartate aminotransferase, glutamate dehydrogenase, gamma-glutamyl transferase, alkaline phosphatase and total bilirubin levels in the blood serum. The immunohematological profile was assessed based on the white blood cell count, phagocytic activity (PA) values and the phagocytic index. In SMP animals, PA was reduced to 44.0% (with NMP 49.0%), and the leukocyte count in the blood was reduced to $7.65 \times 10^9/\text{L}$ (with NMP $9.34 \times 10^9/\text{L}$). In fresh cows with PMP, the absolute leukocyte count in the blood decreased to $7.53 \times 10^9/\text{L}$, and PA was 48.0%. Suppression of adaptive immunity and activation of the inflammatory response were typical for lactating animals with SMP and PMP: the relative content of lymphocytes in their blood decreased to 44.0% and 45.5%, respectively, while segmented neutrophils increased to 41.5% and 41.0%. In cows with SMP, suppression of adaptive immunity persisted in the early dry period: the relative content of lymphocytes in the blood was reduced to 44.0%, and that of segmented neutrophils increased to 43.0%, with a decrease in PA to 45.0%. For PMP animals during this period, an increase in the relative content of monocytes in the blood to 4.50% was typical. In the late dry period, in cows with SMP, a decrease in the relative content of eosinophils (to 4.0%) and monocytes (3.0%) was observed in the blood; with PMP, a decrease in the phagocytic activity of neutrophils and monocytes (to 38.0%) with an increase in the proportion of segmented neutrophils (to 35.0%). Thus, the white blood cell count and PA parameters in cows with SMP and PMP at different stages of the production cycle have a specific profile that distinguishes them from healthy animals, which must be taken into account when developing diagnostic, therapeutic, and preventive measures.

Keywords: cattle; immune profile; white blood cell count; production cycle; liver function.

Author Details: E. O. Kuznetsova, senior specialist (e-mail: kuzjene@gmail.com); A. I. Belousov, D. Sc. (Vet.), leading research fellow (e-mail: white-knight@mail.ru); O. Yu. Oparina, Cand. Sc. (Vet.), senior research fellow (e-mail: olia91oparina@yandex.ru); A. S. Krasnoperov, Cand. Sc. (Vet.), senior research fellow (e-mail: marafon.86@list.ru); A. E. Chernitskiy, D. Sc. (Biol.), leading research fellow (e-mail: cherae@mail.ru).

For citation: Kuznetsova EO, Belousov AI, Oparina OYu, et al. [Immunohematological parameters in cows depending on the functional state of the liver and the stage of the production cycle]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(4):83–90. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_83.

Со сменой стадий производственного цикла у коров происходит значительная перестройка физиологических процессов, требующая скоординированной работы эндокринной, иммунной и пищеварительной систем [1, 2, 3]. Известно, что иммуногематологические показатели у коров значительно изменяются при беременности [4, 5, 6]. На ранних сроках стельности моноциты мигрируют в эндометрий и дифференцируются в дендритные клетки, участвующие в формировании плаценты [4, 5]. Имплантация эмбриона сопровождается локальной воспалительной реакцией и системными сдвигами лейкоцитарной формулы, иногда с увеличением абсолютного содержания лимфоцитов на 33...34-й день в связи с противовоспалительным ответом [5]. В середине беременности иммуногематологические показатели, как правило, стабилизируются, хотя уровень гранулоцитов может повышаться под влиянием прогестерона и технологического стресса [4, 5]. В период раннего сухостоя у коров наблюдают в большинстве случаев подавление клеточного звена иммунитета – снижение абсолютного содержания Т-лимфоцитов, дисбаланс в соотношении Т/В, изменения качественных и количественных характеристик фагоцитирующих клеток [7]. В период позднего сухостоя возможно частичное восстановление баланса между основными показателями иммунитета [7].

С другой стороны, нарушения технологии содержания и кормления животных приводят к усиленной нагрузке на обменные процессы организма, способствующие формированию и развитию патологических состояний гепатобилиарной системы у коров [2, 8, 9]. Последние могут протекать как в клинической, так и в субклинической форме, сопровождаясь изменениями энергетического и пигментного обмена, детоксикационной функции и гемопоэза [1, 10, 11]. При функциональном напряжении печени количество эритроцитов, гемоглобина, лейкоцитов, эозинофилов и лимфоцитов в крови существенно снижается [11]. Одновременно отмечают нарушение белкового и липидного обмена, дефицит микроэлементов (меди, цинка, марганца, железа, селена) и повышение показателей эндогенной интоксикации [1]. Все это негативно влияет на иммунореактивность животных, их продуктивность и воспроизводительную способность [2].

Комплексная оценка иммуногематологических показателей в привязке к грациям функционального состояния печени остаётся недостаточно изученной, что требует дифференцированного подхода к диагностике переходных периодов.

Цель работы – выявить и количественно описать изменения иммуногематологических показателей у коров на разных стадиях производственного цикла в зависимости от функционального состояния их печени, для разработки научно-обоснованных диагностических и лечебно-профилактических мероприятий.

Условия, материалы и методы. Эксперименты выполняли в 2023–2025 гг. в животноводческих хозяйствах Свердловской области, благополучных по инфекционным заболеваниям. В опыт включали коров (n=274), с продуктивностью 8000...11000 кг молока за 305 дней предыдущей лактации. Все животные находились в стандартных условиях содержания и кормления (Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 21 октября 2020 г. № 622 «Об утверждении Ветеринарных правил содержания крупного рогатого скота в целях его воспроизводства, выращивания и реализации» <https://base.garant.ru/74832099>). Коровы были рас-

пределены по стадиям производственного цикла: новотельные (1...14-е сутки после отёла, n= 60), лактирующие (90...250-е сутки после отёла, n = 60), животные раннего (301...345-е сутки после отёла, n = 87) и позднего сухостоя (346...360-е сутки после отёла, n = 67).

Кровь для биохимических и иммунологических исследований отбирали из хвостовой вены в утренние часы до кормления в две пробирки. В первую пробирку с ЭДТА отбирали кровь (274 пробы) для иммунологических исследований; анализ клеточного состава и функциональной активности лейкоцитов проводили в день взятия проб. Во вторую пробирку без антикоагулянта собирали кровь (274 пробы) для получения сыворотки крови.

В цельной крови выполняли дифференциальный подсчет лейкоцитов в мазках, окрашенных по Романовскому-Гимзе, на микроскопе Olympus BX43 (Olympus, Япония), исследовали фагоцитарную активность (%) и фагоцитарный индекс (у.е.) нейтрофилов и моноцитов, используя в качестве объекта фагоцитоза латексные частицы [12].

Исследование сыворотки крови выполняли на автоматическом анализаторе ChemWell 2910 Combi (Awareness Technology, США) с диагностическими наборами фирм Vital Diagnostics Spb (Россия), DIALAB GmbH (Австрия), HUMAN (Германия): оценивали активность аланинаминотрансферазы (АЛТ), аспартатаминотрансферазы (АсАТ), гамма-глутамилтрансферазы (ГГТ), глутаматдегидрогеназы (ГлДГ), щёлочной фосфатазы (ЩФ), КФК, концентрацию общего билирубина.

Функциональное состояние печени коров классифицировали ретроспективно на нормальный, напряжённый и патологический профили (табл. 1) [13, 14].

Статистическую обработку проводили в IBM SPSS Statistics v.26 (IBM Corp., США) и Microsoft Excel 2021 (Microsoft Corp., США). Вариабельность биохимических показателей оценивали по коэффициенту вариации (CV, %). Нормальность распределения оценивали с применением теста Шапиро-Уилка. Количественные данные представляли в виде медианы (Med) и межквартильного размаха (Q_1 ... Q_3). Связи между стадией производственного цикла и частотой нарушений функции печени определяли по χ^2 -критерию Пирсона и коэффициенту V Крамера. Достоверность различий между группами выявляли с помощью U-теста Манна-Уитни. Различия считали значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. У 73,3 % обследованных новотельных животных активность АсАТ превышала норму на 1,00...66,0 ед./л [15], а её медиана составила 114,5 ед./л (табл. 2). В работах других авторов так же упоминается о наибольшей активности АсАТ в послеродовой период [16]. После отёла у коров развивается отрицательный энергетический баланс, связанный с

Таблица 1. Биохимические критерии для оценки функционального состояния печени у коров

Показатель	Группа коров в зависимости от метаболического профиля печени		
	нормальный (норма)	напряжённый	патологический
АсАТ, ед./л	43,0...102,0	102,0...150,0	>150,0
ГлДГ, ед./л	0,0...50,0	50,0...80,0	>80,0
КФК, ед./л	57,0...290,0	57,0...290,0	57,0...290,0
ЩФ, ед./л	36,0...100,0	>100,0	>100,0
ГГТ, ед./л	8,0...26,0	26,0...35,0	>35,0
Общий билирубин, ммоль/л	<8,0	8,0...16,0	>16,0

Таблица 2. Биохимические показатели сыворотки крови у коров на разных стадиях производственного цикла

Показатель	CV, %	Норма [13, 14]	Группа коров в зависимости от стадии производственного цикла			
			новотельные (n = 60)	лактующие (n = 60)	ранний сухостой (n = 87)	поздний сухостой (n = 67)
АсАТ, ед./л	36,1	43,0...102,0	114,5 (102,5...135,0)	111,0 (83,0...137,0)	89,0** (77,0...103,0)	101,0**** (89,5...126,0)
ГлДГ, ед./л	53,9	11,5...50,0	29,1 (19,9...46,0)	35,2* (26,4...54,4)	34,4 (23,7...46,4)	22,0**** (15,1...38,3)
КФК, ед./л	227,6	84,3...290,0	191,1 (125,3...345,5)	159,1* (109,2...206,5)	122,3*** 99,7...149,6)	122,9* (86,4...185,2)
ЩФ, ед./л	43,6	39,0...100,0	67,5 (51,5...95,3)	66,0 (54,0...79,0)	64,0 (50,0...83,0)	68,0 (51,8...82,3)
ГГТ, ед./л	32,1	10,9...26,0	13,9 (11,9...19,4)	16,9 (12,6...21,0)	26,0*** (19,1...33,4)	20,5**** (14,6...28,5)
Общий билирубин, мкмоль/л	164,5	≥8,0	1,15 (0...5,45)	0,50 (0...2,20)	1,90** (0...5,80)	1,90*** (0...3,90)

Здесь и в табл. 3, 4 данные представлены в виде: медиана (квартили Q_1 ... Q_3) *, **, *** – соответственно различия, по сравнению с группой новотельных, лактирующих и сухостойных коров, достоверны при $p < 0,05$.

резким увеличением потребности в энергии для лактации при ограниченном потреблении корма. В ответ происходит усиление процессов липомобилизации, приводящее к поступлению в печень большого количества свободных жирных кислот. Избыточное их накопление вызывает жировую инфильтрацию и окислительный стресс, повреждающий мембраны гепатоцитов и способствующий выходу АсАТ в кровотоки [3]. Временное повышение активности АсАТ в послеродовой период считают нормальной адаптационной реакцией организма коров, однако это состояние требует контроля для предотвращения развития патологии печени [16].

Активность КФК также была пиковой в новотельный период (191,1 ед./л), превышая показатели у лактирующих и сухостойных коров на 20,1 % и 56,6 %, соответственно ($p < 0,05$). Такие значения активности фермента связаны с физиологическим стрессом, сопровождающим роды и начало лактации [3]. В этот период у животных отмечают значительные мышечные нагрузки, связанные с родовой деятельностью и восстановлением матки после родов, а также активацию катаболических процессов и изменение энергетического обмена [3].

Характерной особенностью лактирующих коров была повышенная активность сывороточных АсАТ и ГлДГ. Первая превышала медианные значения в группе раннего сухостоя на 24,7 % ($p < 0,05$) и позднего сухостоя на 9,90 % ($p < 0,05$), вторая – у новотельных животных на 20,9 % ($p < 0,05$), в группе позднего сухостоя на 60,0 % ($p < 0,05$). Такой ферментный профиль сыворотки крови у лактирующих животных указывал на временное усиление митохондриальных дисфункций и нарушение энергетического обмена в гепатоцитах [17]. При этом уровень общего билирубина оставался минимальным – 0,5 мкмоль/л, что отражает ускоренный метаболизм пигментов и активное включение их в обменные процессы. Активность клеток моноцитарно-макрофагального звена у лактирующих коров

была выше, чем у животных группы раннего и позднего сухостоя на 2,00 % ($p < 0,05$) и 8,00 % ($p < 0,05$) соответственно (табл. 3). В то же время относительное содержание лимфоцитов в их крови было минимальным: на 4,50 % ниже, чем у новотельной группы, и на 4,00 % ниже, чем у коров позднего сухостоя ($p < 0,05$), соответственно. Повышение фагоцитарной активности нейтрофилов при одновременном снижении доли лимфоцитов в крови отражает состояние относительной иммунологической стабильности, характерное для начала и середины стельности [18, 19].

Во время беременности иммунитет коровы поэтапно перестраивается: в начале и середине стельности (лактация и ранний сухостой) преобладает относительная активация врожденного звена. Такой тип реакции близок к воспалительно-регуляторному профилю, необходимому для нормальной имплантации и формирования плаценты, но при этом не вызывает чрезмерного воспаления [18, 19]. Одновременно происходит умеренное снижение активности адаптивного иммунитета, что предотвращает иммунологическое отторжение плода [18, 19]. К концу беременности активность клеток моноцитарно-макрофагального звена снижается вследствие перехода иммунной системы в провоспалительный режим, подготавливающий организм коровы к родам [18, 19].

У коров группы раннего сухостоя активность АсАТ в сыворотке крови (89,0 ед./л) находилась в пределах физиологических границ [13, 14], что свидетельствовало о снижении интенсивности метаболизма и минимальной функциональной нагрузке на печень [17]. Активность сывороточной ГГТ у коров в эту стадию производственного цикла была на верхней границе нормы [13, 14] и заметно выше, чем у группы новотельных (в 1,90 раза, $p < 0,05$), лактирующих животных (в 1,54 раза, $p < 0,05$), а также особой группы позднего сухостоя (в 1,30 раза, $p < 0,05$), что отражает активацию

Таблица 3. Иммуногематологические показатели у коров на разных стадиях производственного цикла

Показатель	Норма [15]	Группа коров в зависимости от стадии производственного цикла			
		новотельные (n = 60)	лактующие (n = 60)	ранний сухостой (n = 87)	поздний сухостой (n = 67)
Фагоцитарная активность, %	45...60	48,0 (42,5...51,0)	50,0 (44,0...59,0)	48,0** (42,0...53,0)	42,0**** (37,0...48,0)
Фагоцитарный индекс, у.е.	5,0...10,0	5,40 (4,35...5,80)	5,60 (4,80...6,80)	5,40 (5,0...6,50)	5,20**** (4,60...5,60)
Лейкоциты, 10^9 /л	4,5...12	8,21 (6,45...9,99)	7,85 (7,15...9,49)	8,88 (7,31...9,99)	8,25 (7,21...9,7)
Нейтрофилы, %:	0...1	0 (0...0)	0 (0...0)	0 (0...0)	0 (0-0)
палочко-ядерные	2,0...5,0	2,0 (1,25...4,0)	3,0 (2,0...4,0)	2,0 (1,0...4,0)	2,0 (1,0-5,0)
сегменто-ядерные	15,0...35,0	35,0 (27,0...44,0)	37,0* (34,0...46,0)	39,0* (32,0...46,0)	33,0**** (25,0-40,0)
Эозинофилы, %	3,0...11,0	3,0 (1,0...6,0)	3,50 (1,25...8,0)	5,0* (2,0...7,0)	4,0* (2,0...9,0)
Базофилы, %	0...2,0	0 (0...1,0)	1,0* (0...2,0)	1,0* (0...1,0)	0 (0...1,0)
Моноциты, %	2,0...7,0	4,0 (2,0...7,0)	4,0 (2,0...6,0)	3,0 (2,0...5,0)	4,0 (2,0...5,0)
Лимфоциты, %	40,0...75,0	52,5 (43,8...60,8)	48,0* (40,0...55,0)	47,0* (42,0...54,0)	52,0**** (43,0...63,0)

цию их желчевыводящей системы. Уровень билирубина в сыворотке крови при этом был в 3,80 раза выше ($p < 0,05$), чем у лактирующих животных, что связано с замедлением процессов детоксикации (см. табл. 2), а фагоцитарная активность на 2,0 % ниже ($p < 0,05$).

У коров группы позднего сухостоя активность ГлДГ в сыворотке крови была минимальной (22,0 ед./л): на 37,5 % ниже, чем у лактирующих животных ($p < 0,05$) и на 36,0 % ниже, чем в группе раннего сухостоя ($p < 0,05$) (см. табл. 2). При этом активность ГГТ оставалась стабильно высокой (20,5 ед./л), превышая показатели у новотельных (в 1,50 раза, $p < 0,05$) и лактирующих коров (в 1,21 раза, $p < 0,05$). Уровень билирубина составил 1,90 мкмоль/л – выше, чем в лактацию в 3,80 раза ($p < 0,05$). Согласно Rodriguez et al. [20], у стельных коров в этот период отмечается уменьшение концентрации метаболитов, отражающих интенсивность энергетического обмена, и снижение активности ферментов, участвующих в окислительных процессах, включая ГлДГ. Du et al. [21], в своей работе показали, что при изменении липидного и желчного обменов у животных может возрастать активность ГГТ и содержание билирубина как следствие адаптационного напряжения гепатобилиарной системы. Это указывает на снижение детоксикационной функции печени и тенденцию к холестатическим явлениям в конце сухостоя.

Фагоцитарная активность нейтрофилов и моноцитов и фагоцитарный индекс у коров группы позднего сухостоя находились у нижней границы физиологического интервала (см. табл. 3). Доля сегментоядерных нейтрофилов в их крови была минимальной (33,0 %), тогда как уровень лимфоцитов достигал максимума – 52,0 %, превышая на 8,00 % и 6,00 % ($p < 0,05$), соответственно, уровни в группах лактации и раннего сухостоя. Такие изменения отражают развитие физиологической иммуносупрессии врожденного звена и усиление регуляторных механизмов адаптивного иммунитета, необходимые для того, чтобы обеспечить сохранение беременности и подготовку организма к родам [18, 19].

В поздний сухостойный период у коров происходит снижение активности врожденного иммунитета и фагоцитоза для предотвращения чрезмерного воспаления и обеспечения иммунной толерантности к плоду. После отёла, напротив, наблюдают временное ослабление неспецифической защиты вследствие энергетического дефицита, гормональной перестройки и стресса, связанного с родами [18, 19].

Значения коэффициентов вариации по большинству исследованных биохимических показателей превышали 40,0 %, что указывало на выраженную неоднородность исследуемой выборки и различный уровень метаболического напряжения у животных.

Таблица 4. Иммуногематологические показатели у обследуемых коров в зависимости от метаболического профиля печени

Показатель	Норма [15]	Группа коров в зависимости от метаболического профиля печени		
		нормальный (n = 78)	напряженный (n = 146)	патологический (n = 50)
Фагоцитарная активность, %	45...60	48,0 (43,0...52,0)	45,0* (40,0...52,0)	45,0* (40,0...52,0)
Фагоцитарная индекс, у.е.	5,0...10,0	5,40 (4,90...6,20)	5,30 (4,68...6,10)	5,50 (4,80...6,30)
Лейкоциты, 10 ⁹ /л	4,5...12	8,45 (7,32...10,0)	8,29 (6,96...9,87)	8,16 (7,16...9,71)
Нейтро- филы, %:	0...1	0 (0...0)	0 (0...0)	0 (0...0)
палочкоядерные	2,0...5,0	3,0 (2,0...4,0)	2,0 (1,0...4,0)	2,0 (2,0...4,0)
сегментоядерные	15,0...35,0	34,5 (29,8...40,0)	37,0* (30,8...47,0)	37,5* (29,5...43,3)
Эозинофилы, %	3,0...11,0	5,0 (2,0...8,0)	4,0 (2,0...8,0)	4,0 (2,0...7,25)
Базофилы, %	0...2,0	0 (0...1,0)	0 (0...1,0)	1,0 (0...2,0)
Моноциты, %	2,0...7,0	3,0 (2,0...5,25)	4,0 (2,0...6,0)	4,0 (2,0...5,25)
Лимфоциты, %	40,0...75,0	52,0 (45,0...59,0)	48,0* (40,0...57,3)	49,5 (42,0...59,0)

В связи с этим для дальнейшей оценки влияния функционального состояния печени на иммунный профиль была проведена ретроспективная классификация коров по критериям А. И. Белоусова и соавт. [13] и И. А. Никулина и соавт. [14], на основании которой все обследуемые животные были разделены на три группы: с нормальным (n = 78), напряженным (n = 146) и патологическим (n = 50) метаболическим профилем печени.

В новотельный период лишь 20,0 % животных сохраняли нормальный метаболический профиль печени, что объясняется высокой нагрузкой, связанной с отёлом и началом лактации (рис. 1) [2]. В период лактации, несмотря на сохраняющуюся метаболическую нагрузку, количество коров с нормальным метаболическим профилем печени было наибольшим (36,6 %), что отражает успешную адаптацию гепатоцитов к длительной функциональной активности.

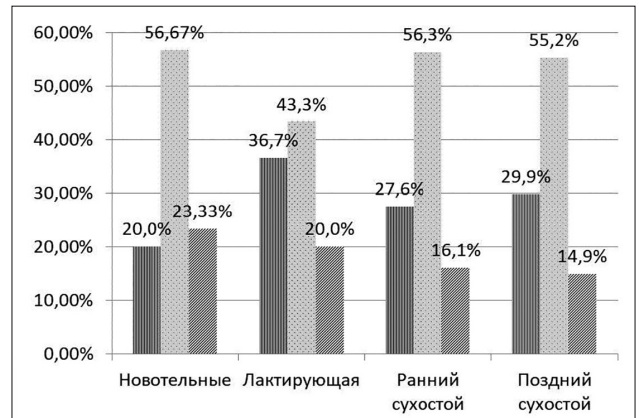


Рис. 1. Распределение коров (%) с нормальным, напряженным и патологическим метаболическим профилями печени в зависимости от стадии производственного цикла: ■ – нормальный, ▨ – напряженный, ■ – патологический.

В ранний и поздний сухостойный периоды доля животных с нормальным метаболическим профилем печени занимала промежуточное положение среди других групп (соответственно 27,5 % и 29,8 %), связанную со снижением функциональной нагрузки на печень при отсутствии выраженной тканевой деструкции.

Однако критерии χ^2 Пирсона и V Крамера показали отсутствие статистически значимой зависимости между стадией производственного цикла и функциональным состоянием печени у коров ($\chi^2 = 5,05$, $p = 0,168$; V Крамера = 0,134) и то, что стадия цикла не была единственным определяющим фактором развития нарушения функций печени [22, 23]. При парном сравнении статистически значимые различия

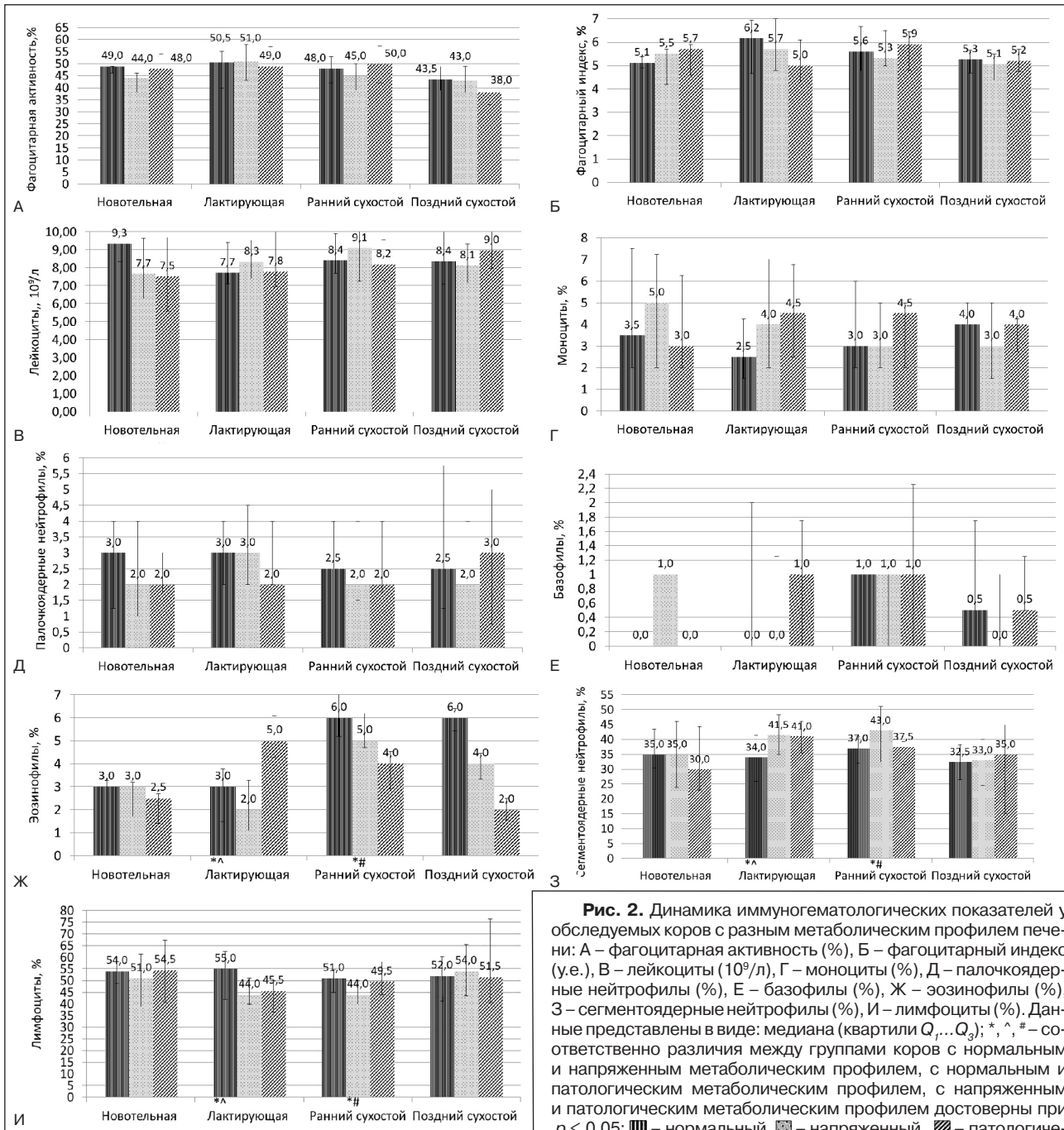


Рис. 2. Динамика иммуногематологических показателей у обследуемых коров с разным метаболическим профилем печени: А – фагоцитарная активность (%), Б – фагоцитарный индекс (у.е.), В – лейкоциты ($10^9/l$), Г – моноциты (%), Д – палочкоядерные нейтрофилы (%), Е – базофилы (%), Ж – эозинофилы (%), З – сегментоядерные нейтрофилы (%), И – лимфоциты (%). Данные представлены в виде: медиана (квартили $Q_1, \dots, Q_3$); *, ^, # – соответственно различия между группами коров с нормальным и напряженным метаболическим профилем, с нормальным и патологическим метаболическим профилем достоверны при $p < 0,05$; ■ – нормальный, ▨ – напряженный, ▩ – патологический метаболический профиль.

выявлены между группами коров в новотельный и лактационный периоды ($\chi^2 = 5,04$; $p = 0,024$).

Известно, что нарушения функционального состояния печени у коров снижают эффективность обезвреживания токсинов и вызывают активацию механизмов системного воспалительного ответа [2, 8, 24]. Наши данные показали возрастание в крови животных с напряженным и патологическим метаболическим профилем печени относительного содержания сегментоядерных нейтрофилов на 7,20 % и 8,70 % соответственно, и снижение фагоцитарной активности нейтрофилов и моноцитов на 6,30 % и 6,30 % и относительного содержания лимфоцитов на 7,70 % и 4,80 % соответственно, по сравнению с особями с нормальным метаболическим профилем (табл. 4). Выявленные изменения свидетельствуют об активации гранулоцитопозза на фоне функционального истощения фагоцитирующих клеток [24].

У коров с нормальным метаболическим профилем

печени в новотельный период показатель фагоцитарной активности нейтрофилов и моноцитов был выше ($p < 0,05$), чем в поздний сухостой, на 12,6 % (рис. 2А). У лактирующих животных наблюдали повышение фагоцитарной активности нейтрофилов и моноцитов на 16,1 % по сравнению с поздним сухостоем (см. рис. 2А). При этом в группе раннего сухостоя фагоцитарный индекс был на 6,7 % выше ($p < 0,05$), чем в позднем (см. рис. 2Б). Указанные изменения отражают физиологическую перестройку иммунной системы коров перед отёлом и в начале лактации, когда под влиянием метаболического стресса и перераспределения питательных веществ активность фагоцитов крови временно снижается [25, 26]. Постепенное восстановление фагоцитарного индекса (см. рис. 2Б) в сухостойном периоде свидетельствует о нормализации функциональной активности нейтрофилов и моноцитов, а увеличение доли эозинофилов (см. рис. 2Ж) – об активации грану-

лоцитарного звена и адаптации животных к изменяющимся метаболическим условиям [27]. При напряжённом метаболическом профиле печени у коров отмечали рост доли сегментоядерных нейтрофилов в крови (см. рис. 23), что указывало на нарушение регуляции гранулоцитарного звена и ослабление функциональной активности врождённого иммунитета.

Результаты текущего исследования показывают, что выраженность иммунных изменений зависит не только от смены стадий производственного цикла, но и от функционального состояния печени животных.

Известно, что в переходный период (новотельный и поздний сухостойный) преимущественно изменяются показатели врождённого звена иммунитета [25, 26]. Так, у обследованных коров с напряжённым метаболическим профилем печени в новотельный период фагоцитарная активность нейтрофилов и моноцитов была ниже на 10,2 % ($p < 0,05$) по сравнению с особями с нормальным профилем (см. рис. 2А). У животных с патологическим метаболическим профилем печени в этот период происходит снижение синтеза белков плазмы и накопление токсических метаболитов [1], что приводит к угнетению фагоцитоза и активации базофилов в крови (см. рис. 2А, 2Е). В поздний сухостойный период для таких животных характерным было повышение содержания эозинофилов в крови (см. рис. 2Ж). При этом у них могут включаться компенсаторные механизмы, направленные на восстановление гомеостаза, что частично выравнивает показатели крови относительно животных без нарушений функции печени [28]. Снижение абсолютного содержания лейкоцитов в крови (см. рис. 2В) у коров с патологическим метаболическим профилем печени на 19,4 % ($p < 0,05$) по сравнению с нормальным может быть связано с повышенной секрецией кортизола. Так, по литературным данным, высокий уровень кортизола в переходный период подавляет активность и миграцию лейкоцитов, ограничивая выраженность воспалительных процессов [29]. Кроме того, часть лейкоцитов активно перемещается из периферической крови в ткани матки, молочной железы и плаценты, где они выполняют локальные защитные функции [24].

В период лактации, характеризующейся длительной метаболической нагрузкой, нарушения функции печени негативно влияют на адаптивный иммунитет и предрасполагают к развитию воспаления [30]. В этот период относительное содержание сегментоядерных нейтрофилов (см. рис. 23) у обследованных коров с напряжённым и патологическим метаболическим профилем печени было соответственно выше на 22,1 % и 20,6 % ($p < 0,05$), чем у животных с нормальным профилем. При этом доля лимфоцитов в крови (рис. 2И), напротив, была ниже на 20,0 % и 17,3 % ($p < 0,05$) соответственно, по сравнению с животными с нормальным профилем. Соотношение нейтрофилов и лимфоцитов в период лактации является индикатором метаболического статуса животных и функционального состояния их печени: у здоровых оно отражает физиологическую мобилизацию иммунной системы, а при нарушениях гепатобилиарной системы – патологическую активацию воспалительных механизмов [27].

У обследуемых коров в ранний сухостой относительное содержание сегментоядерных нейтрофилов в крови (см. рис. 23) с напряжённым метаболическим профилем печени было выше на 16,2 % ($p < 0,05$) по сравнению с

нормальным профилем, что отражает восстановление баланса между врождённым и адаптивным звеньями иммунитета. У коров с патологическим профилем аналогичные изменения не выявлены, что связано с ограниченной функциональной способностью печени и истощением компенсаторных механизмов.

Выводы. Наибольшее количество коров с нарушениями функции печени регистрировали в новотельный период (80,0 %), что подтверждает критическое повышение активности АсАТ (до 114,5 ед./л) и КФК (до 191,1 ед./л). У новотельных животных с напряжённым метаболическим профилем печени фагоцитарная активность снижается до 44,0 % (при норме 49,0 %), а содержание лейкоцитов – до $7,65 \times 10^9$ /л (при норме $9,34 \times 10^9$ /л). При патологическом профиле фагоцитарная активность практически не отличается от нормы (48,0 %), но абсолютное содержание лейкоцитов уменьшается до $7,53 \times 10^9$ /л.

У лактирующих коров (63,3 % с нарушениями функции печени) на фоне повышенной активности АсАТ и ГлДГ (111,0 и 35,2 ед./л соответственно) при минимальном уровне билирубина (0,50 мкмоль/л) развивается супрессия адаптивного иммунитета: содержание лимфоцитов снижается до 44,0...45,5 %, а сегментоядерных нейтрофилов возрастает до 41,0...41,5 %.

В ранний сухостой (72,4 % коров с нарушениями функции печени) активность АсАТ нормализуется (89,0 ед./л), а ГГТ находится на верхней границе нормы (26,0 ед./л). Для животных с напряжённым метаболическим профилем печени характерны супрессия лимфоцитов (до 44,0 %) и снижение фагоцитарной активности (до 45,0 %); при патологическом профиле отмечается рост относительного содержания моноцитов до 4,50 %.

В поздний сухостой доля коров с патологическим профилем минимальна (14,9 %), при этом активность ГГТ остаётся высокой (20,5 ед./л), а концентрация билирубина повышается до 1,90 мкмоль/л, что указывает на тенденцию к холестазу. При напряжённом профиле снижается содержание эозинофилов (до 4,0 %) и моноцитов (3,0 %); при патологическом – падает фагоцитарная активность до 38,0 % на фоне роста числа сегментоядерных нейтрофилов (до 35,0 %), что свидетельствует об активации воспаления при истощении фагоцитов.

Выявленные особенности необходимо учитывать при разработке лечебно-профилактических мероприятий, а также дифференцированного подхода к диагностике переходных состояний у коров.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме «Система метаболической коррекции, направленной на нормализацию ключевых звеньев обмена веществ, с целью прижизненного формирования продуктивности и получения качественной продукции от сельскохозяйственных животных и птицы» (№ 0532-2026-0009).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

Все эксперименты с животными проведены в соответствии с Европейской конвенцией по защите позвоночных животных, используемых в экспериментальных и других целях (ETS No123, 1986), получено разрешение № 10 экспертной комиссии ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН от 09.02.2023 г.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература.

1. Bobe G., Young J. W., Beitz D. C. Invited review: Pathology, etiology, prevention, and treatment of fatty liver in dairy cows // *Journal of Dairy Science*. 2004. Vol. 87. No. 10. P. 3105–3124. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(04)73446-3.
2. Innovative dairy cow management to improve resistance to metabolic and infectious diseases during the transition period / P. Lacasse, N. Vanacker, S. Ollier, et al. // *Research in Veterinary Science*. 2018. Vol. 116. P. 40–46. doi: 10.1016/j.rvsc.2017.06.020.
3. Metabolic and immunological changes in transition dairy cows: A review / P. R. Wankhade, A. Manimaran, A. Kumaresan, et al. // *Veterinary World*. 2017. Vol. 10. No. 11. P. 1367–1377. doi: 10.14202/vetworld.2017.1367-1377.
4. Ott T. L. Immunological detection of pregnancy: Evidence for systemic immune modulation during early pregnancy in ruminants // *Theriogenology*. 2020. Vol. 150. P. 498–503. doi: 10.1016/j.theriogenology.2020.04.010.
5. Examination of the haematological profile of pregnant Polish Holstein-Friesian black-and-white cattle in the early stage / M. Wrzecińska, A. Kowalczyk, E. Czerniawska-Piątkowska, et al. // *Journal of Veterinary Research*. 2023. Vol. 67. No. 3. P. 415–425. doi: 10.2478/jvetres-2023-0043.
6. Changes in hematological biomarkers of Nelore cows at different reproductive stages / W. D. C. de Oliveira, T. P. Dias e Silva, M. J. de Araújo, et al. // *Acta Scientiarum. Animal Sciences*. 2019. Vol. 41. Article e45725. URL: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAnimSci/article/view/45725> (дата обращения: 18.01.2026). doi: 10.4025/actascianimsci.v41i1.45725.
7. Оценка иммунного статуса коров в зависимости от продуктивности, сезона года, физиологического состояния и генотипа / И. М. Донник, И. А. Шкуратова, А. Г. Исаева и др. // *Ветеринария Кубани*. 2013. № 1. С. 5–7.
8. Allen M. S. Review: Control of feed intake by hepatic oxidation in ruminant animals: Integration of homeostasis and homeorhesis // *Animal: An International Journal of Animal Bioscience*. 2020. Vol. 14. P. 55–64. doi: 10.1017/S1751731119003215.
9. White H. M. ADSA Foundation Scholar Award: Influencing hepatic metabolism: Can nutrient partitioning be modulated to optimize metabolic health in the transition dairy cow? // *Journal of Dairy Science*. 2020. Vol. 103. No. 8. P. 6741–6750. doi: 10.3168/jds.2019-18119.
10. Relationships between milk and blood biochemical parameters and metabolic status in dairy cows during lactation / B. Andjelčić, R. Djoković, M. Cincović, et al. // *Metabolites*. 2022. Vol. 12. No. 8. Article 733. URL: <https://www.mdpi.com/2218-1989/12/8/733> (дата обращения: 18.01.2026). doi: 10.3390/metabo12080733.
11. Lactation stage impacts the glycolytic function of bovine CD4⁺ T cells during ex vivo activation / J. M. Eder, P. J. Gorden, J. D. Lippolis, et al. // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Article 4045. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-60691-2> (дата обращения: 18.01.2026). doi: 10.1038/s41598-020-60691-2.
12. Панель наиболее информативных тестов для оценки резистентности животных: методические рекомендации / П. Н. Смирнов, Н. В. Ефанова, В. В. Храмцов и др. Новосибирск: НГАУ, 2007. 37 с.
13. Особенности метаболического профиля коров при сочетанном микотоксикозе / А. И. Белоусов, И. А. Шкуратова, А. С. Красноперов и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2025. Т. 39. № 4. С. 86–91.
14. Никулин И. А., Копытина Г. Е. Синдромный принцип диагностики болезней печени у крупного рогатого скота // *Ветеринария*. 2008. № 1. С. 41–43.
15. Полозюк О. Н., Ушакова Т. М. Гематология: учебное пособие Персиановский: Донской ГАУ, 2019. 159 с.
16. Nikolaev S. N., Konopeltsev I. G. Dynamics of the biochemical composition of blood in first-calf cows and correlation of biochemical markers with reproductive function // *International Journal of Veterinary Medicine*. 2021. No. 3. P. 185–191. doi: 10.17238/issn2072-2419.2021.3.185.
17. Gross J. J., Bruckmaier R. M. Review: Metabolic challenges in lactating dairy cows and their assessment via established and novel indicators in milk // *Animal*. 2019. Vol. 13. P. 75–81. doi: 10.1017/S175173111800349X.
18. Сидельникова В. И., Чернышкий А. Е., Рецкий М. И. Эндогенная интоксикация и воспаление: последовательность реакций и информативность маркеров // *Сельскохозяйственная биология*. 2015. Т. 50. № 2. С. 152–161. doi: 10.15389/agrobiology.2015.2.152rus.
19. Cholangiohepatitis in dairy cattle: 13 Cases / D. E. Gomez, E. Doré, D. Francoz, et al. // *Journal of Veterinary Internal Medicine*. 2017. Vol. 31. No. 3. P. 922–927. doi: 10.1111/jvim.14675.
20. Evaluating variations in metabolic profiles during the dry period of dairy cows / Z. Rodriguez, M. García, P. Cremonesi, et al. // *Animals*. 2023. Vol. 13. No. 15. Article 2501. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/13/15/2501> (дата обращения: 18.01.2026). doi: 10.3390/ani13152501.
21. Expression of hepatic genes involved in bile acid metabolism in dairy cows with fatty liver / X. Du, T. Zhang, J. Li, et al. // *Journal of dairy science*. 2024. Vol. 107. No. 10. P. 8629–8640. doi: 10.3168/jds.2023-24485.
22. Prepartal standing behavior as a parameter for early detection of postpartal subclinical ketosis associated with inflammation and liver function biomarkers in peripartal dairy cows / S. Rodriguez-Jimenez, K. J. Haerr, E. Trevisi, et al. // *Journal of Dairy Science*. 2018. Vol. 101. No. 9. P. 8224–8235. doi: 10.3168/jds.2017-14254.
23. Clinical and pathologic features of acute bovine liver disease in Australia / E. M. Manthorpe, I. V. Jerrett, G. T. Rawlin, et al. // *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*. 2021. Vol. 33. No. 5. P. 875–883. doi: 10.1177/10406387211025829.
24. Identification of chronic stress biomarkers in dairy cows / C. Grelet, V. Vanden Dries, J. Leblos, et al. // *Animal: An International Journal of Animal Bioscience*. 2022. Vol. 16. No. 5. Article 100502. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731122000532?via%3Dihub> (дата обращения: 18.01.2026). doi: 10.1016/j.animal.2022.100502.
25. LeBlanc S. J. Relationship of peripartum inflammation with reproductive health in dairy cows // *JDS Communications*. 2023. Vol. 4. No. 3. P. 230–234. doi: 10.3168/jdsc.2022-0328.
26. Hansen P. J. Physiology and Endocrinology Symposium: Maternal immunological adjustments to pregnancy and parturition in ruminants and possible implications for postpartum uterine health: Is there a prepartum–postpartum nexus? // *Journal of Animal Science*. 2013. Vol. 91. No. 4. P. 1639–1649. doi: 10.2527/jas.2012-5934.
27. Баймишев Х. Б., Баймишев М. Х., Еремин С. П. Морфо-биохимические показатели крови коров в зависимости от периода лактации // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. № 1. С. 48–53.
28. Neutrophil homeostasis and emergency granulopoiesis: The example of systemic juvenile idiopathic arthritis / B. Malengier-Devlies, M. Metzemaekers, C. Wouters, et al. // *Frontiers in Immunology*. 2021. Vol. 12. Article 766620. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/immunology/articles/10.3389/fimmu.2021.766620/full> (дата обращения: 18.01.2026). doi: 10.3389/fimmu.2021.766620.
29. Genetic regulation of biomarkers as stress proxies in dairy cows / M. Milanesi, M. M. Passamonti, K. Cappelli, et al. // *Genes*. 2021. Vol. 12. No. 4. Article 534. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4425/12/4/534> (дата обращения: 18.01.2026). doi: 10.3390/genes12040534.
30. Update on neutrophil function in severe inflammation / E. Mortaz, S. D. Alipoor, I. M. Adcock, et al. // *Frontiers in Immunology*. 2018. Vol. 9. Article 2171. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/immunology/articles/10.3389/fimmu.2018.02171/full> (дата обращения: 18.01.2026). doi: 10.3389/fimmu.2018.02171.

References.

1. Bobe G, Young JW, Beitz DC. Invited review: Pathology, etiology, prevention, and treatment of fatty liver in dairy cows. *J Dairy Sci.* 2004;87(10):3105-24. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(04)73446-3.
2. Lacasse P, Vanacker N, Ollier S, et al. Innovative dairy cow management to improve resistance to metabolic and infectious diseases during the transition period. *Res Vet Sci.* 2018;116:40-6. doi: 10.1016/j.rvsc.2017.06.020.
3. Wankhade PR, Manimaran A, Kumaresan A, et al. Metabolic and immunological changes in transition dairy cows: A review. *Vet World.* 2017;10(11):1367-77. doi: 10.14202/vetworld.2017.1367-1377.
4. Ott TL. Immunological detection of pregnancy: Evidence for systemic immune modulation during early pregnancy in ruminants. *Theriogenology.* 2020;150:498-503. doi: 10.1016/j.theriogenology.2020.04.010.
5. Wrzecińska M, Kowalczyk A, Czerniawska-Piątkowska E, et al. Examination of the haematological profile of pregnant Polish Holstein-Friesian black-and-white cattle in the early stage. *J Vet Res.* 2023;67(3):415-25. doi: 10.2478/jvetres-2023-0043.
6. de Oliveira WDC, Dias e Silva TP, de Araújo MJ, et al. Changes in hematological biomarkers of Nellore cows at different reproductive stages. *Acta Sci Anim Sci [Internet].* 2019[cited 2026 Jan 18];41:e45725. Available from: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAnimSci/article/view/45725>. doi: 10.4025/actascianimsci.v41i1.45725.
7. Donnik IM, Shkuratova IA, Isaeva AG, et al. [Assessment of the immune status of cows depending on productivity, season, physiological state and genotype]. *Veterinariia Kubani.* 2013;(1):5-7. Russian.
8. Allen MS. Review: Control of feed intake by hepatic oxidation in ruminant animals: Integration of homeostasis and homeorhesis. *Animal.* 2020;14:55-64. doi: 10.1017/S1751731119003215.
9. White HM. ADSA Foundation Scholar Award: Influencing hepatic metabolism: Can nutrient partitioning be modulated to optimize metabolic health in the transition dairy cow? *J Dairy Sci.* 2020;103(8):6741-50. doi: 10.3168/jds.2019-18119.
10. Andjelić B, Djoković R, Cincović M, et al. Relationships between milk and blood biochemical parameters and metabolic status in dairy cows during lactation. *Metabolites [Internet].* 2022[cited 2026 Jan 18];12(8):733. Available from: <https://www.mdpi.com/2218-1989/12/8/733>. doi: 10.3390/metabo12080733.
11. Eder JM, Gorden PJ, Lippolis JD, et al. Lactation stage impacts the glycolytic function of bovine CD4⁺ T cells during ex vivo activation. *Sci Rep [Internet].* 2020[cited 2026 Jan 18];10:4045. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-60691-2>. doi: 10.1038/s41598-020-60691-2.
12. Smirnov PN, Efanova NV, Khrantsov VV, et al. [Panel of the most informative tests for assessing animal resistance: methodological recommendations]. Novosibirsk: NGAU; 2007. 37 p. Russian.
13. Belousov AI, Shkuratova IA, Krasnoperov AS, et al. [Features of the metabolic profile of cows with combined mycotoxicosis]. *Dostizh Nauki Tekh APK.* 2025;39(4):86-91. Russian.
14. Nikulin IA, Kopytina GE. [Syndromic principle of diagnosis of liver diseases in cattle]. *Veterinariia.* 2008;(1):41-3. Russian.
15. Poloziuk ON, Ushakova TM. [Hematology: textbook]. Persianovskii: Don GAU; 2019. 159 p. Russian.
16. Nikolaev SN, Konopeltsev IG. Dynamics of the biochemical composition of blood in first-calf cows and correlation of biochemical markers with reproductive function. *Int J Vet Med.* 2021;(3):185-91. doi: 10.17238/issn2072-2419.2021.3.185.
17. Gross JJ, Bruckmaier RM. Review: Metabolic challenges in lactating dairy cows and their assessment via established and novel indicators in milk. *Animal.* 2019;13(S1):75-81. doi: 10.1017/S175173111800349X.
18. Sidelnikova VI, Chernitskii AE, Retskii MI. [Endogenous intoxication and inflammation: sequence of reactions and informativeness of markers]. *Sel'skokhoziastvennaia Biologiya.* 2015;50(2):152-61. doi: 10.15389/agrobiol.2015.2.152rus. Russian.
19. Gomez DE, Doré E, Francoz D, et al. Cholangiohepatitis in dairy cattle: 13 Cases. *J Vet Intern Med.* 2017;31(3):922-7. doi: 10.1111/jvim.14675.
20. Rodriguez Z, García M, Cremonesi P, et al. Evaluating variations in metabolic profiles during the dry period of dairy cows. *Animals [Internet].* 2023[cited 2026 Jan 18];13(15):2501. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-2615/13/15/2501>. doi: 10.3390/ani13152501.
21. Du X, Zhang T, Li J, et al. Expression of hepatic genes involved in bile acid metabolism in dairy cows with fatty liver. *J Dairy Sci.* 2024;107(10):8629-40. doi: 10.3168/jds.2023-24485.
22. Rodriguez-Jimenez S, Haerr KJ, Trevisi E, et al. Prepartal standing behavior as a parameter for early detection of postpartal subclinical ketosis associated with inflammation and liver function biomarkers in peripartal dairy cows. *J Dairy Sci.* 2018;101(9):8224-35. doi: 10.3168/jds.2017-14254.
23. Manthorpe EM, Jerrett IV, Rawlin GT, et al. Clinical and pathologic features of acute bovine liver disease in Australia. *J Vet Diagn Invest.* 2021;33(5):875-83. doi: 10.1177/10406387211025829.
24. Girelet C, Vanden Dries V, Leblos J, et al. Identification of chronic stress biomarkers in dairy cows. *Animal [Internet].* 2022 [cited 2026 Jan 18]; 16(5):100502. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731122000532?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.animal.2022.100502.
25. LeBlanc SJ. Relationship of peripartum inflammation with reproductive health in dairy cows. *JDS Commun.* 2023;4(3):230-4. doi: 10.3168/jdsc.2022-0328.
26. Hansen PJ. Physiology and Endocrinology Symposium: Maternal immunological adjustments to pregnancy and parturition in ruminants and possible implications for postpartum uterine health: Is there a prepartum–postpartum nexus? *J Anim Sci.* 2013;91(4):1639-49. doi: 10.2527/jas.2012-5934.
27. Baimyshev KhB, Baimyshev MKh, Eremin SP. [Morpho-biochemical blood parameters of cows depending on the lactation period]. *Izv Samar Gos S-kh Akad.* 2022;(1):48-53. Russian.
28. Malengier-Devlies B, Metzmaekers M, Wouters C, et al. Neutrophil homeostasis and emergency granulopoiesis: The example of systemic juvenile idiopathic arthritis. *Front Immunol [Internet].* 2021[cited 2026 Jan 18];12:766620. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/immunology/articles/10.3389/fimmu.2021.766620/full>. doi: 10.3389/fimmu.2021.766620.
29. Milanesi M, Passamonti MM, Cappelli K, et al. Genetic regulation of biomarkers as stress proxies in dairy cows. *Genes [Internet].* 2021[cited 2026 Jan 18];12(4):534. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4425/12/4/534>. doi: 10.3390/genes12040534. [Internet].
30. Mortaz E, Alipoor SD, Adcock IM, et al. Update on neutrophil function in severe inflammation. *Front Immunol [Internet].* 2018[cited 2026 Jan 18];9:2171. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/immunology/articles/10.3389/fimmu.2018.02171/full>. doi: 10.3389/fimmu.2018.02171.

Поступила в редакцию 23.03.2026 После доработки 12.04.2026 Принята к публикации 29.04.2026

Экспериментальное исследование интенсивности и временной стабильности ЭПР сигнала гамма-облученных специй

Д. И. ТИТОВА, И. М. МЕДЖИДОВ, В. А. ХАРЛАМОВ, А. Н. ПАВЛОВ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», площадь Академика Курчатова, 1, Москва, 123182, Российская Федерация

Резюме. Исследование проводили с целью оценки перспективности метода ЭПР-спектроскопии для установления факта воздействия излучением ^{60}Co на сухие специи (лавровый лист и черный перец). Рассматривали следующие поглощенные дозы: 0 (контроль), 1, 3, 5, 7 и 10 кГр. Снятие спектров электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) проводили в течение 9 месяцев. Определяли зависимость интенсивности сигнала от дозы и его временную стабильность (затухание ЭПР сигнала со временем от момента воздействия гамма-излучения). Для обеих специй g-фактор был равен 2,0042. Образование свободных радикалов в образцах носило дозозависимый характер и выражалось в линейном росте ЭПР сигнала в диапазоне доз от 1 до 10 кГр, то есть выбранные специи были чувствительны к облучению. Интенсивность ЭПР сигнала при измерении сразу после облучения статистически значимо превышала контроль в опытных образцах лаврового листа от 343 % при 1 кГр до 1224 % при 10 кГр, черного перца – от 15 % до 261 % соответственно. Со временем ЭПР сигнал облученных специй затухает. При хранении облученного лаврового листа в течение 7 суток его ЭПР сигнал уменьшился на 78 %, черного перца – на 61 %, относительно величины этого показателя сразу после облучения. ЭПР сигнал облученного черного перца затухает со временем медленнее, чем у лаврового листа. За 9 месяцев хранения он уменьшился, по сравнению с уровнем сразу после облучения, соответственно на 74 % и 90 %. Чувствительность к облучению и диапазон линейности отклика позволяет достоверно различать облученный лавровый лист и черный перец от необлученного контроля. Однако при разработке методик ЭПР-спектроскопии специй следует учитывать факт затухания сигнала в течение 9 месяцев с момента воздействия гамма-излучения.

Ключевые слова: ЭПР-спектрометрия, свободный радикал, интенсивность сигнала, ионизирующее излучение, радиационная обработка

Сведения об авторах: Д. И. Титова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник (e-mail: contactforinfo@mail.ru); И. М. Меджидов, научный сотрудник; В. А. Харламов, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник; А. Н. Павлов, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Для цитирования: Экспериментальное исследование интенсивности и временной стабильности ЭПР сигнала гамма-облученных специй / Д. И. Титова, И. М. Меджидов, В. А. Харламов и др. // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. №4. С. 91–96. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_91.

Experimental study of the intensity and temporal stability of the EPR signal of gamma-irradiated spices

D. I. Titova, I. M. Medzhidov, V. A. Kharlamov, A. N. Pavlov

National Research Center "Kurchatov Institute", ploshchad' Akademika Kurchatova, 1, Moskva, 123182, Russian Federation

Abstract. The study was conducted to evaluate the potential of EPR spectroscopy for determining the effects of ^{60}Co radiation on dried spices (bay leaf and black pepper). The following absorbed doses were examined: 0 (control), 1, 3, 5, 7, and 10 kGy. Electron paramagnetic resonance (EPR) spectra were recorded over a period of 9 months. The dependence of signal intensity on dose and its temporal stability (the attenuation of the EPR signal over time from the moment of exposure to gamma radiation) were determined. For both spices, the g-factor was 2.0042. The formation of free radicals in the samples was dose-dependent and manifested as a linear increase in the EPR signal in the dose range from 1 to 10 kGy, indicating that the selected spices were sensitive to radiation. The EPR signal intensity measured immediately after irradiation statistically significantly exceeded the control in the bay leaf test samples, ranging from 343% at 1 kGy to 1224% at 10 kGy, and in black pepper, from 15% to 261%, respectively. The EPR signal of irradiated spices attenuates over time. During 7-day storage, the irradiated bay leaf EPR signal decreased by 78%, and that of black pepper by 61%, relative to its value immediately after irradiation. The EPR signal of irradiated black pepper attenuates more slowly over time than that of bay leaf. Over 9 months of storage, it decreased, compared to the level immediately after irradiation, by 74% and 90%, respectively. Sensitivity to irradiation and the linear response range allow for reliable discrimination between irradiated bay leaf and black pepper and the non-irradiated control. However, when developing methods for EPR spectroscopy of spices, it is necessary to consider the fact that the signal attenuates within 9 months of exposure to gamma radiation.

Keywords: EPR spectrometry; free radical; signal intensity; ionizing radiation; radiation treatment.

Author Details: D. I. Titova, Cand. Sc. (Biol.), senior research fellow (e-mail: contactforinfo@mail.ru); I. M. Medzhidov, research fellow; V. A. Kharlamov, Cand. Sc. (Biol.), senior research fellow; A. N. Pavlov, Cand. Sc. (Biol.), senior research fellow.

For citation: Titova DI, Medzhidov IM, Kharlamov VA, et al. [Experimental study of the intensity and temporal stability of the EPR signal of gamma-irradiated spices]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(4):91–96. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_91.

В современных условиях в сфере пищевой промышленности и сельского хозяйства актуальными остаются вопросы, связанные с микотоксинами и микробиологической безопасностью продовольственного растительного сырья, а также с необходимостью продления сроков его хранения [1, 2]. Контаминирующие агропродукцию микотоксины высокотоксичные вторичные метаболиты микроскопических грибов – возбудителей болезней сельско-

хозяйственных растений, представляют серьезную опасность здоровью потребителя из-за канцерогенного, мутагенного, иммуносупрессивного воздействия [3, 4, 5]. На территории России сильнее всего распространены фузариоз и альтернариоз злаков [4]. Но плесневые грибы способны продуцировать сотни метаболитов [5], поэтому среди известных и контролируемых микотоксинов все большее распространение получают такие новые или эмерджентные

микотоксины, как тенуазоновая, микофеноловая и фузариевая кислоты, стеригматоцистин, цитринин, тентоксин, фузапролиферин и др. [2]. Загрязнение микотоксинами напрямую связано с распространённостью их продуцентов [4], которые способны вырабатывать токсины, в том числе при низкой влажности продуктов питания, но при высоком содержании углеводов в пищевой продукции [5]. Кроме того, загрязнение микроорганизмами грибной и бактериальной природы приводит к снижению качества растительного сырья и потере сухого вещества [3]. В последние годы отмечается снижение питательной ценности продуктов из-за уменьшения содержания витаминов и минеральных веществ, которые проявляют антирадикальную активность и способствуют повышению антиоксидантной защиты для человека [1, 8]. Проблемы хранения и обеспечения безопасности и качества пищевой продукции связаны с тем, что современные потребители отдают предпочтение «удобным» продуктам (например, готовые салаты), которые легко подвергаются микробиологической порче и потере потребительских свойств [7]. Для решения такой проблемы необходим поиск способов снижения обсемененности микроорганизмами всех ингредиентов готового продукта при их подготовке к переработке [3]. К ингредиентам упомянутых «удобных» продуктов и сложных блюд относятся специи – широко востребованные благодаря вкусо-ароматическим и функциональным свойствам. Однако из-за особенностей производства, транспортировки и хранения они часто подвергаются микробиологическому обсеменению, что может представлять риск для потребителей. Такие традиционные методы, как тепловая стерилизация, сушка, консервирование, не всегда обеспечивают длительное хранение без потери качества либо достаточно энергозатратны [9, 10]. В связи с этим в лабораторных исследованиях апробируются для внедрения новые либо усовершенствованные технологии, например, обработка холодной плазмой или ультрафиолетом, озонирование [6]. Их применение позволяет сохранить пищевую ценность и продлить срок годности продуктов без использования химических консервантов [3, 6]. В дальнейшем такие продукты могут использоваться для производства доброкачественных функциональных изделий для диетического и лечебно-профилактического питания [3].

Наиболее распространённым методом остаётся радиационная обработка продуктов [9, 10, 11]. Ионизирующее излучение (например, γ -излучение) в дозах до 10 кГр признано безопасным и эффективным для снижения микробиологической обсемененности, уничтожения патогенных микроорганизмов и паразитов, а также для сохранения пищевой ценности продуктов и значительного продления сроков годности [12, 13]. Применение радиационных технологий соответствует тенденции спроса на натуральные и безопасные продукты [6] и помогает привести их в соответствие с санитарно-гигиеническими нормами [9]. Радиационные технологии могут способствовать снижению продовольственных потерь на всех этапах логистической цепочки, что особенно актуально в условиях урбанизации и изменения структуры питания [1]. Рынок облученных продуктов растет и может достичь 10,9 млрд долл. США к 2030 г. [14]. Наибольший практический интерес представляет растительная продукция, подвергаемая облучению, в частности, специи, сухие овощи и фрукты. В России действуют

стандарты с требованиями к облучению пряностей, сухих трав и овощных приправ (ГОСТ 33271-2015). Установлены диапазоны минимальных доз облучения для пряностей [13]. Повторное облучение продукции не рекомендовано, поскольку это может привести к ухудшению ее качества [9, 13]. Следует учитывать, что маркировка пищевой продукции, подвергнутой радиационной обработке ионизирующим излучением, должна присутствовать даже если ее проводили только для отдельного составного ингредиента пищевого продукта [13], например, специй [15]. В связи с этим необходимо совершенствовать методы контроля и идентификации облученной продукции, а также контроля доз облучения и соответствия режима обработки установленным требованиям [12].

Факт воздействия ионизирующего излучения можно подтвердить с использованием различных методов, среди которых наибольшее распространение благодаря своей высокой эффективности получила спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [12]. Электронный парамагнитный резонанс, открытый в 1944 г. Е.К. Завойским, широко применяется как метод исследования, основанный на детекции стабильных в течение различных периодов времени свободных радикалов (парамагнитные центры), образование которых индуцирует воздействие ионизирующего излучения [13]. Радиационно-индуцированные свободные радикалы в веществе можно детектировать спектрометром электронного парамагнитного резонанса в виде спектров, которые можно получить даже спустя длительное время после воздействия ионизирующим излучением [13]. Согласно ГОСТ 31672-2012 и ГОСТ 31652-2012, этот метод можно использовать для выявления факта облучения мяса крупного рогатого скота и свиней, содержащего костную ткань; продуктов, содержащих кристаллических сахар; пищевых продуктов, содержащих целлюлозу [9]. Следует отметить, что каждая пищевая продукция, облучённая ионизирующим излучением, имеет характерный спектр ЭПР [13]. Особенности такой обработанной сухой растительной продукции, как специи и травы, с использованием электронного парамагнитного резонанса достаточно хорошо изучены [16]. По результатам этих исследований авторы предложили проводить спектрометрию электронного парамагнитного резонанса для всех видов специй и пряных трав. Накопление экспериментальных данных будет способствовать оптимизации методов контроля и идентификации факта облучения. Это особенно актуально в условиях расширения ассортимента продуктов, подлежащих облучению. Важная практическая задача – разработка методов контроля радиационно-обработанной продукции, особенно при отсутствии маркировки. Перспективным ее решением может быть ЭПР-спектроскопия, с некоторой долей условности открывающая возможности для оценки поглощённой дозы ионизирующего излучения по образованию стабильных свободных радикалов, концентрация которых существенно варьирует в зависимости от материала. Двумя ключевыми параметрами этого метода служат интенсивность радиационного сигнала, регистрируемая непосредственно после облучения, и его временная стабильность, учитывающая характерное для большинства материалов экспоненциальное затухание сигнала.

Цель исследований – оценить потенциал применимости ЭПР-спектроскопии в качестве метода кон-

троля радиационной обработки сухих специй (лавровый лист, черный перец) путем анализа зависимости интенсивности ЭПР сигнала от поглощенной дозы и времени хранения.

Условия, материалы и методы. В работе проводили оценку изменения ЭПР сигнала в зависимости от дозы облучения и временной стабильности ЭПР сигнала – затухания сигнала с течением времени. В исследовании использовали сухие растительные тест-объекты (урожае 2024 г.): лавровый лист (*Laurus nobilis* L.) и черный молотый перец (*Piper nigrum* L.).

Опытные образцы предварительно расфасовывали в полипропиленовые стерильные пробирки (объемом 1 мл). Далее проводили обработку гамма-излучением ^{60}Co на уникальной научной установке (УНУ ГУР-120 № 2795259). Мощность дозы – 5000 Гр/ч. Поглощенные дозы составляли 1, 3, 5, 7 и 10 кГр. Этот диапазон охватывает минимальные (1...3 кГр) и стандартные (5...10 кГр) дозы, применяемые на практике для обеззараживания растительной продукции. Требования по дозиметрии, необходимой при проведении исследований по изучению влияния радиации на пищевые и сельскохозяйственные продукты, соответствовали ГОСТ 34155-2017 и ГОСТ 8.664-2019. После облучения опытные образцы хранили при атмосферном давлении и комнатной температуре без доступа солнечного света. В качестве контроля использовали необлученные образцы (0 кГр). Временную стабильность сигнала оценивали повторными измерениями ЭПР отклика в течение 9 месяцев со следующими интервалами измерения: сразу после облучения (0 сут), спустя 7, 14, 28, 90, 180 и 270 сут.

Пробоподготовку осуществляли путем измельчения в фарфоровой ступке с пестиком, затем просеивали через сито с размером ячеек 0,5 мм. Спектры ЭПР снимали при комнатной температуре. Для их регистрации использовали спектрометр электронного парамагнитного резонанса ESR70-03 XD/2 (Беларусь) X-диапазона. Частота СВЧ составляла 9,4 ГГц. Навеску сухого измельченного образца по 20 мг из каждой пробирки помещали в специальные кварцевые пробирки (Ø 4 мм), которые опускали в полость с магнитным полем на уровне резонатора и регистрировали сигнал. Все образцы исследовали в трехкратной повторности.

Условия получения спектров ЭПР: середина поля – 3350 Э, диапазон поля – 1000 Э, частота модуляции

– 100 кГц, модуляция – 4 Э, мощность СВЧ – 10 мВт. Коэффициент усиления для лаврового листа 10, для черного перца – 50. Время снятия спектра 600 с.

Математическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием стандартных статистических методов анализа. Для сравнения количественных показателей в двух группах применяли критерий Манна-Уитни. Во всех случаях различия считали достоверными при уровне значимости $p < 0,05$. Результаты на графиках представлены в относительных единицах. Изменение интенсивности сигнала рассчитывали по следующей формуле:

$$\text{Изменение интенсивности (\%)} = [(I_0 - I) / I_0] \cdot 100,$$

где I_0 – интенсивность ЭПР сигнала контрольного образца, отн.ед., I – интенсивность ЭПР сигнала опытного образца, отн.ед.

Критический параметр, который используют для определения спина электрона и характера изучаемого парамагнитного центра, в спектрометрии электронного парамагнитного резонанса – безразмерная величина, называемая g-фактором. Его определяли по формуле:

$$g\text{-фактор} = (h \cdot \nu) / (\beta \cdot B),$$

где $h = 6,62606896 \times 10^{-34}$ – постоянная Планка, Дж·с; ν – СВЧ-частота X-диапазона, Гц; $\beta = 9,2740 \times 10^{-24}$ – магнетон Бора, Дж/Тл; B – величина магнитного поля, Тл.

Результаты и обсуждение. Полученные спектры ЭПР для необлученных (контрольных) образцов, хорошо соотносились с литературными данными для овощей и специй [17]. В опубликованных работах можно встретить замечания о трудности разделения облученных и необлученных образцов из-за наличия только одной линии спектра ЭПР до и после радиационной обработки. Такая проблема связана с тем, что в органических материалах ЭПР сигналы, индуцированные естественным путем и ионизирующим излучением, имеют одинаковые g-факторы в спектрах X- и Q-диапазонов, близкие к двум, поэтому неразличимы независимо от источника их индуцирования [17, 18]. Радиационно-индуцированный сигнал на спектре специй, в сравнении со спектром необлученных специй, отличается значительным увеличением интенсивности ЭПР сигнала. Это указывает на предшествующее воздействие ионизирующего излучения на специи.

Облучение вызвало появление ЭПР сигналов различной интенсивности во всех образцах специй.

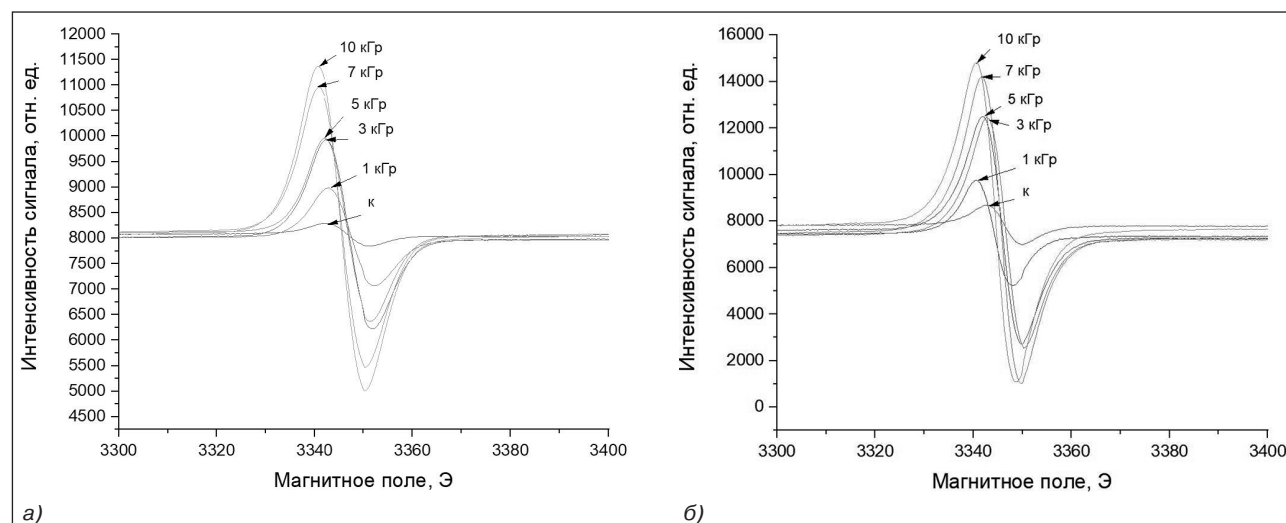


Рис. 1. Общий вид спектров ЭПР сразу после воздействия гамма-излучением ^{60}Co : а) измельченный лавровый лист; б) молотый черный перец.

При этом фиксировали значительное повышение их интенсивности с увеличением дозы.

Есть мнение, что изменение интенсивности радиационно-индуцированного сигнала на спектре ЭПР зависит от содержания воды в образце, а основная масса свободных радикалов, которые образуются в результате облучения, короткоживущие [17]. Причем интенсивность таких сигналов медленно снижается со временем [17, 18].

По результатам нашего исследования, g-факторы всех сигналов в облученных образцах близки к 2 и не различаются даже в третьем знаке после запятой. G-фактор в точке пересечения контура производной с нулевой линией был равен 2,0042. Это свидетельствует о наличии углеродо-содержащих радикалов.

После обработки опытных образцов разными дозами гамма-излучения происходило изменение основного параметра сигнала ЭПР – амплитуды или интенсивности. В нашем исследовании сразу после воздействия гамма-излучения в изучаемых дозах ЭПР сигнал статистически значимо возрастал, по сравнению с контролем, в опытных образцах лаврового листа на 343...1224 %, в опытных образцах черного перца – на 15...261 % (рис. 1).

Таким образом, при воздействии гамма-излучением ⁶⁰Со на опытные образцы лаврового листа и черного перца наблюдали образование свободных радикалов, которые фиксировали в виде характерного широкого синглетного пика ЭПР. Необлученные (контрольные) образцы также имели характерный фиксируемый центральный синглетный ЭПР сигнал.

Следует отметить, что слабый ЭПР сигнал в контрольных (необлученных) образцах обусловлен наличием естественных парамагнитных центров, формирующихся в растительном сырье еще в процессе вегетации. Их возникновение связано с естественными метаболическими процессами, в ходе которых могут образовываться устойчивые органические радикалы: продукты окислительно-восстановительных реакций, ферментативных превращений и фотохимических процессов. Со временем интенсивность этих сигналов снижается вследствие протекания вторичных реакций рекомби-

нации радикалов, взаимодействия их с кислородом, влагообмена и изменения содержания летучих компонентов при хранении. Таким образом, затухание ЭПР сигнала в контроле отражает естественную деградацию радикальных центров.

Наибольшее статистически значимое снижение ЭПР сигнала лаврового листа фиксировали после 7 сут хранения – на 55 % для дозы 1 кГр и на 78 % для дозы 10 кГр относительно значений для этих доз, измеренных сразу после облучения. Для облученного черного перца аналогичное снижение за тот же период составляло соответственно 12 % и 61 % (табл. 1).

Таблица 1. Изменение относительной интенсивности (кинетика затухания) ЭПР сигнала необлученных и облученных в различных дозах образцов с течением времени в относительных единицах

Показатель	Поглощенная доза					
	0 кГр	1 кГр	3 кГр	5 кГр	7 кГр	10 кГр
сразу после облучения (0 сут)						
Среднее арифметическое	443,48	1964,37	3198,61	3781,98	4632,63	5868,37
Медиана	3889,13	4482,49	9827,93	10108,95	13362,38	14035,03
Ошибка среднего арифметического	443,47	1935,44	3143,05	3750,23	4327,78	5830,26
	3889,10	4476,92	9802,47	9929,78	13233,03	13815,13
	5,82	52,16	228,52	158,89	441,99	307,03
	1,09	43,49	286,93	410,07	563,84	869,57
через 7 суток						
Среднее арифметическое	443,48	875,19	792,84	1264,87	1320,34	1306,91
Медиана	3889,11	3929,70	4558,47	4811,99	4933,68	5444,50
Ошибка среднего арифметического	443,47	871,83	786,16	1264,82	325,38	1305,23
	3879,00	3909,42	4563,53	4806,92	4928,61	5472,30
	5,82	3,36	17,75	20,36	19,08	27,65
	10,11	20,28	5,08	5,07	48,37	46,06
через 14 суток						
Среднее арифметическое	441,60	659,98	630,87	917,19	898,97	712,79
Медиана	3841,42	3621,05	4121,89	4307,43	4332,2	4737,88
Ошибка среднего арифметического	440,39	662,41	633,29	913,55	898,93	724,28
	3831,40	3621,05	4116,88	4312,21	4372,31	4732,81
	3,21	4,38	6,42	7,57	6,31	11,49
	10,02	2,00	5,01	21,62	47,74	21,83
через 1 месяц						
Среднее арифметическое	462,22	572,39	509,42	702,60	686,86	655,38
Медиана	3326,06	3447,84	3599,23	3767,01	3767,01	4039,98
Ошибка среднего арифметического	467,93	575,25	510,85	708,33	682,57	648,23
	3338,66	3439,44	3578,63	3767,00	3779,61	4056,78
	5,74	5,16	6,24	10,32	6,56	9,38
	19,25	15,14	20,90	21,82	12,60	30,28
через 3 месяца						
Среднее арифметическое	422,01	488,64	504,51	594,94	552,10	604,46
Медиана	3367,12	3237,02	3558,43	3975,49	3631,13	3787,14
Ошибка среднего арифметического	418,84	490,23	499,75	590,18	552,10	599,70
	3363,29	3248,50	3581,39	3960,19	3638,78	3776,53
	3,17	4,20	4,76	4,76	8,25	4,76
	29,88	17,53	35,07	27,59	33,36	23,06
через 6 месяцев						
Среднее арифметическое	420,37	473,18	469,55	524,45	488,07	536,68
Медиана	2983,16	3045,43	3002,18	3528,49	3246,66	3541,30
Ошибка среднего арифметического	419,16	472,28	471,10	525,66	484,74	537,49
	2977,97	3045,42	3009,10	3522,08	3240,26	3515,68
	1,62	3,18	2,46	2,69	4,76	2,83
	7,93	3,00	9,63	13,34	9,79	25,62
через 9 месяцев						
Среднее арифметическое	529,80	566,30	566,30	563,11	573,28	586,32
Медиана	3190,35	3180,98	3390,67	4157,46	3358,73	3723,74
Ошибка среднего арифметического	526,06	566,29	566,29	563,43	574,87	586,31
	3190,34	3173,49	3381,31	4167,73	3358,72	3874,94
	3,74	2,00	4,40	1,39	4,74	1,65
	12,97	7,49	9,36	10,27	13,35	174,83

*в числителе – измельченный лавровый лист, в знаменателе – молотый черный перец.

Важно, что несмотря на затухание со временем, ЭПР сигнал исследуемых специй оставался детектируемым до 270 сут. хранения. Тем не менее, за этот период у облученного лаврового листа при дозе 10 кГр он значительно снизился, относительно значений, измеренных сразу после облучения, на 90 %, при дозе

Таблица 2. Изменение кинетики затухания ЭПР сигнала со временем для молотого черного перца и измельченного лаврового листа, относительные единицы

Время измерения после облучения	Доза 0 кГр					Доза 10 кГр				
	лавровый лист		черный перец		лавровый лист / черный перец	лавровый лист		черный перец		лавровый лист / черный перец
	мин	макс	мин	макс		мин	макс	мин	макс	
7 суток	433,40	453,55	3879,00	3909,32	-88,60 %	1259,87	1355,62	5354,54	5506,66	-76,00 %
2 недели	436,75	447,67	3831,40	3861,45	-88,50 %	689,81	724,29	4702,86	4777,98	-84,96 %
1 месяц	450,75	467,98	3288,26	3351,25	-86,10 %	643,93	673,98	3981,19	4081,98	-83,78 %
3 месяца	418,84	428,36	3317,38	3420,68	-87,47 %	599,70	613,98	3753,57	3831,32	-84,04 %
6 месяцев	418,36	423,58	2972,78	2998,72	-85,91 %	531,42	541,13	3515,68	3592,54	-84,85 %
9 месяцев	526,06	537,27	3167,87	3212,81	-83,39 %	583,45	589,17	3375,11	3921,17	-84,25 %

5 кГр – на 85 %, у облученного черного перца – соответственно на 73 % и 59 % (см. табл. 1).

Затухание ЭПР сигнала лаврового листа происходило быстрее сигнала черного перца. По сравнению с величиной, измеренной сразу после облучения, за 14 сут. хранения лаврового листа, в варианте с дозой 1 кГр он статистически значимо снизился на 66 %, 3 кГр – на 80 %, 10 кГр – на 88 %; черного перца – соответственно статистически на 19 %, 58 % и 66 % (табл. 2).

Различия в кинетике затухания и интенсивности ЭПР сигнала между лавровым листом и черным перцем, скорее всего, обусловлены их химическим составом и устойчивостью радикалов. Вероятно, ЭПР сигнал сухих специй при комнатной температуре затухает по сложному закону, что может объясняться различными типами механизмов релаксации: рекомбинация радикалов, захват электронов, рекомбинация носителей заряда и передача энергии от матрицы к радикалам. Различные факторы могут усложнить анализ облученных специй: экспонирование солнечным светом, содержание воды, жира и др. Все эти эффекты должны быть исследованы отдельно.

Выводы. Спектры ЭПР всех изученных образцов, включая необлученный контроль, демонстрируют характерный синглетный сигнал с g-фактором 2,0042, что указывает на наличие углеродсодержащих радикалов. Интенсивность ЭПР сигнала статистически значимо возрастает после облучения в прямой зависимости от дозы облучения. ЭПР сигнал облученного лаврового листа при 1 кГр статистически значимо выше, чем в контроле, на 343 %, при 10 кГр – на 1224 %, а облученного черного перца – соответственно на 15 % и на 261 %.

ЭПР сигнал, который появляется у специй после облучения, со временем затухает. Наибольшее снижение происходит в первые полмесяца после облучения с дальнейшим более медленным затуханием в течение нескольких месяцев. ЭПР сигнал лаврового листа, облученного дозой 1 кГр, спустя первые семь суток статистически значимо снижался, относительно значения сигнала, измеренного сразу после облучения, на 55 %, 10 кГр – на 78 %, черного перца – соответственно на 12 % и 61 %.

Методом спектроскопии электронного парамагнитного резонанса возможно выявлять факт облучения, таких сухих специй, как лавровый лист и черный перец, спустя 9 месяцев хранения. Интенсивность ЭПР сигнала достоверно коррелирует с дозой облучения. Все отмеченные различия были статистически значимыми, что подтверждает возможность использования рассматриваемого метода для контроля облученных продуктов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась за счет средств бюджета Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

- Тимакова Р. Т., Тихонов С. Л., Тихонова Н. В. Исследование возможности применения арабиногалактана для хранения охлажденной рыбы // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 10. С. 106-110. doi: 10.24411/0235-2451-2020-11017.
- Контаминация плодово-ягодной продукции микотоксигенными плесневыми грибами / Л. П. Минаева, А. Д. Евсюкова, В. А. Кольцов и др. // *Гигиена и санитария*. 2023. Т. 102. № 3. С. 272-278. doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-3-272-278.
- Способы снижения обсемененности зерна пшеницы микроорганизмами при его подготовке к переработке / Т. В. Ваницкая, А. Ю. Шаззо, В. Г. Лобанов и др. // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2022. № 2-3(386-387). С. 26-29. doi: 10.26297/0579-3009.2022.2-3.5.
- Анализ продовольственного зерна в Российской Федерации на загрязненность широким спектром микотоксинов (на примере урожая 2018 года) / М. Г. Киселева, И. Б. Седова, З. А. Чалый и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2021. Т. 56. № 3. С. 559-577. doi: 10.15389/agrobiology.2021.3.559rus.
- Изучение контаминации сухофруктов токсигенными плесневыми грибами / Л. П. Минаева, А. С. Полянина, М. Г. Киселева и др. // *Гигиена и санитария*. 2021. Т. 100. № 7. С. 717-723. doi: 10.47470/0016-9900-2021-100-7-717-723.
- Бурак Л. Ч. Использование современных технологий обработки для увеличения срока хранения фруктов и овощей. Обзор предметного поля // *Ползуновский вестник*. 2024. № 1. С. 99-119. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013.
- Сравнительная характеристика эффективности обработок ингибиторами этилена и электромагнитными полями крайне низких частот при хранении нарезанной капусты белокочанной / Т. В. Першакова, Г. А. Купин, Т. В. Яковлева и др. // *Ползуновский вестник*. 2024. № 1. С. 134-140. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.016.
- Оценка потребительских предпочтений россиян: «ловушка среднего рациона» / В. В. Горбачев, И. А. Никитин, Д. А. Велина и др. // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2022. № 6(390). С. 90-98. doi: 10.26297/0579-3009.2022.6.3.
- Немнущая Л. А. Обеспечение экологической безопасности при использовании радиационных технологий в АПК // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2019. № 4(101). С. 94-106. doi: 10.24411/0131-5226-2019-10216.

10. Применение метода электронного парамагнитного резонанса для выявления радиационно-обработанных продуктов питания / М. Б. Кувыкина, А. А. Прядка, В. П. Тенишев и др. // Альманах современной метрологии. 2023. № 1(33). С. 222-230.
11. Тимакова Р. Т., Ильюхина Ю. В., Старцев В. Г. Влияние низкодозового γ -излучения на безопасность сублимированного кобыльего молока // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 7. С. 82-86. doi: 10.53859/02352451_2023_37_7_82.
12. Тимакова Р. Т., Тихонов С. Л., Тихонова Н. В. Современные методы идентификации свинины, обработанной ионизирующим излучением // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 10. С. 90-92. doi: 10.24411/0235-2451-2018-11021.
13. Зависимость параметров ЭПР-спектра от вида мяса и рыбы, обработанных ионизирующим излучением / Р. Т. Тимакова, С. Л. Тихонов, О. В. Евдокимова, И. В. Бутенко // Гигиена и санитария. 2018. Т. 97. № 9. С. 873-876. doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-9-873-876.
14. Determining the dose of radiation and radurisation effects on the antioxidant activity of fish and the thermophysical characteristics of fish muscle tissue / R. T. Timakova, S. L. Tikhonov, N. V. Tikhonova, et al. // Foods. 2019. Vol. 8. No. 4. Article ID 8040130. doi: 10.3390/foods8040130.
15. Микробиологическая контаминация продовольственного сырья и готовой пищевой продукции (аналитический обзор) / А. С. Хишов, Т. В. Балагула, О. И. Лаврухина и др. // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 3. С. 486-503. doi: 10.21603/2074-9414-2023-3-2451.
16. Khan A. A., Shahid M. K. Detection of radiation treatment of spices using Electron Spin Resonance Spectroscopy technique // Journal of Spices & Aromatic Crops. 2021. Vol 30. No. 1. P. 107-116. doi: 10.25081/josac.2021.v30.i1.6855.
17. Aleksieva K. I., Yordanov N. D. Various approaches in EPR identification of gamma-irradiated plant foodstuffs: A review // Food Research International. 2018. Vol. 105. P. 1019-1028. doi: 10.1016/j.foodres.2017.11.072.
18. Использование различных материалов для ЭПР дозиметрии в случаях аварийного облучения / Д. В. Иванов, Д. Р. Байтмиров, С. Ф. Конев и др. // Вопросы радиационной безопасности. 2018. № 3(91). С. 75-81.

References

1. Timakova RT, Tikhonov SL, Tikhonova NV. [Investigation of the possibility of using arabinogalactan for storing chilled fish]. Dostizh Nauki Tekhn APK. 2020;34(10):106-10. doi: 10.24411/0235-2451-2020-11017. Russian.
2. Minaeva LP, Evsyukova AD, Kol'tsov VA, et al. [Contamination of fruit and berry products with mycotoxigenic molds]. Gig Sanit. 2023;102(3):272-8. doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-3-272-278. Russian.
3. Vanitskaya TV, Shazzo AYU, Lobanov VG, et al. [Methods to reduce microbial contamination of wheat grain during its preparation for processing]. Izv Vyssh Uchebn Zaved Pishch Tekhnol. 2022;(2-3(386-387)):26-9. doi: 10.26297/0579-3009.2022.2-3.5. Russian.
4. Kiseleva MG, Sedova IB, Chalyy ZA, et al. [Analysis of food grains in the Russian Federation for contamination with a wide spectrum of mycotoxins (example of the 2018 harvest)]. S-kh Biol. 2021;56(3):559-77. doi: 10.15389/agrobiology.2021.3.559rus. Russian.
5. Minaeva LP, Polyanina AS, Kiseleva MG, et al. [Study of contamination of dried fruits with toxigenic molds]. Gig Sanit. 2021;100(7):717-23. doi: 10.47470/0016-9900-2021-100-7-717-723. Russian.
6. Burak LCh. [The use of modern processing technologies to extend the shelf life of fruits and vegetables. A review of the subject field]. Polzunovskii Vestn. 2024;(1):99-119. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013. Russian.
7. Pershakova TV, Kupin GA, Yakovleva TV, et al. [Comparative characteristics of the effectiveness of treatments with ethylene inhibitors and extremely low-frequency electromagnetic fields during the storage of chopped white cabbage]. Polzunovskii Vestn. 2024;(1):134-40. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.016. Russian.
8. Gorbachev VV, Nikitin IA, Velina DA, et al. [Assessment of consumer preferences of Russians: «the trap of the average diet»]. Izv Vyssh Uchebn Zaved Pishch Tekhnol. 2022;(6(390)):90-8. doi: 10.26297/0579-3009.2022.6.3. Russian.
9. Nemenushchaya LA. [Ensuring environmental safety when using radiation technologies in the agro-industrial complex]. Tekhnol Tekh Sredstva Mekhaniz Proizv Rastenievod Zhivotnovod. 2019;(4(101)):94-106. doi: 10.24411/0131-5226-2019-10216. Russian.
10. Kuvyikina MB, Pryadka AA, Tishchev VP, et al. [Application of the electron paramagnetic resonance method for the detection of radiation-processed food products]. Al'manakh Sovrem Metrol. 2023;(1(33)):222-30. Russian.
11. Timakova RT, Il'yukhina YuV, Startsev VG. [The effect of low-dose γ -irradiation on the safety of freeze-dried mare's milk]. Dostizh Nauki Tekh APK. 2023;37(7):82-6. doi: 10.53859/02352451_2023_37_7_82. Russian.
12. Timakova RT, Tikhonov SL, Tikhonova NV. [Modern methods for identifying pork treated with ionizing radiation]. Dostizh Nauki Tekh APK. 2018;32(10):90-2. doi: 10.24411/0235-2451-2018-11021. Russian.
13. Timakova RT, Tikhonov SL, Evdokimova OV, Butenko IV. [Dependence of EPR spectrum parameters on the type of meat and fish treated with ionizing radiation]. Gig Sanit. 2018;97(9):873-6. doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-9-873-876. Russian.
14. Timakova RT, Tikhonov SL, Tikhonova NV, et al. Determining the dose of radiation and radurisation effects on the antioxidant activity of fish and the thermophysical characteristics of fish muscle tissue. Foods. 2019;8(4):130. doi: 10.3390/foods8040130.
15. Khishov AS, Balagula TV, Lavrukhina OI, et al. [Microbiological contamination of food raw materials and finished food products (analytical review)]. Tekhnol Tekhnol Pishch Proizv. 2023;53(3):486-503. doi: 10.21603/2074-9414-2023-3-2451. Russian.
16. Khan AA, Shahid MK. Detection of radiation treatment of spices using Electron Spin Resonance Spectroscopy technique. J Spices Aromat Crops. 2021;30(1):107-16. doi: 10.25081/josac.2021.v30.i1.6855.
17. Aleksieva KI, Yordanov ND. Various approaches in EPR identification of gamma-irradiated plant foodstuffs: A review. Food Res Int. 2018;105:1019-28. doi: 10.1016/j.foodres.2017.11.072.
18. Ivanov DV, Baitimirov DR, Konev SF, et al. [Use of various materials for EPR dosimetry in cases of accidental exposure]. Vopr Radiats Bezop. 2018;(3(91)):75-81. Russian.

Поступила в редакцию 30.05.2025 После доработки 28.10.2025 Принята к публикации 08.12.2025