

ISSN 2500-2627

Номер 1

Январь - Февраль 2024



РОССИЙСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ НАУКА

Научно-теоретический журнал



К 300-летию Российской академии наук

Ю. С. Ценч

Роль отечественных научных школ в становлении и развитии механизации и электрификации сельского хозяйства России (1920–2023 гг.) 3

Земледелие и мелиорация

О. А. Минакова, Л. В. Александрова, В. М. Вилков

Изменение почвенного плодородия и урожайности культур при краткосрочном и длительном использовании удобрений в зерносвекловичном севообороте ЦЧР 11

В. И. Лазарев, Ж. Н. Минченко

Оценка эффективности использования гуминовых удобрений при возделывании ярового ячменя в почвенно-климатических условиях Центрального Черноземья 17

Растениеводство, защита и биотехнология растений

Л. М. Щеклеина, Т. К. Шешегова

Источники устойчивости озимой ржи к грибным болезням для селекции на фитоиммунитет 22

Т. А. Асеева, К. В. Зенкина

Мучнистая роса – опасная болезнь яровой тритикале на Дальнем Востоке 28

А. Н. Пузиков, О. А. Юсова, А. Х. Момонов, А. В. Дубинин

Кормовая и семенная продуктивность сортов коостреца безостого селекции Омского аграрного научного центра 32

Агрочвоведение и агроэкология

М. К. Зинченко, С. И. Зинченко

Особенности ферментативной активности почв в агроландшафтах Владимирского Ополя 36

Л. В. Бойцова, С. В. Неприимерова

Влияние интенсивности выпаса на депонирование органического углерода в почве пастбища 41

Зоотехния и ветеринария

А. Д. Хаудов, М. Х. Жекамухов, А. М. Зайцев, З. Х. Амшокова,

Н. В. Бербекова, Х. К. Амшоков

Изучение полиморфизма генов *ASIP* и *MC1R* у лошадей кабардинской породы 47

С. В. Лебедев, Т. В. Казакова, О. В. Маршинская, Е. В. Кияева

Изучение влияния комбинации биокоординационных соединений и пробиотика на водной основе на показатели продуктивности цыплят-бройлеров 51

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

В. К. Каличкин, К. Ю. Максимович, Д. С. Федоров, Л. В. Гарафутдинова

Концептуальная модель цифрового управления азотом в посевах сельскохозяйственных культур 57

И. В. Ариничев, И. В. Ариничева, Г. В. Волкова, Я. В. Яхник

Модели на основе искусственного интеллекта для цифровой диагностики болезней зерновых культур (на примере *Pyrenophora teres* озимого ячменя) 67

Contents

On the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences

Yu. S. Tsench

The role of Russian scientific schools in the formation and development of mechanization and electrification for agriculture in Russia (1920-2023 years) 3

Agriculture and land reclamation

O. A. Minakova, L. V. Alexandrova, V. M. Vilkov

Changes of soil fertility and yield of crops when applying fertilizers in a grain-arable crop rotation of the Central Black-Earth region for a short and long time 11

V. I. Lazarev, Zh. N. Minchenko

Evaluation of the effectiveness of the use of humic fertilizers in the cultivation of spring barley in the soil and climatic conditions of the Central Chernozem region 17

Crop production, plant protection and biotechnology

L. M. Shchekleina, T. K. Sheshegova

Sources of winter rye resistance to fungal diseases for phytoimmunity breeding 22

T. A. Aseeva, K. V. Zenkina

Powdery midlew is a dangerous disease of spring triticale in the Far East 28

A. N. Puzikov, O. A. Yusova, A. Kh. Momonov, A. V. Dubinin

Fodder and seed productivity of the bonfire awnless of the selection of Omsk Agrarian Scientific Center 32

Agro-soil science and agroecology

M. K. Zinchenko, S. I. Zinchenko

Features of enzymatic activity of soils in agricultural landscapes of the Vladimir high plains 36

L. V. Boitsova, S. V. Neprimerova

Influence of grazing intensity on organic carbon deposition in pasture soil 41

Animal science and veterinary medicine

A. D. Khaudov, M. H. Zhekamukhov, A. M. Zaitsev, Z. H. Amshokova, N. V. Berbekova, H. K. Amshokov

Study of *ASIP* and *MC1R* gene polymorphism horses of the Kabardian breed 47

S. V. Lebedev, T. V. Kazakova, O. V. Marshinskaia, E. V. Kiyeva

Study of the effect of a combination of biocoordination compounds and a water-based probiotic on the performance of broiler chickens 51

Mechanization, electrification, automation and digitalization

V. K. Kalichkin, K. Yu. Maksimovich, D. S. Fedorov, L. V. Garafutdinova

Conceptual model of digital nitrogen management in agricultural crops 57

I. V. Arinichev, I. V. Arinicheva, G. V. Volkova, Y. V. Yakhnik

AI solutions for digital diagnostics of diseases of grain crops (using the example of *Pyrenophora teres* of winter barley) 67

К 300-летию Российской академии наук

УДК 631.3

DOI: 10.31857/S2500262724010019, EDN: DFOZGK

РОЛЬ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ НАУЧНЫХ ШКОЛ В СТАНОВЛЕНИИ И РАЗВИТИИ МЕХАНИЗАЦИИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИИ (1920–2023 гг.)**Ю. С. Ценч**, доктор технических наук, главный научный сотрудникФедеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
119334, Москва, 1-й Институтский проезд, 5, стр. 1
E-mail: vimasp@mail.ru

В статье исследуется процесс становления и развития научных агроинженерных школ и их роль в создании механизации и электрификации сельского хозяйства России в 1920–2023 гг. Логика проведенного исследования потребовала определения временных периодов – довоенные 1920–1940 гг.; послевоенные 1945–1990 гг.; настоящее время 1991–2023 гг. В довоенный период был заложен мощный фундамент и основы развития агроинженерной науки. Разработка и внедрение сельскохозяйственных машин вышли на первый план. Послевоенный период характеризуется стремительным развитием всех сфер механизации сельского хозяйства и сельскохозяйственного машиностроения; созданием новой сельскохозяйственной техники, развитием методов научных исследований, новыми более эффективными технологиями конструкторских работ, консолидацией усилий представителей агроинженерной науки, испытателей и производителей техники. В начале 1990-х гг. в инженерно-технической сфере АПК России была проведена существенная реорганизация. Создана Российская академия сельскохозяйственных наук. В октябре 2013 г. в рамках реформы Российской академии наук произошло объединение государственных академий РАН и Россельхозакадемии с РАН. В 2016 г. Федеральным агентством научных организаций был взят курс на упорядочение сети подведомственных научных организаций, создание на базе близких по тематике институтов, федеральных научных центров. Последователи академика В. П. Горячкина трудятся в этих научных институтах и центрах. Развивают оставленное им большое научное наследие и, используя лучшие отечественные традиции, поднимают агроинженерную науку на более высокий уровень.

THE ROLE OF RUSSIAN SCIENTIFIC SCHOOLS IN THE FORMATION AND DEVELOPMENT OF MECHANIZATION AND ELECTRIFICATION FOR AGRICULTURE IN RUSSIA (1920–2023 YEARS)**Yu. S. Tsench**Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
119334, Moscow, 1-i Institutskii proezd, 5, str. 1
E-mail: vimasp@mail.ru

The article examines the process of formation and development of scientific agroengineering schools and their role in the creation of mechanization and electrification of agriculture in Russia in 1920–2023. The logic of the conducted research required the definition of time periods (pre-war 1920–1940); (post-war 1945–1990); (present 1991–2023). In the pre-war period, a powerful foundation and foundations for the development of agroengineering science were laid. The development and implementation of agricultural machinery has come to the fore. The post-war period is characterized by the rapid development of all spheres of agricultural mechanization and agricultural engineering; the creation of new agricultural machinery, the development of research methods, new more efficient design technologies, the consolidation of efforts of representatives of agroengineering science, testers and manufacturers of equipment. In the early 1990s, a significant reorganization was carried out in the engineering and technical sphere of the Russian agro-industrial complex. The Russian Academy of Agricultural Sciences has been established. In October 2013, as part of the reform of the Russian Academy of Sciences, the State Academies of the Russian Academy of Sciences and the Russian Agricultural Academy of the Russian Academy of Sciences merged. In 2016, the Federal Agency for Scientific Organizations set a course to streamline the network of subordinate scientific organizations, create institutes and federal research centers based on similar topics. The followers of Academician V. P. Goryachkin work in these scientific institutes and centers. They develop the great scientific heritage left by him and, using the best domestic traditions, raise agroengineering science to a higher level.

Ключевые слова: научные школы, научные направления, научные дисциплины, земледельческая механика, сельскохозяйственная техника, Система машин, механизация и электрификация сельского хозяйства.

Key words: scientific schools, scientific directions, scientific disciplines, agricultural mechanics, agricultural machinery, Machine system, mechanization and electrification of agriculture.

Исследование проводили с целью определения роли научных школ в развитии механизации и электрификации сельского хозяйства России в 1920–2022 гг.

Методика. Для достижения цели исследования были применены следующие методы: проблемно-хронологический, проблемно-аналитический, сравнительно-исторический, типологический, ретроспективный и др., согласно которым описание событий осуществлялось во временной последовательности.

В дореволюционной России были созданы основы аграрной науки и сформулированы основополагающие идеи в области агрономии, почвоведения, почвозащитного земледелия.

После окончания гражданской войны и укрепления советской власти вопросы технического оснащения сельского хозяйства, разработка и внедрение сельскохозяйственных машин вышли на первый план.

В январе 1920 г. в составе Народного комиссариата земледелия был образован Отдел электрификации

сельского хозяйства («Электрозем»), в задачи которого входила разработка планов по использованию для нужд сельского хозяйства уже действовавших электростанций и тех, сооружение которых еще только намечалось по плану ГОЭЛРО [1].

В подготовке таких планов самое деятельное участие принимали ученые и специалисты отрасли. В 1922 г. Сельскохозяйственный ученый комитет был преобразован в Государственный институт опытной агрономии (ГИОА) и объединен с Отделом машиноведения, который в тот период стал основным научным учреждением страны по механизации сельского хозяйства. В составе Отдела машиноведения было пять отделений. Отделение машин и орудий возглавлял М. Н. Летошнев, отделение мотокультуры и двигателей – Я. И. Редькин, агрофизическое отделение – М. Х. Пигулевский, отделение связи и информации – К. И. Дебу. Отдел вел интенсивную научную работу. В 1925 г. был выпущен Сборник статей по вопросам сельскохозяйственного машиноведения, машиностроения и мотокультуры. С 1926 г. начали выходить «Известия Отдела машиноведения ГИОА» [2, 3, 4].

По инициативе В. П. Горячкина и Д. Д. Арцыбашева Постановлением № 283 СНК СССР от 18 декабря 1928 г. на базе машиноиспытательной станции при ТСХА был создан Всесоюзный институт сельскохозяйственной механики, переименованный в 1931 г. во Всесоюзный институт сельскохозяйственного машиностроения (ВИСХОМ). Первым директором этого института был назначен В. П. Горячкин [3] (рис. 1).



Рис. 1. Академик В.П. Горячкин.

В 1930 г. В. П. Горячкин в программной статье нового журнала «Сельскохозяйственная Машина» поставил перед агроинженерной наукой несколько важнейших задач: «...разработка и производство сельскохозяйственных машин у нас в будущем должно все более и более развиваться. ...Нужно самим конструировать для себя машины, как это делается во всех развитых странах. ...Совершенно необходимо, чтобы исследовательские институты и факультеты земледельческой механики строились и развивались, чтобы обе организации были кровно связаны между собой...» Следует отметить, что к этому времени благодаря наставническим усилиям В. П. Горячкина уже была подготовлена большая группа специалистов. Первый состав научных работников ВИСХОМ в количестве 83 человек был укомплектован из профессоров, преподавателей и выпускников инженерного факультета ТСХА и далее пополнялся выпускниками МИМЭСХ. Ученики и ближайшие сподвижники В. П. Горячкина,

Табл. 1. Вклад ведущих ученых в развитие первых агроинженерных учреждений

Ученые	Научные и образовательные учреждения
В.П. Горячкин	МСХА, ВИМ, МИМЭСХ, ВИСХОМ, ВАСХНИЛ
В.Н. Болтинский	МСХА, ВИМ, МИМЭСХ, ВИСХОМ
Н.Д. Лучинский	МСХА, ВИМ, ВИСХОМ
И.Ф. Василенко	ВИСХОМ, МИМЭСХ, ВАСХНИЛ
М.С. Сиваченко	МВТУ им. Баумана, ВИМ, ВАСХНИЛ
М.Г. Евреинов	ВИЭСХ, ТСХА, ММИ им. М.В. Ломоносова, ВАСХНИЛ
В.А. Желиговский	МСХА, ВИМ, МИМЭСХ, ВИСХОМ, ВАСХНИЛ
Л.Г. Прищеп	МИМЭСХ, ВИЭСХ, ВАСХНИЛ
М.Н. Летошнев	ЛИМЭСХ, ВИМ

будущие академики ВАСХНИЛ, корифеи агроинженерной науки, следуя наставлениям учителя, одновременно активно трудились практически во всех создаваемых в то время агроинженерных научных и образовательных учреждениях (табл. 1) [5, 6].

В аналогичном режиме напряженно трудились «на всех фронтах» и другие крупные ученые и специалисты – Д. К. Карельских, Б. А. Линтварев, В. Ю. Ган, А. Б. Трейвас и их коллеги. Интеллектуальные ресурсы были ограничены, поэтому использовались они во всех важнейших направлениях – теоретических исследованиях, разработках, конструировании, организационной работе, педагогической и наставнической деятельности.

Благодаря Горячкинской школе к середине 1930 гг. произошла революция в земледельческой механике – определение параметров и разработку конструкций новых машин стали осуществлять на основе теории и строгих технических расчетов. Была выдвинута и обоснована знаменитая «триада Горячкина», которая определяет классическое содержание любой исследовательской работы по обоснованию параметров сельскохозяйственных машин и их рабочих органов, – общая задача исследований заключается в совокупном рассмотрении физико-механических свойств обрабатываемого материала, рабочего органа машины и источника энергии (двигателя) как единой системы [7, 8].

Созданы и получили быстрое развитие первые научные школы в области агроинженерной науки, которыми руководили выдающиеся ученые (табл. 2).

Табл. 2. Ученые и научные школы 1920–1940 гг.

ФИО	Научная школа	Научное учреждение
В.П. Горячкин	Земледельческая механика	МИМЭСХ, ВИСХОМ
И.И. Артоболевский	Теория механизмов и машин	
Б.С. Свиричевский	Эксплуатация машинно-тракторного парка	
М.Н. Летошнев	Теория сельскохозяйственных машин	ВИМ, МИМЭСХ, ВИСХОМ
Н.Д. Лучинский	Теория сельскохозяйственных машин	
М.Х. Пигулевский	Агрофизические свойства сельскохозяйственных материалов	
В.А. Желиговский	Механическая технология сельскохозяйственных материалов	
М.Г. Евреинов,	Применение электрической энергии в сельском хозяйстве.	ВИЭСХ, МИМЭСХ, МСХА
В.С. Краснов,	Теоретические основы электротехники	
Г.И. Назаров	Применение электрической энергии в сельском хозяйстве.	
П.Н. Листов,	Теоретические основы электротехники	
Н.А. Артемьев	Теория тракторов и автомобилей	МИМЭСХ, НАТИ
В.Н. Болтинский,		
Д.К. Карельских,		
В.Я. Слонимский		

Основаны новые научные направления и дисциплины: земледельческая механика; теория сельскохозяйственных машин; теория тракторов и автомобилей; механическая технология сельскохозяйственных материалов; эксплуатация машинно-тракторного парка; применение электрической энергии в сельском хозяйстве; организация и технология ремонта машин. Разработаны основы теории, изданы первые фундаментальные научные труды и учебники по сельскохозяйственным машинам, процессам механизации и электрификации сельского хозяйства, применению сельскохозяйственных машин и электрической энергии в сельском хозяйстве (табл. 3).

Табл. 3. Научные труды и учебники

Автор	Название
Коллектив НАМИ	Типы тракторов для России
В.П. Горячкин	Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин
М.Н. Летошнев	Сельскохозяйственные машины. Теория, конструкция и расчет
В.З. Есин	Сельскохозяйственная электрификация
Ю.В. Скобельцын	Основы электрификации сельского хозяйства
В.Н. Болтинский	Конструкция и расчет тракторов и автомобилей
М.С. Сиваченко	Комплексная механизация сельскохозяйственного производства в третьей пятилетке
Н.Н. Ульрих	Задачи и механические средства очистки и сортирования зерна

В 1930–1940-е гг. решались вопросы перевода сельскохозяйственных машин и оборудования с ручного, конного и механического привода на электропривод. В эти же годы активно развивалась электромеханизация животноводства, в первую очередь молочных ферм. В ВИЭСХ были созданы первые отечественные доильные аппараты (В. Ф. Королев, Н. М. Аронович, Д. Д. Мартюгин, В. С. Краснов), опытные образцы электротракторов (П. Н. Листов, В. Г. Стеценко), электропривод молотилок и многих других сельскохозяйственных машин (В. С. Краснов, Г. И. Назаров, А. А. Краснов, Л. Я. Цивьян, М. И. Цейтлин), электромеханические агрегаты для стрижки овец (В. А. Фадеев, А. В. Перчихин), совместно с опытной станцией ТСХА проведены исследования по применению электроэнергии в овощеводстве (Б. А. Протопопов, Е. Д. Корольков, И. А. Будзко, А. А. Цекулина, В. В. Боков, Н. И. Гаврилов). Изучались вопросы воздействия на животных ультрафиолетового излучения (В. М. Вадимов, Е. А. Новикова). Под руководством М. Г. Евреинова глубокие исследования проводила электробиологическая лаборатория [9].

Крупные работы по электроснабжению сельского хозяйства в 1930-х гг. вели в Ленинградском филиале ВИЭСХ под руководством профессора Ю. В. Скобельцына [1, 10].

Руководство ВИМЭ (Н. Л. Фельдман, Г. Т. Косилов, М. С. Сиваченко, М. Е. Бейлис) уделяло огромное внимание развитию исследований по электрификации. Была создана лаборатория производства и распределения электроэнергии, развивались лаборатории механизации и электрификации животноводства и ветроиспользования.

Разработанную в ВИМЭ систему передачи электроэнергии в сельском хозяйстве с использованием земли в качестве провода высоко оценил академик Е. М. Кржижановский. Одним из авторов этой системы был И. А. Будзко, впоследствии ставший директором ВИЭСХ, профессором МИМЭСХ (МИИСП) и академиком ВАСХНИЛ [11, 12].

В 1929 г. была создана отраслевая академия наук – ВАСХНИЛ, секция механизации ВАСХНИЛ, четыре специализированных института, призванные осущест-

влять механизацию сельского хозяйства страны: ВИМ, ВИЭСХ, ВИСХОМ и НАТИ. Таким образом, к началу 1940-х гг. в СССР была создана основа агроинженерной науки [12, 13].

После Великой Отечественной войны ценой огромных усилий советских людей были восстановлены разрушенные и построены новые заводы, к концу первого послевоенного пятилетия уровень выпуска сельскохозяйственной техники превысил довоенный [14].

Закон о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946–1950 гг. предусматривал значительное увеличение объемов сельскохозяйственного машиностроения, которое должно было обеспечить сельское хозяйство новыми высокопроизводительными тракторами и сельскохозяйственными машинами. Конструкции машин должны были отвечать последним достижениям советской и зарубежной науки [14].

Создание новой сельскохозяйственной техники требовало развития методов научных исследований, новых более эффективных технологий конструкторских работ, консолидации усилий представителей агроинженерной науки, испытателей и производителей техники. Для разработки новых и улучшения имеющихся конструкций машин были организованы специализированные институты и отделы механизации, расширена сеть СКБ, создана сеть машиноиспытательных станций. Была организована закупка образцов импортной техники для их тщательного изучения, для чего были командированы специалисты в США, Германию, Францию, Голландию [15, 16].

В марте 1946 г. состоялось большое Межведомственное совещание при Наркомате земледелия по решению вопросов механизации сельского хозяйства.

Впервые была поставлена задача создания научного обеспечения комплексной механизации сельского хозяйства страны.

Большая роль отводилась крупным ученым агроинженерной науки, представителям Горячкинской плеяды ученых. Многие из них выросли в подлинных лидеров научных направлений и научных коллективов, возглавили важнейшие для страны разработки. Звания академиков ВАСХНИЛ в 1940–1950 гг. были удостоены: В. А. Желиговский (1948 г.), И. Ф. Василенко (1948 г.), М. Г. Евреинов (1948 г.), Б. С. Свищевский (1948 г.), В. П. Селезнев (1948 г.), В. Н. Болтинский (1956 г.), И. А. Будзко (1956 г.), А. Н. Карпенко (1956 г.), Н. Д. Лучинский (1956 г.), М. В. Сабликов (1956 г.), П. М. Василенко (1956 г.) [3].

Членами-корреспондентами ВАСХНИЛ в 1956 г. были избраны: В. Б. Бабук, В. А. Кореньков, В. С. Крамаров, В. С. Краснов, Г. И. Назаров, Е. М. Фатеев [12].

В начале 1946 г. в связи с передачей тракторной промышленности в ведение Министерства сельскохозяйственного машиностроения НАТИ был разделен на две части. Автомобильная часть осталась в ведении Минавтопрома СССР и была преобразована в научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (НАМИ). Тракторная часть передана Минсельхозмашу СССР и на ее базе организован Всесоюзный научно-исследовательский тракторный институт (НАТИ). Директором реорганизованного НАТИ был назначен А. Н. Буров, главным инженером – В. Я. Слонимский. В Советском Союзе первая Система машин была разработана ВИМ на 1955–1965 гг., затем на 1966–1970 гг., на 1971–1975 гг. и последующие пятилетия. Следующая система машин Советского Союза была разработана на 1985–1990 и до 1995 г. [17, 18, 19].

Первые исследования по обоснованию Системы машин интенсивно начались непосредственно после

сентябрьского (1953 г.) Пленума ЦК КПСС. Результатом стало создание Системы машин на 1955–1960 гг. В основу первой системы машин были положены достижения отечественной и зарубежной науки и техники с учетом природных и хозяйственных условий отдельных зон. При этом предусматривалось значительное сокращение затрат труда и средств на производство сельскохозяйственной продукции [18, 20].

Кроме союзной, создавались также зональные Системы машин. В основу районирования страны на зоны и подзоны механизации при создании Систем машин приняты природно-климатические условия и их влияние на работу машин. При этом в числе агробиологических природных условий учитывали главным образом плодородие почв, мощность пахотного (гумусного) слоя; механический состав почв и их удельное сопротивление; влажность и водный режим почв; размеры и рельеф полей, засоренность камнями, изрезанность полей препятствиями и размеры обрабатываемых участков; растительную массу убираемых культур и засоренность полей сорняками; погодные условия по сельскохозяйственным сезонам. Всего по Советскому Союзу было установлено 20 зон механизации с большим количеством подзон во многих из них. Например, в Нечерноземной зоне Российской Федерации были установлены три зоны и четыре подзоны механизации [21].

Разнообразие условий по отдельным зонам механизации требовало дифференцированного подхода к выбору технологий и технологических приемов возделывания сельскохозяйственных культур, обеспечения их разнообразными комплексами механизированных средств с особенностями конструкций отдельных машин и режимов их работы. Системы машин в значительной мере были реализованы. Только за первую послевоенную пятилетку было принято к массовому производству более 150 наименований новых сельскохозяйственных машин. В создании Системы машин большое значение имели научные труды сотрудников Всесоюзного института механизации сельского хозяйства (ВИМ), Всесоюзного института сельхозмашиностроения (ВИСХОМ) и электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ), труды других научных учреждений, а также вузов и факультетов механизации и электрификации сельского хозяйства. Разработка и совершенствование систем машин для комплексной механизации сельского хозяйства были начаты в ВИМ в 1954 г. Сотрудники института В. М. Бейлис, Е. А. Коган, Л. М. Пилюгин, И. А. Гамбурцева, Н. А. Куликова, Г. Е. Журавлева и др. внесли большой творческий вклад в разработку новых Систем машин, технологических карт, а также создали научно-методическую базу, необходимую при исследованиях комплексной механизации сельскохозяйственного производства [13, 18, 20].

Результаты этих работ широко использовали научно-исследовательские учреждения в бывшем СССР и в ряде зарубежных стран (Кубе, Болгарии, Чехословакии и др.), ими были подготовлены ряд монографий, рекомендаций, методик, статей, которые и поныне служат практическим руководством для специалистов, занимающихся разработкой систем машин, а также для студентов сельскохозяйственных вузов.

В 1961–1964 гг. была разработана Система машин для комплексной механизации сельскохозяйственного производства, включающая свыше 1500 наименований машин и приспособлений. Она должна была быть реализована в 1966–1970 гг. Свыше 60 % позиций этой системы подлежали разработке; основная часть находилась в стадии внедрения [5, 20].

Система машин использовалась для составления плана работ промышленности. Она исключала возможность выпуска машин, дублирующих друг друга, имеющих необоснованные параметры и экономически неэффективных. Разработка пятилетних «Систем машин» стала итогом и смотрам достижений, оценкой организационной работы, планов и прогнозов ВИМ и сотни других научных и конструкторских коллективов [5, 20]. Ряд из этих разработок были удостоены государственных премий (табл. 4).

Табл. 4. Научные достижения ВИМ в 1940–1960 гг.

Год	Награда	Разработка и разработчик(и)
1941	Государственная премия СССР	Ф.М. Соловей «За разработку универсальных культиваторов-растениепитателей»
1948	Государственная премия СССР	Ф.Т. Гоголев «За создание семейства простейших деревянных сушилок ПЗС»
1949	Государственная премия СССР	Ф.Н. Волков «За создание самоходной широкозахватной сенокосилки КС-10»; М. С. Сиваченко, С. А. Герасимов, В. Д. Павлов «За создание и внедрение в производство свеклоуборочного комбайна СПГ-1»
1950	Государственная премия СССР	А.Н. Карпенко «За разработку тракторных зерновых и зернотуковых сеялок»
1951	Государственная премия СССР	П.С. Кучумов, А. Ф. Бондаренко, М. А. Луканов, А. И. Селиванов «За разработку технологий ремонта и восстановления базисных деталей тракторов»
1952	Ленинская премия	А.А. Плишкин «За разработку и внедрение Системы мероприятий по защите почв от ветровой эрозии в Северном Казахстане и Западной Сибири»
	Государственная премия СССР	В.А. Кореньков, И. Д. Еремеев, Г. А. Мельников «За создание трехрядного свеклокомбайна»

Работы по электрификации сельского хозяйства получили развитие в Энергетическом институте Академии наук. Начатые в 1935–1936 гг. под руководством Г. М. Кржижановского и В. И. Вейца, они были продолжены в энергетических учреждениях академий наук Украины, Белоруссии, Армении, Азербайджана, Литвы, Эстонии, Латвии, Казахстана, Киргизии, а также в филиалах АН СССР – Карельском, Коми, Казанском, Дагестанском и Западносибирском, где проводились комплексные исследования по вопросам электрификации сельскохозяйственного производства [15].

Послевоенные годы ознаменовались также значительным расширением объема научных работ по энергетике и электрификации сельского хозяйства.

В период послевоенного восстановления народного хозяйства ущерб, нанесенный войной сельским электроустановкам, был быстро ликвидирован. Уже в 1946 г. потребление электроэнергии на селе превысило довоенный уровень.

Работы по электрификации сельского хозяйства получили развитие в Энергетическом институте Академии наук. Начатые в 1935–1936 гг. под руководством Г. М. Кржижановского и В. И. Вейца, они были продолжены в энергетических учреждениях академий наук Украины, Белоруссии, Армении, Азербайджана, Литвы, Эстонии, Латвии, Казахстана, Киргизии, а также в филиалах АН СССР – Карельском, Коми, Казанском, Дагестанском и Западносибирском, где проводились комплексные исследования по вопросам электрификации сельскохозяйственного производства.

В 1956 г. ВИЭСХ начал широкомасштабные работы по разработке и внедрению в разных регионах прогрессивного беспривязного содержания скота. Переход

на новые технологии инициировал создание новых машин и оборудования, прежде всего станочных доильных установок. Большую помощь при подготовке специалистов в области механизации животноводства оказал учебник «Механизация трудоемких процессов в животноводстве», написанный ленинградским ученым В. Г. Соминиче. Этот учебник в течение многих лет оставался основным для вузов [21].

В решении проблемы повышения скоростей машинно-тракторного агрегата участвовало более 30-и организаций, в числе которых были ведущие НИИ, КБ и заводы, а также специалисты более 100 научных и учебных организаций. На симпозиумах, конференциях и семинарах обсуждались различные аспекты этой проблемы.

Звания лауреатов Государственной Премии были присуждены В. Н. Болтинскому, академику ВАСХНИЛ, заведующему отделом ВИМ, руководителю работы; А. Я. Поляку, руководителю лаборатории; В. А. Дегтяреву, заместителю директора ВИМ; кандидатам технических наук А. Д. Цупаку, А. И. Мариненко; Н. М. Орлову, заведующему отделом ВИСХОМ; И. Ф. Дроновой, старшему научному сотруднику ВНИИПТИМЭСХ; М. А. Шарову, главному конструктору Волгоградского тракторного завода им. С. Орджоникидзе; Б. П. Кашубе, главному конструктору Харьковского тракторного завода им. С. Орджоникидзе; И. П. Ксеневичу, генеральному конструктору Минского тракторного завода им. В. И. Ленина; Г. Я. Любашину, главному инженеру КубНИИТиМ по испытанию тракторов и сельскохозяйственных машин (рис. 2).



Рис. 2. Академик ВАСХНИЛ В.Н. Болтинский.

Была создана новая отечественная тракторная техника, способная работать на скорости 9...15 км/ч. Производительность скоростных МТА увеличилась в 1,5 раза в сравнении с тракторами первого поколения.

Основной вклад в решение проблемы повышенных скоростей внес ВИМ – инициатор, координатор и ведущий исполнитель работ. Разработаны главные положения научных основ повышения рабочих скоростей МТА, обоснован оптимальный диапазон повышения скорости, разработаны основы оптимизации технологий выполнения работ, правила комплектования хозяйств скоростной техникой и ее эксплуатации, сформированы рекомендации по организации внедрения скоростной техники, осуществлено массовое перевооружение сельскохозяйственного производства, созданы и исследованы первые опытные и макетные образцы сельскохозяйственных машин, тракторов кл. 1,4; 3 и 5, разработаны технологии работы на повышенных скоростях, предложено рациональное конструирование



Рис. 3. Самоходный корнеуборочный комбайн РКС-6.

скоростных тракторов и рабочих агрегатов, дан прогноз дальнейшего развития сельскохозяйственной техники, проведен анализ экономической эффективности ее использования [22].

В 1978 г. институт был удостоен Государственной премии СССР «За научную разработку и массовое внедрение в производство поточной системы уборочно-транспортных комплексов». Коллективом ВИМ было разработано и издано несколько десятков операционных технологий производства сельскохозяйственных культур, обеспечивающих более эффективное использование техники.

Государственной премии за эту работу были удостоены также сотрудники других организаций: М. С. Рунчев, В. Я. Жуков, Э. И. Липкович, И. Я. Брынькин (ВНИИПТИМЭСХ), О. Г. Ангилеев (Ставропольский НИИСХ), П. Д. Педошенко (Государственный племенной завод «Ипатовский»), И. А. Симоненко (совхоз «Янушевский», Ставропольский край), А. Т. Сигидиненко (совхоз «Серафимовский», Ставропольский край).

В 1980 г. Государственную премию СССР получили сотрудники ВИМ Н. И. Кривоногов, Ю. В. Аванесов, В. И. Бессарабов, Г. М. Бузенков и А. А. Репчанский «За разработку и внедрение в производство высокопроизводительных машин РКС-6 и РКС-4 для уборки сахарной свеклы в основной и поливных зонах свекло-сеяния» (рис. 3).

Были созданы принципиально новые корнеизвлекающие рабочие органы и конструкции опытных образцов шестирядной корнеуборочной машины. Разработаны научные основы процесса выкапывания корнеплодов активными рабочими органами, выданы рекомендации по выбору их основных и конструктивных кинематических параметров.

Высокопроизводительные машины РКС-6 и РКС-4, работающие на иных принципах, чем ранее выпускавшиеся, обеспечивали высокое качество уборки, могли работать в условиях повышенной влажности почвы независимо от состояния ботвы в период уборки. Машины РКС-6 и РКС-4 к концу 1970-х гг. полностью заменили машины теребильного типа. С 1976 по 1988 гг. было выпущено около 50 тыс. комбайнов РКС-6 и более 3 тыс. РКС-4 [1].

В конструкциях машин использовано 17 авторских свидетельств на изобретения сотрудников ВИМ. В 1981 г. коллективу ученых и сотрудников ВИМ была присуждена Премия Совета Министров СССР «За разработку и внедрение в производство комплекса машин

Табл. 5. Ученые и их научные школы в 1960–1970 гг.

ФИО	Научная школа
В.А. Желиговский	Методы оптимального проектирования сельскохозяйственных производственных процессов
П.М. Василенко	Теория зерноочистительных машин
В.Н. Болтинский	Теоретические и практические аспекты повышения рабочих скоростей машинно-тракторных агрегатов и повышение энергонасыщенности тракторов
М.Е. Мацепуро	Теоретические основы мелиорации в земледелии
	Технологические основы механизации уборки картофеля
А.И. Селиванов	Основы теории надежности и долговечности машин
И.М. Хохлов, Х.А. Хачатрян	Основы механизации горного земледелия
И.И. Артоболовский	Теория многозвенных механизмов и машин
	Методы кинематического анализа
М.В. Сабликов, Г.М. Рудаков	Технологии и технические средства для хлопководства, плодоводства и овощеводства
И.А. Будзко	Технологии и технические средства для хлопководства, плодоводства и овощеводства
Л.Г. Прищеп	Электрофизические воздействия на биологические объекты
П.Н. Листов	Электроприводы для технических средств в сельском хозяйстве

для механизации работ в селекции, сортоиспытании и первичном семеноводстве зерновых культур».

В 1960–1970 гг. получили дальнейшее развитие научные школы в сфере механизации, электрификации сельскохозяйственного производства, технического сервиса и надежности машин. Учеными агроинженерных НИИ и вузов были созданы фундаментальные научные труды, написаны десятки капитальных монографий, книг и учебников (табл. 5, 6).

В начале 1990-х гг. в инженерно-технической сфере АПК России была проведена существенная реорганизация. Создана Российская академия сельскохозяйственных наук, в состав которой вошли 38 ПКБ и 15 научно-исследовательских учреждений инженерного профиля, в том числе – 10 Всероссийских специализированных институтов и 4 проектно-технологических зональных института [19].

По инициативе вице-президента РАСХН академика Л. П. Кормановского начиная с 1992 г. ежегодно проводили научно-практические конференции «Научно-технический прогресс в инженерно-технической сфере АПК России», на которых обсуждали все новые научные разработки в этой области – ландшафтное и координат-

Табл. 6. Видные ученые агроинженерной науки 1960–1990 гг.

Ученый	Научная школа (научное направление)
Прищеп Л.Г.	Биоэлектротехнологии
Кубышев В.А.	Технологии уборки и послеуборочной обработки зерна, разработка машинных технологий возделывания сельскохозяйственных культур
Болтинский В.Н.	Теория и расчет тракторных двигателей
	Скоростные машинно-тракторные агрегаты
Бузенков Г.М.	Комбинированные сельскохозяйственные машины комплексных механизированных технологий
Стребков Д.С.	Технологии создания солнечных элементов и модулей, энергосберегающие АПК
Кряжков В.М.	Повышение ресурса энергонасыщенных тракторов и сельхозмашин
Анискин В.М.	Механизация послеуборочной обработки и хранения зерна
Селиванов А.И.	Диагностика и техническое обслуживание сельскохозяйственной техники
Будзко И.А.	Системы энергоснабжения сельскохозяйственного производства
Бородин И.Ф.	Автоматизация сельскохозяйственной техники

ное земледелие, механотроника и интеллектуализация машин, роботизация, агроинжиниринг и технический сервис, обслуживание фермерских хозяйств машинно-технологическими станциями и др. Эти конференции и выпускаемые по их результатам научные сборники стали по сути возобновлением и продолжением хорошей традиции, заложенной академиком В. А. Желиговским, – выпуск ежегодных сборников научных трудов по земледельческой механике памяти академика В. П. Горячкина.

Как отмечалось в «Справке о разработке Системы технологий и машин для производства и переработки сельскохозяйственной продукции», Российская наука, заметно опережая зарубежных коллег в научной разработке процессов индустриализации сельского хозяйства, в использовании машин высокой единичной энергонасыщенности, комбинированных блочно-модульных агрегатов и др., к сожалению, не была поддержана системой их освоения.

После распада СССР Указом Президента Российской Федерации от 30 января 1992 г. № 984 ВАСХНИЛ и Россельхозакадемия, созданная в 1990 г. на базе Всероссийского отделения ВАСХНИЛ (образованного в 1979 г.), объединены в единую Российскую академию сельскохозяйственных наук.

Члены ВАСХНИЛ, проживающие и работающие на ее территории, официально признаны членами Россельхозакадемии.

Академиками-секретарями Отделения механизации, электрификации и автоматизации Российской академии сельскохозяйственных наук стали:

академик Николай Васильевич Краснощеков (1992–2002 гг.);

член-корреспондент Юрий Федорович Лачуга (февраль-март 2003 г.);

член-корреспондент Анатолий Алексеевич Артюшин (2003–2007 гг.);

профессор Валерий Александрович Самсонов (2007–2008 гг.);

член-корреспондент Иван Васильевич Горбачев (2008–2013 гг.).

С 2003 г. вице-президентом Россельхозакадемии, курирующим агроинженерную науку, был назначен академик Юрий Федорович Лачуга, крупный ученый, педагог и организатор науки. Под руководством Ю. Ф. Лачуги агроинженерные научно-исследовательские институты успешно развивались и плодотворно работали до реорганизации 2013 г.

В октябре 2013 г. в рамках реформы Российской академии наук произошло объединение государственных академий РАН и Россельхозакадемии с РАН. Россельхозакадемию (с 1990 по 2013 гг.) возглавлял Геннадий Алексеевич Романенко, ведущий ученый в области научных основ производства сельскохозяйственной продукции. При этом Россельхозакадемия преобразовалась в Отделение сельскохозяйственных наук РАН, а ее учреждения вошли в состав данного Отделения. Возглавил Отделение академик РАН Ю. Ф. Лачуга, ведущий ученый страны в области агроинженерной науки.

Отделения Россельхозакадемии, войдя в состав Российской академии наук, преобразовались в секции. Отделение механизации и электрификации сельского хозяйства Россельхозакадемии становится секцией отделения ОСХН РАН с аналогичным названием.

В 2016 г. Федеральным агентством научных организаций был взят курс на упорядочение сети подведомственных научных организаций, создание на базе близких по тематике институтов, федеральных научных центров и организацию условий для проведения ком-

плексных исследований по приоритетным направлениям развития науки.

В соответствии с Положением о ФАНО Постановлением правительства РФ от 26 июня 2010 г. № 539 «О порядке создания и реорганизации федеральных государственных учреждений» было принято решение о создании Федерального научного агроинженерного центра ВИМ на базе ВИМ с присоединением к нему ВИЭСХ и ГОСНИТИ (О структуре федеральных органов исполнительной власти: указ Президента РФ от 15.05.2018 N 215. Электронный ресурс (дата обращения 15 мая 2018)).

Таким образом, в 2016 г. был объединен научный потенциал, кадровый состав и материально-техническая база трех ведущих институтов в области механизации сельского хозяйства и сельскохозяйственного машиностроения. Руководителем Федерального научного агроинженерного центра ВИМ назначен академик РАН, доктор технических наук Андрей Юрьевич Измайлов.

В 2017 г. в состав ФНАЦ ВИМ вошли:

- Всероссийский научно-исследовательский институт механизации животноводства (Подольск);
- Всероссийский научно-исследовательский институт механизации и информатизации агрохимического обеспечения сельского хозяйства (Рязань);
- Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (Санкт-Петербург);
- Рязанский научно-исследовательский институт сельского хозяйства (Рязань).

В настоящее время Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ является ведущим научно-исследовательским комплексом страны в области агроинженерной науки и образования, машинно-технологической модернизации сельского хозяйства, внедрения в агропромышленный комплекс новейших интеллектуальных технологий и роботизированных технических средств нового поколения [23].

Последователи академика В. П. Горячкина творчески развивают оставленное им большое научное наследие и, используя лучшие отечественные традиции, поднимают агроинженерную науку на более высокий уровень. За творческое развитие научных идей В. П. Горячкина, огромный вклад в агроинженерную науку, разработку инновационной техники и технологий Золотой медали имени В. П. Горячкина удостоены выдающиеся ученые: академики ВАСХНИЛ В. А. Желиговский (1971 г.), И. И. Артоболевский (1974 г.), П. И. Василенко (1977 г.), Г. Е. Листопад (1989 г.), профессор Н. И. Клеинин (1992 г.), академик Россельхозакадемии Н. В. Краснощеков (1995 г.), академик РАН В. И. Черноиванов (1998 г.), академик Россельхозакадемии И. П. Ксенович (2001 г.), академик РАН Л. П. Кормановский (2004 г.), академик РАН В. М. Кряжков (2008 г.), академик РАН В. И. Сыроватка (2011 г.), профессор Э. В. Жалнин (2014 г.), академик РАН А. И. Завражнов (2018 г.). Члены секции механизации, электрификации и автоматизации ОСХН РАН, академики и члены-корреспонденты РАН, продолжая Горячкинские традиции, создали и активно развивают отечественные научные школы в сфере агроинженерии (табл. 7).

Выводы. Развитие агроинженерных учреждений, научных школ, принципов и алгоритмов создания сельскохозяйственной техники имеют особые характерные черты применительно к нескольким историческим периодам: 1930–1941 гг., 1945–1990 гг., 1991–2020 гг.

К началу 1930-х гг. прошлого века было положено начало комплексному системному становлению и раз-

Табл. 7. Видные ученые агроинженерной науки и их научные школы (1991–2022 гг.)

Академики и члены-корреспонденты РАН	Научная школа
Морозов Н.М., Лозовский В.В.	Экономика сельскохозяйственного производства
Черноиванов В.И., Ерохин М.Н., Дорохов А.С.	Надежность, технический сервис и качество сельскохозяйственной техники. Биомашинные системы
Измайлов А.Ю.	Автоматизация и роботизация машин и агрегатов. Транспортно-технологические комплексы
Лачуга Ю.Ф., Лобачевский Я.П.	Системы машин и технологий сельскохозяйственного производства
Попов В.Д., Сысуев В.А., Федоренко В.Ф.	Природоподобные технологии в кормопроизводстве и животноводстве
Альт В.В., Брюханов А.Ю.	Информационно-измерительные комплексы и экспертные системы для оценки состояния биологических объектов и машин
Иванов Ю.А., Соловьев С.А., Цой Ю.А., Кирсанов В.В.	Механизация и автоматизация животноводства
Завражнов А.И., Утков Ю.А.	Технологии и технические средства для садоводства
Дидмандзе О.Н., Годжаев З.А.	Эксплуатация мобильных энергетических средств. Альтернативные источники энергии
Таранов М.А., Цугленок Н.В., Тихомиров Д.А.	Энергоснабжение агропромышленного комплекса. Электро- и теплоагрегаты
Черников В.Г., Ростовцев Р.А.	Механизация и автоматизация возделывания и переработки лубяных культур
Мазитов М.К., Панасюк А.Н., Пахомов В.И., Иванов Н.М.	Механизация растениеводства. Комбинированные агрегаты для обработки почвы, посева и уборки с.х. культур

витию научно-технического и кадрового потенциала механизации сельского хозяйства и сельскохозяйственного машиностроения в нашей стране.

Были созданы первые агроинженерные научно-исследовательские, образовательные и испытательные учреждения, сформированы первые научные школы. У истоков создания этих учреждений стояли выдающиеся ученые и организаторы науки и образования – В. П. Горячкин, Д. Д. Арцыбашев, Н. И. Мерцалов, И. И. Артоболевский.

Создание научно-технических основ, подготовка инженерных кадров позволили в короткие сроки разработать и поставить на производство важнейшую сельскохозяйственную технику, обеспечить производство необходимых для населения страны продуктов питания, способствовало продвижению программ коллективизации и индустриализации, обеспечило, в конечном счете, продовольственную независимость страны в предвоенный период.

В послевоенный период было завершено создание стройной системы агроинженерных научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений. Была организована сеть государственных зональных машиноиспытательных станций в основных почвенно-климатических зонах страны.

Стремительное развитие социальной жизни страны в период «оттепели» начала 1950-х гг., необходимость резкого улучшения качества жизни людей, существен-

ного расширения ассортимента продуктов питания поставило задачу расширенной диверсификации сельскохозяйственного производства, что явилось побудительной причиной создания Систем машин и технологий.

В ходе реализации первой и последующих Систем машин в нашей стране были созданы современные образцы и комплексы сельскохозяйственной техники: скоростные пахотные и пропашные тракторы различных классов, самоходные уборочные комбайны, другие важнейшие группы сельскохозяйственных машин.

Характерные черты эволюционного развития тракторов и сельскохозяйственных машин в период с 1930 по 2020 гг. следующие: непрерывное увеличение номенклатуры машин в составе предметных групп; увеличение технических параметров, влияющих на производительность (мощность двигателя тракторов, ширина захвата полевых машин, повышение рабочих скоростей, комбинирование агрегатов и рабочих органов).

По мере развития Систем машин необходимыми параметрами эволюции становились: повышение надежности, безопасности и улучшение условий труда операторов; энерго- и ресурсосбережение, энергонасыщенность, расширение функциональности, мультипликативность, улучшение показателей качества работы, унификация компонентов, дальнейшее увеличение производительности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (учреждения, организации). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Стребков Д.С., Молоснов Н. Ф. Роль ВИЭСХ в становлении и развитии энергетики и электрификации сельского хозяйства // *Вестник ВИЭСХ*. 2005. Т. 52. № 1 (1). С. 11–38.
2. Капитонов Е. Н. История сельскохозяйственного машиностроения России. Тамбов: ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. 60 с.
3. Музей агроинженерии и техники имени В. П. Горячкина, РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева. Личное дело В. П. Горячкина. Дело № 40. С. 7.
4. Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева. 1865–1965. М.: Колос, 1969. 525 с.
5. Ценч Ю. С. Становление и развитие научно-технического потенциала механизации сельского хозяйства России: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М., 2021.
6. Жалнин Э. В. Постулаты В. П. Горячкина и их дальнейшее развитие // *Вестник МГАУ имени В. П. Горячкина*. 2008. № 2 (27). С. 15–21.
7. Артюшин А. А. Агроинженерная наука на службе АПК // *Техника в сельском хозяйстве*. 2004. № 3. С. 3–4.
8. Становление агроинженерной науки и образования в России (XIX–XX вв.) / С. А. Иофинов, В. Г. Еникеев, В. Ф. Скробач и др. СПб., 1999. 265 с.
9. Сизов С. Г. Деятельность образовательных учреждений в Омске в 1918–1919 гг. Актуальные проблемы изучения истории Гражданской войны в России // *Материалы всероссийской научной конференции, посвященной 100-летию начала Гражданской войны и 100-летию государственной архивной службы России*. 2019. С. 126–133.
10. Сыроватка В. И., Прихавка П. Я. Этапы сельской электрификации // *Техника в сельском хозяйстве*. 1980. № 4. С. 34–37.
11. Механизация и электрификация сельского хозяйства, строительство сельскохозяйственных построек / Б. Г. Турбин, С. А. Иофинов, Н. Г. Соминич и др. М.; Л., 1949. 632 с.
12. Гончаров Н. П. «Откуда есть пошла» ВАСХНИЛ, или 165 лет государственной организации аграрной науки в России // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2004. № 4 (154). С. 119–129.
13. ВИМ: история механизации (1930–2005 гг.). М.: ВИМ, 2005. 504 с.
14. О пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946–1950 гг.: Закон СССР от 18 марта 1946 г.
15. Овсянников В. А. Сравнительный статистический анализ обеспеченности СССР, России и США сельскохозяйственной техникой // *Молодой ученый*. 2015. № 21. С. 419–423.
16. Рунов Б. А. Роль агроинженерной науки в мире // *Вестник МГАУ*. 2016. № 3 (73). С. 7–10.
17. Агроинженерная наука России: становление, современное состояние, стратегия развития / Ю. Ф. Лачуга, Е. Г. Лысенко, Л. С. Орсики и др. М.: Росинформмаш, 2007. 346 с.
18. Кормановский Л. П. О создании российской системы машин для АПК // *Техника в сельском хозяйстве*. 1993. № 5–6. С. 2–3.
19. Ценч Ю. С. Агроинженерная наука в СССР в 1920–1941 годы // *Технический сервис машин*. 2021. № 1 (142). С. 178–192.
20. Лобачевский Я. П., Ценч Ю. С., Бейлис В. М. Создание и развитие систем машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // *История науки и техники*. 2019. № 12. С. 46–55.
21. Ценч Ю. С. Научно-технический потенциал как главный фактор развития механизации сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. № 2. С. 4–13.
22. Измайлов А. Ю., Ценч Ю. С. Историко-тематическая экспозиция «Становление и развитие научно-технического и кадрового обеспечения механизации и электрификации сельского хозяйства» // *Технический сервис машин*. 2021. № 1 (142). С. 193–209.
23. Аспирантура в структуре научно-исследовательского института в новых условиях // *Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции / А. Ю. Измайлов, Я. П. Лобачевский, И. Г. Смирнов и др. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 2015. С. 41–44.*

Поступила в редакцию 04.12.2023
После доработки 21.12.2023
Принята к публикации 09.01.2024

Земледелие и мелиорация

УДК 631.452: 631.559: 631.8: 631.582: 633.63: 633.1

DOI: 10.31857/S2500262724010025, EDN: DCFAIN

ИЗМЕНЕНИЕ ПОЧВЕННОГО ПЛОДОРОДИЯ И УРОЖАЙНОСТИ КУЛЬТУР ПРИ КРАТКОСРОЧНОМ И ДЛИТЕЛЬНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УДОБРЕНИЙ В ЗЕРНОСВЕКЛОВИЧНОМ СЕВООБОРОТЕ ЦЧР**О. А. Минакова**, доктор сельскохозяйственных наук,
Л. В. Александрова, В. М. Вилков*Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А. Л. Мазлумова, 396030, Воронежская обл., Рамонский р-н, пос. ВНИИСС, 86
E-mail: olalmin2@rambler.ru*

Исследования проводили с целью определения изменений почвенного плодородия и урожайности основных культур зерносвекловичного севооборота при длительном воздействии удобрений (10 ротации) в условиях ЦЧР. Работа выполнена на черноземе выщелоченном малогумусном в Воронежской области. Проанализированы изменения с 1936–1945 гг. (1-я ротация) по 2018–2022 гг. (10-я ротация). Схема опыта предусматривала следующие варианты насыщенности 1 га пашни удобрениями: без удобрений, $N_{10}P_{10}K_{10} + 2,8$ т/га навоза, $N_{20}P_{20}K_{20} + 2,8$ т/га навоза, $N_{30}P_{30}K_{30} + 2,8$ т/га навоза, $N_{10}P_{10}K_{10} + 5,6$ т/га навоза. Изменение плодородия почвы в слое 0...20 см под влиянием удобрений от 1-й к 10-й ротации выразилось в повышении гидролитической кислотности на 5,3...83,3 %, содержания подвижного K_2O – на 18,9...74,4 %, емкости катионного обмена – на 27,8...35,7 %, подвижного P_2O_5 – на 7,8...9,0 % (при $N_{20}P_{20}K_{20} + 2,8$ т/га навоза и $N_{30}P_{30}K_{30} + 2,8$ т/га навоза); снижении гумусности на 0,41...0,73 %, $N-NO_3$ – на 25,3...47,7 %, P_2O_5 – на 13,3...31,6 % (в контроле и $N_{10}P_{10}K_{10} + 2,8$ т/га навоза). Длительное использование удобрений увеличивало урожайность зерна ячменя на 11,3...50,1 %, овса – на 4,0...51,2 %, озимой пшеницы – на 13,4...30,6 %, корнеплодов сахарной свеклы – на 15,0...36,7 %, уменьшало – сбор зеленой массы клевера на 4,9...27,7 % и повышало выход побочной продукции всех культур на 6,1...23,0 %. Продуктивность 1 га удобренной пашни от 1-й к 10-й ротации (за вычетом роста на 0,96 тыс. зерн. ед./га вследствие возделывания более продуктивных современных сортов) увеличилась на 3,3...18,3 %. Самый высокий уровень плодородия почвы и продуктивности севооборота обеспечивало длительное применение $N_{30}P_{30}K_{30} + 2,8$ т/га навоза, которое достигалось двукратным внесением в течение ротации девятипольного севооборота $N_{135}P_{135}K_{135}$ под сахарную свеклу и однократным – 25 т/га навоза в паровом поле.

CHANGES OF SOIL FERTILITY AND YIELD OF CROPS WHEN APPLYING FERTILIZERS IN A GRAIN-ARABLE CROP ROTATION OF THE CENTRAL BLACK-EARTH REGION FOR A SHORT AND LONG TIME**O. A. Minakova, L. V. Alexandrova, V. M. Vilkov***Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar, 396030, Voronezhskaya obl., Ramonskii r-n, pos. VNISS, 86
E-mail: olalmin2@rambler.ru*

Aim of the investigations was to reveal changers in soil fertility and yield of main crops in a grain-arable crop rotation with fertilizer effect in 1st rotation (short-term application) and 10th rotation (long-term application) under conditions of the Central Black-Earth Region. The work was performed in a long-term field experiment using low-humic leached chernozem under conditions of Voronezh region. The data of 1936–1945 (1st crop rotation) and 2018–2022 (10th rotation) years were analyzed. The experiment scheme including saturation of 1 ha of arable land with fertilizers: without fertilizers, $N_{10}P_{10}K_{10} + 2.8$ t/ha of manure, $N_{20}P_{20}K_{20} + 2.8$ t/ha of manure, $N_{30}P_{30}K_{30} + 2.8$ t/ha of manure, and $N_{10}P_{10}K_{10} + 5.6$ t/ha of manure. Change of soil fertility in the layer of 0–20 cm from 1 to 10 rotation under influence of fertilizers appeared as increase of hydrolytic acidity (by 5.26... 83.3 %), exchange K_2O content (by 18.9...74.4 %), cation exchange capacity (by 27.8...35.7 %) and mobile P_2O_5 (by 7.81...9.00 %) (when using $N_{20}P_{20}K_{20} + 2.8$ t/ha of manure and $N_{30}P_{30}K_{30} + 2.8$ t/ha of manure); also, decrease of humus content by 0.41...0.73 %, $N-NO_3$ by 25.3...47.7 % and P_2O_5 by 13.3–31.6 % in the control and in the variants with $N_{10}P_{10}K_{10} + 2.8$ or 5.6 t/ha of manure was noted. Long-term application of fertilizers in a crop rotation improved grain yield of barley by 11.3...50.1 %, oats by 4.0...51.2 %, winter wheat by 13.4...30.6 % and sugar beet roots by 15.0...36.7 %, and reduced green mass of a clover 6.1...23.0 %. But, in addition, it increased by-products' yield of each crop by 6.1...23.0 %. Productivity of the fertilized arable land per 1 ha increased by 3.30...18.3 % from 1st to 10th rotation (minus yield improvement by 0.96 thousand grain units/ha due to cultivation of more productive modern varieties). Long-term application of $N_{30}P_{30}K_{30} + 2.8$ t/ha of manure ensured the greatest level of crop rotation soil fertility and productivity. This was achieved by twice-repeated application of $N_{135}P_{135}K_{135}$ for sugar beet and one application of 25 t/ha of manure in fallow during 9-field crop rotation.

Ключевые слова: удобрения, севооборот, плодородие, урожайность, сахарная свёкла (*Beta vulgaris* L.), зерновые, продуктивность пашни.

Key words: fertilizers, crop rotation, fertility, yield, sugar beet (*Beta vulgaris* L.), grain-crops, productivity of arable land.

Устойчивое развитие растениеводства невозможно без рационального использования природных (почвенно-климатические ресурсы, биопотенциал растений и др.) и антропогенных (системы обработки почвы, удобрений и средств защиты растений) факторов [1]. Агротехнические приемы влияют на свойства

почвы, особенно на эффективное плодородие, и продуктивность сельскохозяйственных культур.

Плодородие почвы – специфическое свойство, характеризующее накопленные ресурсы вещества, энергии и информации, которые используют растения в биогеоценозе [2]. Среди показателей плодородия почвы

первостепенную роль отводят содержанию органического вещества, поскольку оно тесно связано с условиями питания и влагообеспеченности растений [3, 4]. Многолетние исследования, проведенные во многих природно-климатических зонах страны, выявили, что органические и органоминеральные системы удобрения оказывают положительное воздействие на содержание и запасы гумуса, накопление и сохранение в его составе устойчивых к внешнему воздействию групп и фракций, в то время как минеральные системы удобрения способствуют увеличению содержания активных, мобильных соединений, обладающих высокой оборачиваемостью [5, 6]. Минеральные системы, как и отсутствие удобрений, могут снижать содержание гумуса в почве [6].

При использовании высоких доз физиологически кислых минеральных удобрений происходит подкисление почвы [3], но отмечается оптимизация фосфатного и калийного режимов [4, 7, 8]. При этом применение научно-обоснованных доз минеральных удобрений в сочетании с органическими не вызывает существенного изменения кислотности почвенного раствора, суммы поглощенных катионов, емкости катионного обмена, степени насыщенности почвы основаниями [9], одновременно происходит повышение содержания NPK.

В длительных агрохимических опытах проводится изучение эффективности нескольких систем удобрения с разной насыщенностью и соотношением NPK. Основной задачей таких исследований выступает выбор системы с наибольшей продуктивностью, которая одновременно способствует сохранению почвенного плодородия [10]. Так, на черноземах Предкавказья наибольшие прибавки урожая сахарной свеклы получены от полного удобрения в дозе $N_{80}P_{80}K_{80}$ [8], в ЦЧР – $N_{90...135}P_{90...135}K_{90...135}$; использование 20...50 т/га навоза 1...2 раза за ротацию зерносвекловичного севооборота способствует дополнительному росту урожайности культуры [11, 12].

Продуктивность 1 га пашни – интегральный показатель эффективности действия агроприемов, в том числе систем удобрения. Органоминеральные системы удобрения значительно увеличивают продуктивность пашни [13]. Рациональное и безопасное применение минеральных удобрений позволяет приостановить истощение почв, повысить их плодородие и на основании этого увеличить продуктивность культур до уровня полной самообеспеченности страны продовольствием, а также отказаться от импорта [14].

Цель исследований – определение влияния длительного применения удобрений на изменение основных показателей почвенного плодородия, урожайности культур и продуктивности 1 га пашни зерносвекловичного севооборота в ЦЧР.

Методика. Работу выполняли в стационарном полевом опыте по изучению эффективности удобрений (год закладки – 1936) (пос. Рамонь, Воронежская обл.). Для оценки изменений почвенного плодородия и урожайности культур использовали данные, полученные в 1-й (1936–1945 гг.) и в 10-й (2018–2022 гг.) ротациях 9-польного зернопаропропашного зерносвекловичного севооборота: черный пар – озимая пшеница – сахарная свекла – ячмень с подсевом клевера – клевер одного года использования – озимая пшеница – сахарная свекла – однолетние травы (горох + овес) – овес. Почвенные образцы отбирали в поле под сахарной свёклой в паровом звене.

Объекты исследований – почва стационарного опыта (чернозем выщелоченный малогумусный среднемощный тяжелосуглинистый), основная и побочная продукция сахарной свеклы, озимой пшеницы, овса и ячменя, зеленая масса клевера.

Варианты стационарного опыта сильно различались по насыщенности удобрениями 1 га пашни, схема опыта была следующей: без удобрений (контроль), $N_{10}P_{10}K_{10} + 2,8$ т/га навоза (система I), $N_{20}P_{20}K_{20} + 2,8$ т/га навоза (система II), $N_{30}P_{30}K_{30} + 2,8$ т/га навоза (система III), $N_{10}P_{10}K_{10} + 5,6$ т/га навоза (система IV).

В качестве минеральных удобрений в 10-й ротации использовали нитроаммофоску (16:16:16), в 1-й ротации – смесь простых удобрений (аммиачная селитра, простой суперфосфат, хлористый калий), которые вносили 2 раза за ротацию только под сахарную свеклу осенью перед основной обработкой почвы (отвальной вспашкой на 30...32 см), навоз – один раз за ротацию в паровое поле. Прямое действие навоза испытывала озимая пшеница в паровом звене, остальные культуры севооборота – его последствие.

Повторность опыта трехкратная, размещение вариантов – систематическое с частичной рандомизацией. Площадь опытной делянки составляла 133,7 м². В 10 ротации возделывали районированные гибриды сахарной свеклы отечественной селекции (РМС 120, РМС 121, РМС 127), сорта зерновых культур отечественной и белорусской селекции (озимой пшеницы – Безенчукская 380, Скипетр, ячменя – Атаман, Таловский 9, овса – Лев, Золотой дождь, клевера – Трубетчинский местный и Дымковский).

Показатели плодородия почвы определяли в образцах, отобранных в слое 0...20 см в третьей декаде мая под сахарной свеклой согласно ГОСТ Р58595–2019. Агрохимические анализы проводили в ГЦАС «Воронежский» и лаборатории сортов технологий возделывания сахарной свеклы ВНИИСС им. А. Л. Мазлумова. В свежих образцах определяли содержание нитратного азота по Грандваль-Ляжу, в сухих образцах – подвижного P_2O_5 и K_2O по Чирикову (ГОСТ 26213-91), емкость катионного обмена (ЕКО) – по Бобко-Аскинази в модификации ЦИНАО, pH_{KCl} – по ГОСТ 26490-85. Градации обеспеченности посевов (мг/кг) нитратным азотом в слое 0...20 см по Гамзикову Г. П. [15]: менее 10 – очень низкая, 10...15 – низкая, 15...20 – средняя, более 20 – высокая; подвижным P_2O_5 (по Чирикову): 51...100 – средняя, 101...150 – повышенная, 151...200 – высокая; K_2O (по Чирикову): 41...80 – средняя, 81...120 – повышенная, 121...180 – высокая [16].

Учет урожайности основной и побочной продукции культур осуществляли методом пробных площадок (зерновые и клевер – 16,2 м², сахарная свекла – 10,8 м²) с пересчетом на 1 га, продуктивность 1 га пашни – расчетным методом. Статистическую обработку данных проводили по Б. А. Доспехову (1985).

Результаты и обсуждение. Содержание гумуса в почве целинного участка, расположенного вблизи стационарного полевого опыта, составляло 6,10 %. Снижение величины этого показателя, относительно целины, в 1-й ротации составило 0,16...0,77 % (табл. 1), сильнее всего – в контроле и варианте с внесением $N_{10}P_{10}K_{10} + 2,8$ т/га навоза, что свидетельствует о значительной дегумификации. В вариантах с применением $N_{30}P_{30}K_{30} + 2,8$ т/га навоза и $N_{10}P_{10}K_{10} + 5,6$ т/га навоза она оставалась на уровне целины. При использовании удобрений содержание гумуса было выше, чем в контрольном варианте, на 0,48...0,67 %. Почва целинного участка относилась к среднегумусной, опытного – к малогумусной.

В 1-й ротации уровень $N-NO_3$, P_2O_5 и K_2O в почве был значительно ниже, чем в 10-й ротации. Так, содержание $N-NO_3$ в большинстве вариантов классифицировалось как среднее, при внесении $N_{30}P_{30}K_{30} + 2,8$ т/га навоза – высокое, в контроле – низкое; P_2O_5 и K_2O – повышенное (кроме контроля, где оно было средним); в вариантах

Табл. 1. Физико-химические свойства выщелоченного чернозема в слое 0...20 см при краткосрочном использовании удобрений (1-я ротация)

Вариант	N-NO ₃ , P ₂ O ₅ , K ₂ O			Нг	ЕКО	Гумус, %
	мг/100 г					
Без удобрений	1,50	8,88	11,3	2,8	41,7	5,33
N ₁₀ P ₁₀ K ₁₀ + 2,8 т/га навоза	1,60	11,8	12,0	3,8	40,3	5,81
N ₂₀ P ₂₀ K ₂₀ + 2,8 т/га навоза	1,91	11,1	14,8	3,4	39,2	5,94
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + 2,8 т/га навоза	2,16	12,8	13,9	3,3	39,4	6,00
N ₁₀ P ₁₀ K ₁₀ + 5,6 т/га навоза	1,75	12,0	11,7	2,4	43,2	6,00
НСР ₀₅	0,09	0,5	0,6	0,2	F _{факт.} < F _{теор.}	0,29

N₂₀P₂₀K₂₀ + 2,8 т/га навоза и N₃₀P₃₀K₃₀ + 2,8 т/га навоза – высокое. Краткосрочное использование удобрений (в течение 1-й ротации) способствовало повышению содержания N-NO₃, относительно контроля, на 0,10...0,66 мг/100 г (на 6,67...44,0 %), P₂O₅ – на 2,9...3,9 мг/100 г (на 25,0...44,1 %), K₂O – на 0,7...2,6 мг/100 г (на 6,2...31,0 %). Наиболее высокое содержание N-NO₃ и P₂O₅ отмечено в варианте N₃₀P₃₀K₃₀ + 2,8 т/га навоза, а K₂O – N₂₀P₂₀K₂₀ + 2,8 т/га навоза.

Краткосрочное применение удобрений повышало гидролитическую кислотность почвы, относительно контроля, на 0,5...1,0 ммоль(экв)/100 г, кроме варианта с применением N₁₀P₁₀K₁₀ + 5,6 т/га навоза, где отмечали снижение величины этого показателя на 0,4 ммоль(экв)/100 г.

В 10-й ротации содержание гумуса в слое почвы 0...20 см в удобренных вариантах составляло 5,11...5,54 % (табл. 2), что позволило отнести ее к малогумусным черноземам (до 6,0 %). Относительно контроля, гумусность возрастала на 0,16...0,52 %, наибольшее повышение отмечали в варианте с применением N₁₀P₁₀K₁₀ + 5,6 т/га навоза, наименьшее – N₁₀P₁₀K₁₀ + 2,8 т/га навоза. От 1-й к 10-й ротации снижение гумусности составило 0,41...0,73 %, максимальным в опыте оно было при внесении N₁₀P₁₀K₁₀ + 2,8 т/га навоза и N₂₀P₂₀K₂₀ + 2,8 т/га навоза – 0,70 и 0,73 % соответственно, наименьшим – в варианте N₁₀P₁₀K₁₀ + 5,6 т/га навоза и контроле (0,41 и 0,46 % соответственно). Минимальное в опыте снижение в контроле связано с максимальной дегумификацией еще в 1-й ротации. По данным ряда исследователей в первые годы сельскохозяйственного использования почвы она составляет 1/4...1/5 от исходного содержания [9, 17], именно в этот период с наибольшей скоростью идет минерализация гумуса. В варианте N₁₀P₁₀K₁₀ + 5,6 т/га навоза наименьшее снижение гумусности с 1-й по 10-ю ротацию объясняется дополнительным поступлением полуразложившегося органического вещества с повышенной (50 т/га в черном пару) дозой навоза.

Табл. 2. Физико-химические свойства выщелоченного чернозема в слое 0...20 см при длительном использовании удобрений (10-я ротация)

Вариант	N-NO ₃ , P ₂ O ₅ , K ₂ O			Нг	ЕКО	Гумус, %
	мг/100 г					
Без удобрений	1,12	6,07	16,1	3,46	26,8	4,92
N ₁₀ P ₁₀ K ₁₀ + 2,8 т/га навоза	0,86	8,95	19,5	4,00	28,2	5,11
N ₂₀ P ₂₀ K ₂₀ + 2,8 т/га навоза	1,26	12,1	19,8	4,24	28,3	5,21
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + 2,8 т/га навоза	1,13	13,8	19,2	4,36	28,3	5,43
N ₁₀ P ₁₀ K ₁₀ + 5,6 т/га навоза	1,14	10,4	20,4	4,40	30,4	5,54
НСР ₀₅	F _{факт.} < F _{теор.}	0,4	0,8	0,20	1,3	0,25

В 10-й ротации, относительно варианта без удобрений, отмечено повышение содержания подвижного P₂O₅ на 47,4...127,0 %, K₂O – на 21,1...26,7 %, гидролитической кислотности – на 15,6...27,2 %, ЕКО – на 5,2...13,4 %. Достоверного изменения содержания N-NO₃ не наблюдали, возможно, вследствие высокой подвижности этой формы азота. Наибольшее в опыте содержание P₂O₅ отмечено в варианте N₃₀P₃₀K₃₀ + 2,8 т/га навоза, N-NO₃ – N₁₀P₁₀K₁₀ + 2,8 т/га навоза, K₂O, ЕКО и содержание гумуса – N₁₀P₁₀K₁₀ + 5,6 т/га навоза.

В 10-й ротации почва опыта по содержанию N-NO₃ в большинстве вариантов, кроме N₁₀P₁₀K₁₀ + 2,8 т/га навоза, относилась к среднеобеспеченной, P₂O₅ – к повышено обеспеченной, K₂O – к очень высоко обеспеченной. В контроле обеспеченность P₂O₅ и K₂O была ниже (средняя и высокая соответственно).

Концентрация N-NO₃ сильнее всего снижалась, по отношению к первой ротации севооборота, на 25,3...47,7 % при внесении N₁₀P₁₀K₁₀ + 2,8 т/га навоза и N₃₀P₃₀K₃₀ + 2,8 т/га навоза, что, отчасти, связано с более значительной дегумификацией почвы в этих вариантах, наименьшее снижение отмечали в контроле и в варианте с N₁₀P₁₀K₁₀ + 5,6 т/га навоза.

В контроле содержание подвижного P₂O₅ от 1-й к 10-й ротации снижалось на 31,6 %, в варианте с N₁₀P₁₀K₁₀ + 2,8 т/га навоза – на 24,2 %, N₁₀P₁₀K₁₀ + 5,6 т/га навоза – на 13,3 % соответственно. При внесении N₂₀P₂₀K₂₀ + 2,8 т/га навоза и N₃₀P₃₀K₃₀ + 2,8 т/га навоза отмечали рост величины этого показателя за указанный период на 9,0 и 7,8 % соответственно.

Содержание подвижного K₂O от 1-й к 10-й ротации в почве большинства вариантов повышалось на 2,8...8,7 мг/100 г (на 18,9...74,4 %). Минимальное в опыте увеличение отмечено в варианте N₃₀P₃₀K₃₀ + 2,8 т/га навоза, что связано со значительным насыщением этим элементом почвы в 1-й ротации, максимальное – при использовании N₁₀P₁₀K₁₀ + 5,6 т/га навоза, что объясняется накопительным эффектом повышенных доз навоза, который характеризуется высоким содержанием K₂O.

Гидролитическая кислотность почвы с течением времени повысилась на 0,20...2,0 ммоль(экв)/100 г, или на 5,3...83,3 %. Максимальное в опыте увеличение отмечено при внесении N₁₀P₁₀K₁₀ + 5,6 т/га навоза, что связано с относительной стабильностью почвенного поглощающего комплекса (ППК) в этом варианте при краткосрочном применении удобрений, но значительном насыщении ионами кислот природы при длительном использовании. Минимальное изменение величины этого показателя зафиксировано в варианте N₁₀P₁₀K₁₀ + 2,8 т/га навоза, что объясняется быстрым насыщением ППК ионом Н⁺ в начале проведения опыта и относительной стабильностью в последующие годы [18, 19]. От 1-й к 10-й ротации выявлено уменьшение емкости катионного обмена на 10,9...14,9 ммоль(экв)/100 г (на 27,8...35,7 %). Максимальное в опыте снижение отмечено в контроле, минимальное – в варианте с N₂₀P₂₀K₂₀ + 2,8 т/га навоза. Возделывание сахарной свеклы снижало емкость катионного обмена, но использование систем удобрения с навозом несколько уменьшало темпы потери катионов.

В течение более чем 80 лет использования удобрений обеспеченность почвы подвижным P₂O₅ и N-NO₃ не переходила в более высокую градацию, одновременно обеспеченность K₂O изменялась с повышенной и высокой до очень высокой. Такая ситуация обусловлена тем, что еще при краткосрочном применении удобрений достигалась достаточно высокая обеспеченность P₂O₅ и N-NO₃, которая впоследствии поддерживалась

Табл. 3. Урожайность основной продукции культур севооборота и продуктивность 1 га пашни в зависимости от краткосрочного использования удобрений (1-я ротация)

Вариант	Урожайность, т/га					Продуктивность 1 га пашни, тыс. зерн. ед./га
	сахарная свекла	ячмень	озимая пшеница	овес	клевер (зеленая масса)	
Без удобрений	23,9	1,59	2,44	1,80	34,7	3,21
N ₁₀ P ₁₀ K ₁₀ + 2,8 т/га навоза	26,0	1,64	2,82	1,93	35,3	3,64
N ₂₀ P ₂₀ K ₂₀ + 2,8 т/га навоза	26,6	1,86	2,84	2,01	36,0	3,75
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + 2,8 т/га навоза	26,8	1,84	2,88	2,07	32,7	3,82
N ₁₀ P ₁₀ K ₁₀ + 5,6 т/га навоза	24,9	1,71	2,86	1,65	36,7	3,75
HCP ₀₅	1,2	0,08	0,13	0,09	F факт. < F теор	0,18

в течение длительного периода, а для накопления K₂O потребовалось более значительное время.

В 1-й ротации севооборота урожайность корнеплодов сахарной свеклы в удобренных вариантах незначительно отличалась от величины этого показателя в контроле, прибавки составили 1,0...2,9 т/га, или 4,2...12,1% (табл. 3). Наибольшая в опыте продуктивности культуры отмечена в варианте N₃₀P₃₀K₃₀ + 2,8 т/га навоза, наименьшая – в контрольном варианте. Последствие удобрений проявилось в повышении урожайности зерна ячменя, относительно контроля, на 0,05...0,27 т/га (на 4,5...15,7%), озимой пшеницы – на 0,38...0,44 т/га (на 15,6...18,0%), овса – на 0,13...0,27 т/га (в варианте с N₁₀P₁₀K₁₀ + 5,6 т/га навоза изменений не наблюдали). На клевере его не наблюдали, кроме небольшого увеличения на уровне тенденции на 0,6...2,0 т/га в вариантах с N₁₀P₁₀K₁₀ + 5,6 т/га навоза и N₂₀P₂₀K₂₀ + 2,8 т/га навоза.

Влияние удобренности в 10-й ротации проявилось в повышении урожайности зерна озимой пшеницы (табл. 4), в сравнении с вариантом без удобрений, на 0,17...0,44 т/га (5,9...15,2%), ячменя – на 0,25...1,25 т/га (12,0...60,1%), овса – на 0,23...0,74 т/га (на 11,0...35,2%), зеленой массы клевера – на 2,8...6,0 т/га (11,2...23,9%), корнеплодов сахарной свеклы – на 6,8...11,0 т/га (на 20,9...33,7%). Применение N₃₀P₃₀K₃₀ + 2,8 т/га навоза обеспечивало наибольшую урожайность большинства культур.

Продуктивность 1 га пашни в удобренных вариантах была выше, чем в контроле на 0,68...1,49 тыс. зерн. ед./га (+16,3...35,7%), а наибольшая – в варианте N₃₀P₃₀K₃₀ + 2,8 т/га навоза.

С 1-й по 10-ю ротации урожайность всех культур в севообороте (кроме зеленой массы клевера) в контрольном

Табл. 4. Урожайность основной продукции культур севооборота и продуктивность 1 га пашни в зависимости от длительного использования удобрений (10-я ротация)

Вариант	Урожайность, т/га					Продуктивность 1 га пашни, тыс. зерн. ед./га
	сахарная свекла	ячмень	озимая пшеница	овес	клевер (зеленая масса)	
Без удобрений	32,6	2,08	2,89	2,10	25,1	4,17
N ₁₀ P ₁₀ K ₁₀ + 2,8 т/га навоза	39,4	2,33	3,37	2,33	27,9	4,85
N ₂₀ P ₂₀ K ₂₀ + 2,8 т/га навоза	43,9	3,06	3,81	2,70	30,1	5,44
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + 2,8 т/га навоза	43,6	3,33	4,29	2,84	31,1	5,66
N ₁₀ P ₁₀ K ₁₀ + 5,6 т/га навоза	43,1	2,75	3,77	2,77	29,6	5,43
HCP ₀₅	2,0	0,15	0,17	0,12	1,5	0,24

варианте (в связи с переходом на возделывание более продуктивных современных сортов) и при использовании удобрений (благодаря повышению почвенного плодородия) возмужала. Без учета повышения урожайности в контроле в 10-й ротации в вариантах с удобрениями было собрано на 4,9...9,5 т/га (на 15,0...36,7%) больше корнеплодов сахарной свеклы, чем в 1-й ротации, зерна ячменя – на 0,20...1,00 т/га (на 11,3...50,1%), озимой пшеницы – на 0,46...0,96 т/га (на 13,4...30,6%), овса – на 0,39...0,82 т/га (на 4,0...51,2%). Самую высокую продуктивность отмечали в вариантах с N₃₀P₃₀K₃₀ + 2,8 т/га навоза (ячмень и озимая пшеница) и N₁₀P₁₀K₁₀ + 5,6 т/га навоза (сахарная свекла и овес). При этом урожайность клевера снижалась как в контроле (на 7,5 т/га), так и в вариантах с удобрениями (на 11,5...13,8 т/га), что, возможно, связано с повышением количества плесневых грибов – Penicillium, Aspergillus и фитопатогена Fusarium в почве [20]; удобрения уменьшали интенсивность этого процесса.

С 1-й по 10-ю ротации продуктивность 1 га пашни (без учета повышения в контроле на 0,96 тыс. зерн. ед./га вследствие возделывания высокопродуктивных сортов) возросла на 0,25...0,73 тыс. зерн. ед./га (на 3,3...18,3%), наибольшее ее увеличение отмечали в вариантах N₂₀P₂₀K₂₀ + 2,8 т/га навоза и N₁₀P₁₀K₁₀ + 5,6 т/га навоза.

При краткосрочном применении удобрений сбор побочной продукции сахарной свеклы увеличивался (табл. 5), относительно контроля, на 4,2...6,7 т/га (на 21,0...33,1%), озимой пшеницы – на 0,82...1,15 т/га (на 19,5...27,4%), овса – на 0,41...0,66 т/га (15,5...25,0%), ячменя – на 0,57...1,03 т/га (21,2...38,3%). Наибольшее повышение величины этого показателя у сахарной свеклы и озимой пшеницы отмечали в варианте N₁₀P₁₀K₁₀ + 5,6 т/га навоза, овса и ячменя – N₃₀P₃₀K₃₀ + 2,8 т/га навоза.

Табл. 5. Урожайность побочной продукции (листья и солома) культур севооборота при краткосрочном использовании удобрений (1 ротация), т/га

Вариант	Сахарная свекла	Озимая пшеница	Ячмень	Овес
Без удобрений	20,0	4,20	2,69	2,64
N ₁₀ P ₁₀ K ₁₀ + 2,8 т/га навоза	24,2	5,02	3,26	3,05
N ₂₀ P ₂₀ K ₂₀ + 2,8 т/га навоза	25,3	5,20	3,45	3,24
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + 2,8 т/га навоза	25,6	5,09	3,72	3,30
N ₁₀ P ₁₀ K ₁₀ + 5,6 т/га навоза	26,7	5,35	3,65	3,12
HCP ₀₅	1,1	0,22	0,16	0,14

Длительное применение удобрений способствовало повышению урожайности побочной продукции (табл. 6) сахарной свеклы на 4,8...6,3 т/га (на 46,2...60,6%), соломы озимой пшеницы – на 0,19...1,66 т/га (8,9...65,7%), ячменя – на 0,38...1,40 т/га (на 17,7...65,1%), овса – на 0,15...0,85 т/га (на 9,7...55,2%). Наибольший ее сбор с 1 га отмечали в варианте N₃₀P₃₀K₃₀ + 2,8 т/га навоза, а соломы ячменя еще и с N₂₀P₂₀K₂₀ + 2,8 т/га навоза, наименьший – при внесении N₁₀P₁₀K₁₀ + 2,8 т/га навоза.

Сбор листьев и соломы при краткосрочном и длительном использовании удобрений значительно снижался, по сравнению с 1-й ротацией, что, в основном, связано с переходом на возделывание современных сортов и гибридов с большей долей основной продукции в урожае. Установлено, что в 10-й ротации, в сравнении с первой, сбор листьев сахарной свеклы с 1 га уменьшился на 8,9...10,8 т/га, соломы озимой пшеницы – на 1,56...2,99 т/га, ячменя – на 0,22...0,97 т/га, соломы овса – на 0,91...1,55 т/га. При этом в контроле снижение было чаще всего более значительным, чем в вариантах с применением удобрений, то есть их действие со време-

Табл. 6. Урожайность побочной продукции (листья и солома) культур в севообороте при длительном использовании удобрений (10-я ротация), т/га

Вариант	Сахарная свекла	Озимая пшеница	Ячмень	Овес
Без удобрений	10,4	2,13	2,15	1,54
$N_{10}P_{10}K_{10} + 2,8$ т/га навоза	15,2	2,03	2,53	1,89
$N_{20}P_{20}K_{20} + 2,8$ т/га навоза	16,2	2,32	3,55	1,69
$N_{30}P_{30}K_{30} + 2,8$ т/га навоза	16,7	3,53	3,50	2,39
$N_{10}P_{10}K_{10} + 5,6$ т/га навоза	15,9	2,51	2,68	2,01
HCP_{05}	0,8	0,14	0,13	0,10

нем проявлялось в повышении доли основной продукции (корнеплодов, зерна), относительно побочной (листьев, соломы). Наибольшее снижение выхода побочной продукции отмечено на ячмене (на 14,2...23,0 %), несколько меньше – на сахарной свекле и овсе (на 7,6...13,2 % и 6,1...14,1 % соответственно). На озимой пшенице в большинстве вариантов происходило сокращение величины этого показателя, по отношению к контролю, на 3,8...10,3 %, кроме варианта $N_{30}P_{30}K_{30} + 2,8$ т/га навоза, в котором установлено ее повышение на 18,7 %.

Выводы. Применение удобрений в течение более чем 80 лет привело к значительному изменению показателей эффективного плодородия, которое сильнее всего выразилось в повышении гидролитической кислотности, содержания подвижного K_2O , несколько меньше – ЕКО, одновременно отмечено снижение гумусности. Содержание подвижного P_2O_5 имело разнонаправленную динамику, несколько увеличиваясь в вариантах $N_{20}P_{20}K_{20} + 2,8$ т/га навоза и $N_{30}P_{30}K_{30} + 2,8$ т/га навоза и снижаясь при внесении $N_{10}P_{10}K_{10} + 2,8$ т/га навоза и $N_{10}P_{10}K_{10} + 5,6$ т/га навоза и в контроле.

Краткосрочное использование $N_{30}P_{30}K_{30} + 2,8$ т/га навоза обеспечивало высокое содержание подвижных форм NPK в почве, внесение $N_{10}P_{10}K_{10} + 5,6$ т/га навоза – повышенное содержание гумуса, обе системы способствовали созданию лучших в опыте кислотностно-основных свойств. К 10-й ротации в этих же вариантах отмечали наилучшие показатели почвенного плодородия: $N_{30}P_{30}K_{30} + 2,8$ т/га навоза – обеспеченность P_2O_5 , а $N_{10}P_{10}K_{10} + 5,6$ т/га навоза – высокое содержание K_2O , гумуса и ЕКО.

Применение удобрений в течении длительного срока в наибольшей степени способствовало повышению урожайности основной продукции ячменя и овса, в несколько меньшей – сахарной свеклы и озимой пшеницы. Одновременно наблюдали небольшое повышение доли побочной продукции (соломы, листьев), сильнее всего у ячменя, менее всего – у сахарной свеклы.

Результатом длительного внесения удобрений и сопряженного с ним роста почвенного плодородия стало увеличение продуктивности 1 га пашни 9-польного зерносвекловичного севооборота на 0,25...0,73 тыс. зерн. ед./га.

Длительное применение системы удобрения с насыщенностью 1 га пашни $N_{30}P_{30}K_{30} + 2,8$ т/га навоза, обеспечиваемое двукратным внесением за ротацию по $N_{135}P_{135}K_{135}$ под сахарную свеклу в сочетании с однократным – 25 т/га навоза в пару, способствует формированию близких к оптимальным показателей плодородия выщелоченного чернозема, высокой урожайности культур и продуктивности 1 га пашни зерносвекловичного севооборота. Такая схема может быть рекомендована к широкому использованию в ЦЧР.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А. Л. Мазлумова».

Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство этим 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. Концепция развития агрохимии и агрохимического обслуживания сельского хозяйства Российской Федерации на период до 2010 г. / Г. А. Романенко, А. Л. Иванов, В. А. Ключакич и др. М.: ВНИИА, 2005. 80 с.
2. Плодородие почв, основные понятия / А. С. Фрид, И. Е. Королева, Д. С. Булгаков и др. // Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии. М.: Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, 2013. Т. 2. С. 5–8.
3. Волынкин В. И., Волынкина О. В., Копылов А. Н. Изменение почвенного плодородия при длительном применении удобрений в Курганской области // Агрохимия. 2019. № 8. С. 3–13.
4. Последствие длительного использования систем удобрения на показатели плодородия почвы / Т. Ю. Бортник, К. С. Клековкин, А. Ю. Карпова и др. // Плодородие. 2022. № 3 (126). С. 42–45.
5. Влияние длительного применения удобрений на состав, свойства и структурные характеристики гумусовых кислот основных типов почв. Сообщение 1 / Л. К. Шевцова, В. А. Черников, В. Г. Сычев, и др. // Агрохимия. 2019. № 10. С. 3–15.
6. Влияние систем удобрения на содержание почвенного органического углерода и урожайность сельскохозяйственных культур: результаты длительных полевых опытов Географической сети России / В. Г. Сычев, А. Н. Налиухин, Л. К. Шевцова и др. // Почвоведение. 2020. № 12. С. 1521–1536.
7. Гютюнов С. И., Карабутов А. П., Соловichenko В. Д. Динамика подвижного калия в черноземе типичном в связи с различным уровнем интенсивности использования пашни // Земледелие. 2017. № 8. С. 7–10.
8. Влияние длительного применения минеральных удобрений на плодородие чернозема выщелоченного Западного Предкавказья / А. Х. Шейджен, Л. М. Онищенко, Т. Н. Бондарева и др. // Агрохимия. 2017. № 5. С. 3–11.
9. Дмитриев Н. Н., Гамзиков Г. П. Систематическое применение удобрений как фактор стабилизации плодородия серых лесных почв и продуктивности зерновых культур в зернопаровом севообороте // Агрохимия. 2015. № 2. С. 3–12.
10. Сычев В. Г., Беличенко М. В., Романенков В. А. Этапы развития, результаты исследований и актуальные проблемы длительных агрохимических полевых опытов Географической сети опытов с удобрениями // Агрохимия. 2018. № 1. С. 3–16.
11. Гютюнов С. И., Цыгуткин А. С., Логвинов И. В. Урожай сахарной свёклы в зависимости от севооборота, способа основной обработки почвы, доз минеральных и органических удобрений // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 1. С. 3–7.
12. Минакова О. А., Косякин П. А., Александрова Л. В. Удобрение сахарной свеклы в Центрально-Черноземном районе РФ // Агрохимия. 2022. № 1. С. 10–20.

13. Воронин А. Н., Соловиченко В. Д. Влияние различных систем земледелия на продуктивность черноземов юго-западной части Центрально-Черноземной зоны // *Плодородие*. 2019. № 5 (110). С. 31–33.
14. Кудеяров В. Н. Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // *Почвоведение*. 2019. № 1. С. 109–121.
15. Гамзиков Г. П. Почвенная диагностика азотного питания растений и применения азотных удобрений в севооборотах // *Плодородие*. 2018. № 1 (100). С. 8–14.
16. Пискунов А. С. *Методы агрохимических исследований*. М., КолосС, 2004. 312 с.
17. Королев В. А., Громовик А. И. Влияние продолжительности сельскохозяйственного использования на содержание и запасы гумуса в почвах Каменной Степи // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2017. № 1. С. 71–74.
18. Котченко С. Г., Ерёмкина Д. В. Агрогенные изменения химических свойств темно-серых лесных почв северного Зауралья // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2020. № 10 (192). С. 42–50.
19. Минакова О. А., Александрова Л. В., Подвигина Т. Н. Изменение физико-химических свойств чернозема выщелоченного и урожайности сахарной свеклы при длительном применении удобрений в ЦЧР // *Агрохимия*. 2021. № 2. С. 37–46.
20. Мухамадиев Р. Х., Ибатуллина Р. П. Решение проблемы почвоутомления на примере ООО «Агрокомплекс «АК БАРС» // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2017. № 4 (46). С. 26–31.

Поступила в редакцию 24.09.2023

После доработки 28.11.2023

Принята к публикации 26.12.2023

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГУМИНОВЫХ УДОБРЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ В ПОЧВЕННО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ

В. И. Лазарев, доктор сельскохозяйственных наук,
Ж. Н. Минченко, научный сотрудник

Курский федеральный аграрный научный центр,
305021, Курск, ул. К. Маркса, 70б
E-mail: vla190353@yandex.ru

Исследования проводили с целью изучения влияния гуминовых удобрений отечественного (ЭКО-СП) и зарубежного (Фульвигрейн Классик, Гумифул Про) производства на урожайность и качество зерна ярового ячменя сорта Прометей. Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов: без гуминовых удобрений (контроль); ЭКО-СП – обработка семян (0,5 л/т) + обработка растений в фазе кущения и выхода в трубку (по 0,5 л/га); Фульвигрейн Классик – обработка семян (0,8 л/т) + двукратная обработка растений в ранее указанные фазы (по 0,4 л/га); Гумифул Про – обработка семян (0,1 л/т) + двукратная обработка растений как в предыдущем варианте (по 0,1 л/га). Работу выполняли в 2020–2022 гг. в Курской области. Почва опытного участка – чернозем типичный мощный, тяжелосуглинистый. Обработка семян ярового ячменя гуминовыми удобрениями повышала энергию их прорастания на 2...7%, лабораторную всхожесть – на 3...5% в сравнении с контролем. При использовании гуминовых удобрений урожайность культуры увеличивалась на 0,46...0,56 т/га, или на 12,7...15,5%, крупность зерна – на 0,7...1,6%, содержание белка – на 0,6...0,8%, крахмала – на 0,3...2,3%. Более высокие прибавки урожая ярового ячменя обеспечивали гуминовые удобрения ЭКО-СП и Фульвигрейн Классик – 0,52...0,56 т/га. Эффективность гуминового удобрения Гумифул Про была ниже, прибавка урожая от его использования составила 0,46 т/га, или 12,7%, крупность зерна повышалась на 0,7%, содержание белка – на 0,6%, крахмала – на 0,3%, в сравнении с контролем.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF HUMIC FERTILIZERS IN THE CULTIVATION OF SPRING BARLEY IN THE SOIL AND CLIMATIC CONDITIONS OF THE CENTRAL CHERNOZEM REGION

V. I. Lazarev, Zh. N. Minchenko

Federal Agricultural Kursk Research Center,
305021, Kursk, ul. K. Marksa, 70b, Russia
E-mail: vla190353@yandex.ru

The results of studies of the effect of humic fertilizers of domestic (ECO-SP) and foreign (Fulvigrain Classic, Gumiful Pro) production on the yield and quality of spring barley grain of the Prometheus variety, when cultivated according to the following scheme: without treatment with humic fertilizers (control); ECO-SP – seed treatment (0.5 l/t) + treatment of plants in the tillering phase (0.5 l/ha) + treatment of plants in the tube exit phase (0.5 l/ha); Fulvigrain Classic – seed treatment (0.8 l/t) + treatment of plants in the tillering phase (0.4 l/ha) + treatment of plants in the tube exit phase (0.4 l/ha); Humiful Pro – seed treatment (0.1 l/t) + processing of plants in the tillering phase (0.1 l/ha) + processing of plants in the tube exit phase (0.1 l/ha). The work was carried out in 2020–2022, in the experiments of the Kursk Federal Agrarian Scientific Center (Kursk region, Kursk district, Cheryomushki village), the soil of the experimental site is a typical powerful, heavy-loamy chernozem. It was found that the treatment of spring barley seeds with humic fertilizers increased their germination energy by 2...7%, laboratory germination by 3...5% in comparison with the variant where the seeds were not treated with humic fertilizers. When processing seeds and plants with humic fertilizers, the yield of spring barley increased by 0.46...0.56 t/ha or by 12.7...15.5%, grain size – by 0.7... 1.6%, protein content – by 0.2... 0.4%, starch – by 0.4...0.9%. Higher yields of spring barley were provided by humic fertilizers ECO-SP and Fulvigrain Classic – 0.52...0.56 t/ha. The effectiveness of humic fertilizer Humiful Pro was lower, the yield increase from its use was 0.46 t/ha or 12.7%, grain size increased by 0.7%, protein content – by 0.6%, starch – by 0.3% compared to the control.

Ключевые слова: яровой ячмень (*Hordeum vulgare L. annua*), гуматы, Фульвигрейн Классик, Гумифул Про, ЭКО-СП, энергия прорастания семян, полевая всхожесть, ринхоспориоз, гельминтоспориоз, урожайность, структура урожая, качество зерна.

Key words: spring barley (*Hordeum vulgare L. annua*), humates, Fulvigrain Classic, Humiful Pro, ECO-SP, seed germination energy, field germination, rhinchosporiosis, helminthosporiosis, yield, crop structure, grain quality.

Одна из основных особенностей современного сельскохозяйственного производства – переход на экологически безопасные и экономически обоснованные технологии возделывания сельскохозяйственных культур, позволяющие повысить урожайность и качество продукции, исключая при этом загрязнение окружающей среды. Такой подход требует значительных изменений в применяемых технологиях

в сторону их биологизации и ресурсосбережения, что способствует разработке новых направлений использования биологических средств защиты растений, регуляторов роста, био- и микроэлементных удобрений [1, 2].

В современных агротехнологиях возделывания сельскохозяйственных культур в качестве биоудобрений и стимуляторов роста растений стали ши-

роко применять гуматы. Это группа естественных высокомолекулярных веществ, которые благодаря особенностям строения и физико-химических свойств характеризуются высокой физиологической активностью. Они не токсичны, не канцерогенны, не мутагенны и не обладают эмбриологической активностью. Гуматы активизируют метаболизм и размножение полезной почвенной микрофлоры, повышают устойчивость растений к действию неблагоприятных физических (жара, холод), химических (засоление, тяжелые металлы, радионуклиды) и биологических (грибные, бактериальные и вирусные болезни) факторов, способствуют формированию высокого урожая сельскохозяйственных культур [3, 4]. Гуматы стимулируют развитие корневой системы, регулируют корневое и некорневое питание, улучшают проникновение питательных веществ из почвенного раствора в растение [5, 6].

Внесение гуминовых удобрений в почву увеличивает ее микробиологическую активность, повышает как общую численность микроорганизмов, так и численность их отдельных групп: азотфиксаторов, аммонификаторов, нитрификаторов, целлюлозоразлагающих и маслянокислых бактерий, почвенных микромицетов [7, 8].

Под влиянием гуминовых препаратов изменяется содержание калия, кальция, магния, железа в клетках растений, в результате чего может происходить активизация многих ферментных систем, а также повышение мембранной проницаемости [9, 10]. По мнению Ю. В. Хомякова, гуминовые вещества сорбируются на внешней стороне цитоплазматических мембран и способствуют поступлению в клетку элементов минерального питания и низкомолекулярных органических соединений [11].

Гуминовые удобрения стимулируют рост и развитие растений, увеличивают урожайность и улучшают качество выращиваемой продукции, способствуют повышению устойчивости растений к различным фитопатогенам, увеличению эффективности и окупаемости минеральных удобрений [12, 13].

Эффективность, свойства и качество гуминовых удобрений определяются в первую очередь источником сырья, а также технологическими особенностями их производства [14]. В нашей стране гуминовые удобрения вырабатывают преимущественно из торфа и сапропеля (С:N=35:2), за рубежом – в основном из бурого угля и сланцев (лигнитов, леонардитов, гумалитов) [15].

По состоянию на 2023 г. в Российской Федерации разрешены к применению более 80 видов гуминовых удобрений отечественного и зарубежного производства [16]. Их широко используют при выращивании сельскохозяйственных культур. Например, при возделывании зерновых сельхозтоваропроизводители Курской области применяют такие гуминовые удобрения, как Гумат «Плодородие» (Россия), Лигногумат (Россия), Гумат Калия Суфлер (Россия), Гумистим (Россия), Гумифул Про (Испания), Фульвигрейн Классик (Германия) и др. Вместе с тем, результаты сравнительной оценки эффективности использования различных видов гуминовых удобрений в конкретных почвенно-климатических условиях практически отсутствуют.

Цель исследования – определение эффективности различных видов гуминовых удобрений при возделывании ярового ячменя, их влияния на рост и развитие растений, структуру урожая, урожайность и качество

зерна в условиях черноземных почв Курской области.

Методика. Работу проводили на базе ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр» (Курская область, Курский район, п. Черёмушки) в 2020–2022 гг., в севообороте со следующим чередованием культур: чистый пар, озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.), соя (*Glycine max*), яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L. *annua*). Изучали эффективность гуминовых удобрений ЭКО-СП (Россия), Фульвигрейн Классик (Германия) и Гумифул Про (Испания). В опыте изучали четыре варианта: без обработок гуминовыми удобрениями (контроль); применение каждого из исследуемых удобрений путем обработки семян и растений в фазах кущения и выхода в трубку. ЭКО-СП при обработке семян использовали в дозе 0,5 л/т, растений – 0,5 л/га; Фульвигрейн Классик – соответственно 0,8 л/т и 0,4 л/га; Гумифул Про – 0,1 л/т и 0,1 л/га. Повторность в опыте 3-кратная, варианты располагались систематически в один ярус. Площадь посевной делянки 189 м², учетной – 100 м².

ЭКО-СП (ООО «ЭКОР-СП», г. Москва, Россия) – удобрение на основе гуминовых кислот, природный стимулятор роста растений, полученный из низинного торфа. Удобрение содержит комплекс таких биологически активных веществ, как соли гуминовых и фульвокислот, аминокислоты, полезную микрофлору, макро- и микроэлементы в доступной форме; выступает индуктором иммунитета растений, обладает адаптогенными свойствами (<https://eko-sp.ru/>).

Фульвигрейн Классик (Компания «Humintech GmbH», Германия) – удобрение на основе гуминовых кислот, полученных из леонардита – окисленного в природных условиях лигнита, образовавшегося в результате длительного выветривания. В его состав входят соли гуминовых и фульвокислот, микроэлементы, аминокислоты, ауксины; стимулирует развитие генеративных органов и корневой системы, способствует накоплению пластических веществ в растении, усилению их сопротивляемости к стрессам различного происхождения (<https://crop.ati-don.ru/fulvigrain-classic?ysclid=lphe7ixhj116212>).

Гумифул Про («Эсфера Эко Юроп», Испания) – удобрение на основе гуминовых кислот, производимое путем обработки бурого угля раствором гидроксида калия, обогащенное макро- и микроэлементами. Его применение способствует росту полезной микрофлоры и накоплению гумуса в почве, стимулирует рост и развитие растений, устойчивость к болезням и стрессам (<https://glavagronom.ru/fertilizers/organicheskie-gumiful-pro?ysclid=lpzhwhz32f338005005>).

Исследования проводили на чернозёме типичном, мощном, тяжелосуглинистом гранулометрического состава. При закладке полевого опыта содержание гумуса (по Тюрину) в пахотном слое составляло 5,3%, щелочногидролизуемого азота – 69,0 мг/кг, подвижных форм фосфора и калия (по Чирикову) – 88 мг/кг и 145 мг/кг почвы соответственно, реакция почвенной среды слабокислая – pH 5,4.

В период проведения полевых опытов (2020–2022 гг.) метеорологические условия складывались удовлетворительно для роста и развития ярового ячменя, характеризовались теплой и влажной погодой и были типичными для Курской области. Среднесуточная температура вегетационного периода (апрель–июль) в 2020 г. составила 14,9 °С, в 2021 г. – 15,7 °С, в 2022 г. – 14,8 °С, то есть была соответственно на 0,7,

1,5 и 0,6 °С выше среднегодовой (14,2 °С). Сумма осадков за апрель–июль 2020 г. составила 213,6 мм, или 99,3 % от нормы, в 2021 г. – 250,2 мм, или 116,4 %, в 2022 г. – 254,6 мм, или 118,4 % от среднегодового их количества (215,0 мм).

Агротехника выращивания ярового ячменя в полевых опытах соответствовала общепринятой в производственных условиях. Для посева использовали элитные семена сорта Прометей, отвечающие требованиям ГОСТ, с нормой высева 4 млн всхожих семян на 1 га, рядовым способом на глубину 4...5 см. Под основную обработку почвы общим фоном вносили минеральные удобрения в дозе N₃₀P₃₀K₃₀. Обработку семян и растений ярового ячменя гуминовыми удобрениями осуществляли ранцевым опрыскивателем с нормой расхода рабочего раствора из расчета 15 л/т семян и 200 л/га. Учет урожая проводили методом прямого комбайнирования Сампо-1200. Урожай пересчитывали на 100 %-ную чистоту и 14 %-ную влажность зерна. Энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян определяли по ГОСТ-12038-84 (2011), структуру урожая ярового ячменя – по методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. В образцах зерна ярового ячменя определяли содержание белка и крахмала на анализаторе зерна «Infratec™1241»; крупность зерна – по ГОСТ-10846-76, натуру зерна – по ГОСТ-10840-76. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили методом дисперсионного анализа с использованием программ Microsoft Excel, Statistica.

Результаты и обсуждение. Обработка семян ярового ячменя гуминовыми удобрениями повышала количество взшедших семян на 3-й день проращивания (энергия прорастания) на 2...7 %, на 7-й день (лабораторная всхожесть) – на 3...5 %, в сравнении с контролем (рис. 1). Наиболее высокая энергия прорастания (98 %) и лабораторная всхожесть семян (99 %) отмечены в варианте с использованием гуминового удобрения Гумифул Про в дозе 0,1 кг/т. Самым низким стимулирующим эффектом обладал препарат Фульвигрейн Классик (0,8 л/т), обработка семян ярового ячменя которым повышала энергию прорастания на 2 %, лабораторную всхожесть – на 3 %.

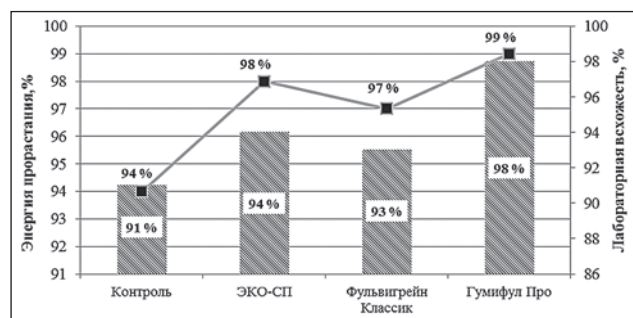


Рис. 1. Влияние обработки семян гуминовыми препаратами на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян ярового ячменя (НСР₀₅ для энергии прорастания – 1,5 %, для лабораторной всхожести – 1,1 %): ■ – энергия прорастания, %; ■ – лабораторная всхожесть, %.

Результаты исследований, полученные в полевых опытах, свидетельствуют о существенном влиянии гуминовых удобрений на сроки наступления фенологических фаз развития растений, распространенность листовых заболеваний, продуктивность и качество зерна ярового ячменя.

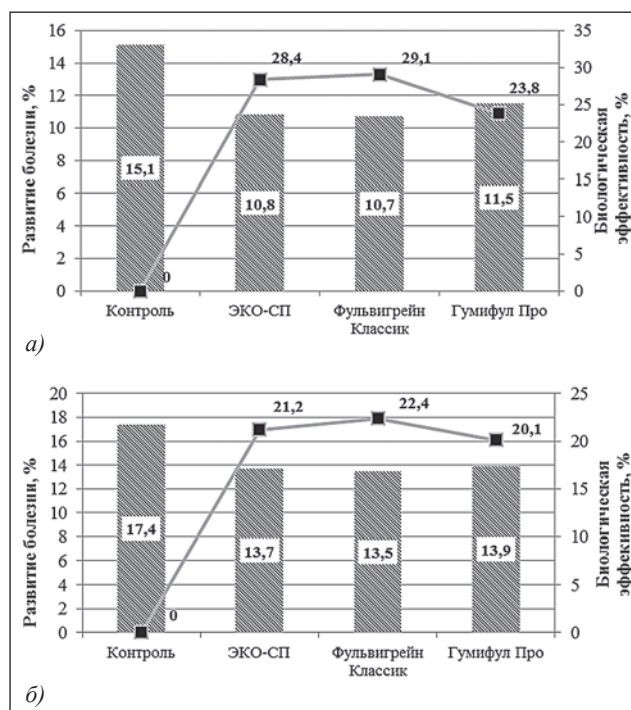


Рис. 2. Влияние гуминовых удобрений на развитие ринхоспориоза (а) и гельминтоспориоза (б) в посевах ярового ячменя (среднее за 2020–2022 гг., НСР₀₅ для ринхоспориоза – 1,4 %, для гельминтоспориоза – 1,8 %): ■ – развитие болезни, %; ■ – биологическая эффективность, %.

Яровой ячмень в опыте в годы исследований высевали в оптимальные для условий Курской области сроки – во второй декаде апреля. В контроле всходы появились на 10...11-й день после посева, в вариантах с обработкой семян гуминовыми удобрениями – на 1...2 дня раньше. В дальнейшем обработка семян и двукратное опрыскивание посевов в фазы кущения и выхода в трубку оказывали стимулирующее влияние на рост и развитие растений: ускоряли наступление фаз кущения, выход в трубку и колошение на 2 дня, однако способствовали увеличению продолжительности периода активной вегетации ярового ячменя, замедляя наступление фазы полной спелости зерна на 2 дня, в сравнении с контрольным вариантом.

Уровень распространения листовых заболеваний в годы проведения экспериментов был средним (умеренным). Отмечали поражение растений ринхоспориозом (*Rhynchosporium secalis*) и гельминтоспориозом (*Pyrenophorateres Drechsler*). Определенное его степени в фазе начала колошения показало, что использование гуминовых удобрений способствовало сдерживанию развития ринхоспориоза на 3,6...4,4 %, гельминтоспориоза – на 3,5...3,9 %, при величине этого показателя в контроле соответственно 15,1 и 17,4 %. Биологическая эффективность применения гуминовых удобрений при возделывании ярового ячменя была достаточно высокой: по гельминтоспориозу – 20,1...22,4 %, по ринхоспориозу – 23,8...29,1 %. Наибольшее сдерживание развития листовых заболеваний обеспечивали препараты Фульвигрейн Классик и ЭКО-СП, несколько меньше – Гумифул Про (рис. 2). Такая ситуация могла быть обусловлена тем, что обработка семян и растений ярового ячменя гуминовыми препаратами ускоряла рост и развитие,

обеспечивала формирование более мощных и, как следствие, устойчивых растений.

Более высокие величины показателей структуры урожая ярового ячменя в среднем за годы исследований были отмечены в вариантах с применением гуминовых удобрений ЭКО-СП и Фульвигрейн Классик (табл. 1). Обработка семян и двукратное опрыскивание посевов этими удобрениями способствовали увеличению количества продуктивных стеблей на 9...10 шт./м², числа зерен в колосе – на 2,3...2,4 шт., массы 1000 зерен – на 1,3...1,4 г, натуры зерна – на 4,4...4,7 г/л. Влияние гуминового удобрения Гумифул Про на элементные структуры урожая было менее значимым, количество продуктивных стеблей в этом варианте повышалось на 5 шт./м², число зерен в колосе – на 2,2 шт., масса 1000 зерен – на 0,9 г, натура зерна – на 1,2 г/л.

Табл. 1. Влияние различных видов гуминовых удобрений на структуру урожая ячменя ярового (2020–2022 гг.)

Вариант	Число продуктивных стеблей, шт.	Число зерен в колосе, шт.	Масса 1000 зерен, г
Контроль (без обработок)	438	25,0	33,3
ЭКО-СП	448	27,3	34,6
Фульвигрейн Классик	447	27,4	34,7
Гумифул Про	443	27,2	34,2
НСР ₀₅	2	1,1	0,6

Более благоприятное фитосанитарное состояние посевов и оптимальная структура урожая в вариантах с использованием гуминовых удобрений обеспечивали формирование более высокой урожайности зерна ярового ячменя, прибавка составила 0,46...0,56 т/га, или 12,7...15,5 % (табл. 2).

Табл. 2. Урожайность и качество зерна ярового ячменя в зависимости от вида гуминовых удобрений (2020–2022 гг.)

Вариант	Урожайность, т/га	Крупность зерна, %	Натура зерна, г/л	Содержание, %	
				белок	крахмал
Контроль (без обработок)	3,61	95,1	600,3	12,0	43,1
ЭКО-СП	4,13	96,7	605,0	12,8	45,4
Фульвигрейн Классик	4,17	96,2	604,7	12,7	45,1
Гумифул Про	4,07	95,8	601,5	12,6	43,4
НСР ₀₅	0,11	0,5	1,2	0,3	0,9

Эффективность применения различных гуминовых удобрений при возделывании ярового ячменя была практически одинаковой. Отмечена лишь тенденция к ее повышению при использовании ЭКО-СП и Фульвигрейн Классик – прибавки урожая в этих вариантах составили 0,52...0,56 т/га против 0,46 т/га при применении Гумифул Про.

Использование гуминовых удобрений при возделывании ярового ячменя положительно сказывалось на качестве зерна, повышая в нем содержание белка на 0,6...0,8 %, крахмала – на 0,3...2,3 %, крупности – на 0,7...1,6 %. Более качественная продукция в годы исследований формировалась в вариантах с использованием гуминовых удобрений ЭКО-СП и Фульвигрейн Классик. Влияние различных видов гуминовых удобрений на качество зерна ярового ячменя было практически одинаковым, достоверных различий между величинами его показателей не наблюдали.

Выводы. Установлена высокая эффективность применения гуминовых удобрений отечественного

(ЭКО-СП) и зарубежного (Фульвигрейн Классик, Гумифул Про) производства при возделывании ярового ячменя. Обработка семян и двукратное опрыскивание посевов (в фазы кушение и выход в трубку) повышали урожайность культуры на 0,46...0,56 т/га, или на 12,7...15,5 %, содержание крахмала в зерне – на 0,3...2,3 %, белка – на 0,6...0,8 %. Эффективность использования гуминовых удобрений отечественного и зарубежного производства была практически одинаковой, что создает научно обоснованные предпосылки для их широкого применения при возделывании ярового ячменя.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Курский федеральный аграрный научный центр». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют результаты исследований человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Кирюшин В. И. Минеральные удобрения как ключевой фактор развития сельского хозяйства и оптимизации природопользования // *Достижения науки и техники АПК*. 2016. Т. 30. № 3. С. 19–25.
2. Аллавердиев С. Р., Ерошенко В. И. Современные технологии в органическом земледелии // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017. № 1–1. С. 76–79.
3. Рябчинская Т. А., Зимина Т. В. Средства, регулирующие рост и развитие растений в агротехнологиях современного производства // *Агрохимия*. 2017. № 12. С. 62–92.
4. Сравнение двух интегральных биотических индексов при оценке эффективности воздействия гуминовых препаратов в модельном эксперименте / О. С. Якименко, В. А. Терехова, М. А. Пукальчик и др. // *Почвоведение*. 2019. № 7. С. 781–792.
5. Пищик В. Н., Бойцова Л. В., Воробьев Н. И. Влияние гуминовых веществ на растения и ризосферные микроорганизмы в растительно-микробных системах // *Агрохимия*. 2019. № 3. С. 85–95.
6. Значение минеральных удобрений и препаратов на основе гуминовых кислот в повышении урожайности кормовых культур на почвах засушливого Поволжья (аналитический обзор) / К. В. Корсаков, Д. С. Семин, А. Н. Астахов и др. // *Аграрный научный журнал*. 2022. № 3. С. 19–22.
7. Действие гуминовых препаратов на активность почвенных ферментов в модельном опыте / М. А. Пукальчик, М. И. Панова, В. А. Терехова и др. // *Агрохимия*. 2017. № 8. С. 84–91.
8. Действие гуминовых кислот на рост бактерий / В. В. Тихонов, А. В. Якушев, Ю. А. Завгородняя и др. // *Почвоведение*. 2010. № 3. С. 333–341.
9. Влияние гуминовых кислот на метаболизм *Chlorella vulgaris* в модельном опыте / М. А. Торпоккина, А. Г. Рюмин, И. О. Кечайкина и др. // *Почвоведение*. 2017. № 11. С. 1336–1343.
10. Изучение эффективности гуминового удобрения ЭДАГУМ®СМ как стимулятора роста и мелиоранта в вегетационном и мелкоделяночном опы-

- тах с пшеницей / А. А. Степанов, О. С. Якименко, Д. Д. Госсей и др. // *Агрохимия*. 2018. № 6. С. 36–43.
11. Хомяков Ю. В. Методические подходы к изучению биохимической активности корнеобитаемых сред растений в регулируемых условиях // *Плодородие*. 2009. № 4 (49). С. 21–23.
12. Чагин В. В., Чагин В. В. Влияние удобрений на продуктивность, качество и сохранность картофеля в период хранения в степной зоне Хакасии // *Земледелие*. 2022. № 1. С. 23–25.
13. Корсаков К. В., Пронько В. В. Повышение окупаемости минеральных удобрений при использовании препаратов на основе гуминовых кислот // *Плодородие*. 2013. Т. 71. № 2. С. 18–20.
14. Бондаренко А. М., Качанова Л. С., Челбин С. М. Технологические основы процесса производства гуминовых органоминеральных удобрений // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2022. Т. 16. № 4. С. 93–99.
15. Якименко О. С., Терехова В. А. Гуминовые препараты и проблема оценки их биологической активности для целей сертификации // *Почвоведение*. 2011. № 11. С. 1334–1343.
16. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. Часть 2. Агрохимикаты. М.: МСХ РФ, 2023: С. 55–59.

Поступила в редакцию 06.06.2023

После доработки 24.11.2023

Принята к публикации 26.12.2023

Растениеводство, защита и биотехнология растений

УДК 633.14:632.938.1

DOI: 10.31857/S2500262724010042, EDN: CVFHBW

ИСТОЧНИКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОЗИМОЙ РЖИ К ГРИБНЫМ БОЛЕЗНЯМ ДЛЯ СЕЛЕКЦИИ НА ФИТОИММУНИТЕТЛ. М. Щеклеина, кандидат сельскохозяйственных наук,
Т. К. Шешегова, доктор биологических наукФедеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого,
610007, Киров, ул. Ленина, 166а
E-mail: immunitet@fanc-sv.ru

Исследования проводили с целью поиска новых источников неспецифической устойчивости озимой ржи к наиболее вредоносным болезням для селекции на фитоиммунитет. Работу выполняли в 2020–2022 гг. в Кировской области. На провокационно-инфекционном фоне развития снежной плесени, мучнистой росы, бурой и стеблевой ржавчины, септориоза, корневых гнилей, спорыньи изучено более 140 отечественных сортов озимой ржи. При учете болезней использовали общепринятые методики. В течение онтогенеза растений (с фазы 31 по 85 по шкале Zadoks) осуществляли анализ нарастания грибной инфекции в сортовых биоценозах. Характер растительно-микробных взаимодействий и параметры устойчивости оценивали по двум показателям: площадь под кривой развития болезни (ПКРБ) и индексу устойчивости (ИУ). Выявлено 28 сортов, отличающихся неспецифической устойчивостью к двум и более болезням, а также медленным (slow rusting) нарастанием инфекции в сортовых биоценозах, среди них – Лика, Гармония, Симфония, Перепел, Графит, Графит ФП, Эра, Эврика, Викрас, Янтарная, Чусовая, Саратовская 7 и др. Они могут быть использованы в качестве источников в селекции на фитоиммунитет. Наиболее высокоурожайными (840...1060 г/м²) были сорта Батист, Дымка, Перепел, Лика, Симфония, Кипрез, Графит ФП, Флора, Эврика, Дана, Марусенька, Эра, Саратовская 7, Чусовая. Коэффициент корреляции (r) между урожайностью и отращиванием после поражения снежной плесенью варьировал от 0,49 (2022 г.) до 0,87 (2020 г.), что подтверждает высокую вредоносность этой болезни в регионе. Определенную иммунологическую ценность в селекции на устойчивость к спорынье могут представлять Рада, Кипрез, Флора, Лика, Батист, Гармония, Симфония, Чусовая, которые значительно меньше стандарта и других сортов поражались этим заболеванием. Уравнения регрессии носят линейный характер ($R^2=0,96...0,99$) и свидетельствуют о суточном нарастании бурой (от 5,4 до 16,4%) и стеблевой (от 4,7 до 26,5%) ржавчины.

SOURCES OF WINTER RYE RESISTANCE TO FUNGAL DISEASES FOR PHYTOIMMUNITY BREEDING

L. M. Shchekleina, T. K. Sheshegova

Federal Agrarian Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky,
610007, Kirov, ul. Lenina, 166a
E-mail: immunitet@fanc-sv.ru

The work was carried out at the Federal Agrarian Scientific Center of the North-East in 2020–2022. More than 140 domestic varieties of winter rye were studied under conditions of Kirov region on provocative-infectious background of snow mold, powdery mildew, brown and stem rust, septoriosi, root rot, ergot. Commonly known methods were used to account for diseases. During the plant ontogenesis (from phase 31 to 85 on Zadoks scale), we analyzed the growth of fungal infection in the variety biocenoses. The nature of plant-microbe interactions and resistance parameters were evaluated according to two indicators PKRB (area under the disease development curve) and IS (resistance index). We identified 28 sortes characterized by nonspecific resistance to two or more diseases and slow (slow rusting) growth of infection in varietal biocenoses. Among them: Lika, Harmonia, Symphony, Perepel, Graphite, Graphite FP, Era, Eureka, Vikras, Amber, Chusovaya, Saratovskaya 7, etc. They can be used in breeding for phytoimmunity as sources. The highest yielding (840–1060 g/m²) among them are: Batiste, Dymka, Perepel, Lika, Symphony, Kiprez, Grafite FP, Flora, Eureka, Dana, Marusenka, Era, Saratovskaya 7, Chusovaya. The correlation coefficient (r) between the yield and regrowth after snow mold lesions varies from 0.49 (2022) to 0.87 (2020), which confirms the high harmfulness of this disease in the region. Rada, Kiprez, Flora, Lika, Batiste, Harmony, Symphony, Chusovaya can be of certain immunological value in breeding for ergot resistance, as they were much less affected by ergot than the standard and other varieties. The regression equations are linear ($R^2 = 0,96–0,99$) and show a daily increase of brown rust (from 5,4 to 16,4%) and stem rust (from 4,7 to 26,5%).

Ключевые слова: *Secale cereale L.*, сорта, иммунологическая оценка, растительно-микробные взаимодействия, провокационно-инфекционные фоны.

Key words: *Secale cereale L.*, varieties, immunological evaluation, plant-microbe interactions, provocation-infection backgrounds.

Известно, что озимая рожь проявляет широкое генетическое разнообразие, основанное на больших экологических различиях между регионами ее возделывания и центром происхождения [1, 2]. Обновление генетического материала путем привлечения новых исходных форм считают базисом селекции любой сельскохозяйственной культуры [3, 4]. При этом для ускорения селекционного процесса в работу целесообразно вовлекать генотипы, обладающие не только

биотической устойчивостью, но и комплексом других селекционно ценных признаков [5, 6, 7]. На сегодняшний день при создании конкурентоспособных сортов озимой ржи актуальны исследования по выявлению эффективных источников и анализу генетического разнообразия культуры по устойчивости к болезням.

На территории Кировской области в посевах озимой ржи практически ежегодно диагностируют снежную плесень (*Microdochium nivale* (Fr.) Samuels & I. C. Hallett),

корневые гнили (*Fusarium* Link.: *F. culmorum* (W. G. Sm.) Sacc, *F. sporotrichioides* Sherb. и др.), мучнистую росу (*Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *secalis* Marchal.), бурую ржавчину (*Puccinia recondita* Roberge ex Desm.), стеблевую ржавчину (*Puccinia graminis* Pers. f.sp. *secalis* (Erikss.et Henn.)), септориоз (*Septoria nodorum* (Berk.) Berk). Периодически та или иная болезнь достигает эпифитотийного уровня развития [8]. Кроме того, в последние годы усилилась частота и уровень поражения ржи спорыньей (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.) [9, 10, 11].

В России и мире остаются актуальными исследования по поиску генотипов с длительной устойчивостью и/или медленным нарастанием (*slow rusting*) инфекции в биоценозе. Мониторинг болезни в динамике развития растений позволяет прогнозировать ее вредоносность и возможные эпифитотии, а также выявлять сорта, восприимчивые на ранних этапах онтогенеза. Для этого можно использовать такие значимые параметры количественной устойчивости, как площадь под кривой развития болезни (ПКРБ) и индекс устойчивости (ИУ) [12, 13]. В полевых условиях их определяют в ходе сезонного мониторинга растительно-микробных взаимодействий.

Цель исследований – поиск новых источников неспецифической устойчивости озимой ржи к наиболее вредоносным болезням для селекции на фитоиммунитет.

Методика. Работу выполняли в 2020–2022 гг. на базе ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр имени Н. В. Рудницкого» (ФАНЦ Северо-Востока). Материал для исследований был представлен 140 перспективными сортами селекции ФАНЦ Северо-Востока и сортами из других научно-исследовательских учреждений (НИУ) РФ. Схема закладки фитопатологических питомников предусматривала использование следующих генотипов: стандарт (сорт, рекомендованный Государственной комиссией по сортоиспытанию), индикаторные сорта (восприимчивые), опытные образцы. В качестве стандарта использовали включенный в Госреестр РФ по Волго-Вятскому региону сорт озимой ржи Фаленская 4. Индикаторными считали наиболее восприимчивые к болезням сорта: Садко (2020 г.), Ниоба (2021 г.), НВАК 285/15 (2023 г.) – к поражению снежной плесенью; Волна (2020 г.), Фаленская универсальная (2021 г.), Фаленская крупнозерная (2022 г.) – к мучнистой росе; Фаленская универсальная (2020 г.), Дымка (2021 г.), Садко (2022 г.) – к септориозу; Роса (2020 г.), Снежана (2021 г.), НВАК 285/15 (2022 г.) – к бурой ржавчине; Графит ПИ 12–11/14 (2020 г.), Дымка (2021 г.), Фаленская крупнозерная (2022 г.) – к стеблевой ржавчине; Леда (2020 г.), Снежана (2021 г.), Ниоба (2022 г.) – к корневым гнилям; Вятка 2 (2020 г.), Графиня 2D (2021 г.), НВАК 285/15 (2022 г.) – к спорынье. Они косвенным образом характеризуют уровень естественной (природной) или искусственной инфекции конкретного патогена в период учета болезни. Ежегодно в изучении было по 40...45 образцов озимой ржи.

Почва опытных участков типичная для области – дерново-подзолистая, среднесуглинистая, окультуренная со следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса – 2,43% (ГОСТ 26213-91), подвижного фосфора и калия – 360 и 210 мг/кг почвы соответственно (ГОСТ 54650-2011), pH солевой вытяжки – 5,7 ед. (ГОСТ 26483-85).

Агроклиматические условия вегетации растений в годы исследований были нестабильными. Отмечали как недостаточный, так и избыточное выпадение осадков и преимущественно высокий температурный фон (табл. 1). В мае 2020 и 2021 гг. преобладала теплая (12,2 и 15,0 °C) с достаточным увлажнением погода

(ГТК=1,25...2,36), в 2022 г. отмечали дефицит тепла и влаги (8,5 °C и 53 мм). Июнь 2021 г. характеризовался жаркой погодой (19,9 °C) при недостатке осадков (63 мм), в остальные годы сумма осадков и температура этого месяца находились на уровне среднееголетних, за исключением 2022 г., когда отмечали избыточное увлажнение (118 мм). В июле преобладала теплая погода (9,2...20,5 °C) с избыточным количеством осадков (92...130 мм), что провоцировало интенсивное развитие грибной инфекции в посевах. Август отличался преимущественно жаркой погодой при крайнем недостатке влаги, о чем свидетельствует уровень ГТК=0,13...0,65.

Табл. 1. Метеорологические условия в период вегетации растений озимой ржи

Месяц	За месяц			Среднееголетнее		
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Температура воздуха, °C						
Май	12,2	15,0	8,5	11,3	11,9	11,9
Июнь	15,3	19,9	16,1	16,5	16,4	16,4
Июль	20,5	19,2	20,0	18,9	18,9	18,9
Август	15,1	18,8	20,0	15,6	18,8	15,9
Количество осадков, мм						
Май	89	58	53	58	54	54
Июнь	41	63	118	86	81	81
Июль	100	92	130	91	82	82
Август	61	38	18	84	73	73
Август	89	58	53	58	54	54
Гидротермический коэффициент (ГТК)						
Май	2,36	1,25	2,04			
Июнь	0,89	1,06	2,44			
Июль	1,57	1,55	2,10			
Август	0,13	0,65	0,29			

Посев проводили кассетной сеялкой СКС-6-10. Площадь делянки 1 м², повторность – трехкратная, размещение делянок – систематическое со смещением. Норма высева 250 всхожих семян на 1 м². Иммунологическую характеристику сортам давали при изучении их в провокационно-инфекционных условиях развития возбудителей болезней. Провокационные условия для мучнисторосяной, септориозной и ржавчинной инфекции обеспечивали путем весеннего посева восприимчивых сортов ржи по периметру фитопатологического участка. В этом случае происходило усиленное нарастание грибной инфекции на обильной биомассе таких растений и перенос спор патогенов на тестируемые сорта. Инфекционный фон на снежную плесень, корневые гнили, спорынью создавали с использованием общеизвестных методов.

Характер растительно-микробных взаимодействий *Secale cereale* L. с фитопатогенами *Blumeria graminis*, *Septoria nodorum*, *Puccinia recondita* и *Puccinia graminis* оценивали по скорости нарастания соответственно мучнистой росы, септориоза, бурой и стеблевой ржавчины у изучаемых образцов. Динамику развития заболеваний учитывали в четыре – пять сроков – с весеннего кущения до начала восковой спелости (фазы 31...85 по шкале Zadoks). Для этого, начиная с первых симптомов поражения, и через каждые 10...14 дней проводили учеты. Далее оценивали скорость нарастания грибной инфекции у каждого сорта с использованием показателя ПКРБ, впервые разработанного D. F. Johnson и R. D. Wilcoxson (1981) [12]:

$$S = \frac{1}{2} \times (X_1 + X_2) \times (t_2 - t_1) + \dots + (X_{n-1} + X_n) \times (t_n - t_{n-1}),$$

где S – площадь под кривой развития болезни, усл. ед.; n – количество учетов; X₁ – степень развития болезни на момент первого учета, %; X₂ – степень развития болезни на момент второго учета, %; X_n – степень развития болезни на момент последнего учета, %; X_{n-1} – ин-

тенсивность развития болезни между последним и предпоследним учетом, %; $(t_2 - t_1)$ – количество дней между вторым и первым учетом; $(t_n + t_{n-1})$ – количество дней между последним и предпоследним учетом.

Чем выше величина ПКРБ, тем интенсивнее идет нарастание болезни и тем более восприимчив сорт. Из-за того, что абсолютные значения ПКРБ варьируют по годам в зависимости от внешних условий и инфекционной нагрузки, дополнительным критерием считали индекс устойчивости (ИУ). Он дает возможность не только сравнивать результаты полевых оценок, но и классифицировать сорта по уровню частичной устойчивости или «slow rusting».

При учете спорыньи использовали два показателя – поражение (доля растений со склероциями в пробе) и засоренность зерна склероциями (доля массы склероциев в зерновой пробе) [14]. Характеристику сортов по устойчивости давали на основании шкалы Т. Мида-нера с соавторами [15].

К источникам относили сорта, сохраняющие высокую устойчивость (6...9 баллов) к конкретной болезни не менее 3-х лет изучения в условиях провокационно-инфекционного фона.

Иммунологическую характеристику изучаемым сортам давали по уровню развития листостебельных болезней: иммунитет – отсутствие симптомов; высокая устойчивость – до 10%; устойчивость – до 25%; средняя устойчивость – до 45%; восприимчивость – до 65%; высокая восприимчивость – более 65%.

В таблицах генотипы разделены на две группы. В первую вошли сорта селекции ФАНЦ Северо-Востока, во вторую – созданные в других НИУ РФ. Для статистической обработки результатов исследований использовали пакет программ статистического и биометрико-генетического анализа в растениеводстве и селекции AGROS (версия 2.07) и программы Microsoft Office Excel.

Результаты и обсуждение. Изучение перспективных сортов, находящихся в конкурсном сортоиспытании ФАНЦ Северо-Востока в условиях провокационно-инфекционных фонов, продемонстрировало широкую дифференциацию генотипов по восприимчивости к основным болезням. Большинство из них характеризовалось высокой регенерационной способностью после поражения снежной плесенью (отрастание), которая на инфекционном фоне *M. nivale* достигала 95,0%. Наибольшее отрастание (70,0...95,0%) отмечали у 11 сортов, к числу которых относились Вятка 2, Кировская 89, Дымка и Рада, Лика и Батист (приходят Государственное испытание), Талица (передан на ГСИ в 2023 г.), перспективные образцы Симфония, Перепел и Графит ФП (табл. 2). Среди отечественных сортов высокой регенерационной способностью 60,0...90,0% при величине этого показателя у стандарта Фаленская 4 на уровне 55,0% в условиях Кировской области обладали Дана, Эврика, Викрас, Солнышко, Марусенька.

В провокационных для развития *B. graminis*, *S. nodorum*, *P. dispersa*, *P. recondita* условиях, обеспеченных весенним посевом озимой ржи на фитопатоло-

Табл. 2. Иммунологическая оценка некоторых перспективных и возделываемых отечественных сортов озимой ржи (провокационно-инфекционные фоны, среднее за 2020–2022 г.)

Сорт	Отрастание после поражения снежной плесенью*, %	Степень поражения, %					Спорынья	
		мучнистой росой	септориозом	бурой ржавчиной	стеблевой ржавчиной	корневыми гнилями	поражение, %	засоренность зерна склероциями, %
Сорта селекции ФАНЦ Северо-Востока								
Батист	80,0	18,4	14,2	27,8	40,0	18,8	14,7	0,6
Вятка 2	85,5	13,8	16,0	31,7	35,0	23,9	9,9	0,9
Гармония	55,0	11,9	9,6	24,3	30,0	19,8	17,7	0,6
Графиня	60,0	11,9	12,5	28,4	40,0	26,5	29,1	1,2
Графит ФП	70,0	13,4	14,6	26,2	35,5	21,6	20,8	0,6
Дымка	95,0	20,9	20,4	35,4	45,0	30,3	14,0	0,4
Кировская 89	85,0	12,9	11,6	20,8	25,0	14,1	28,4	1,4
Кипрез	85,0	17,1	19,2	35,8	26,3	24,2	6,6	0,2
Лика	95,0	11,0	12,9	21,8	30,0	24,3	14,1	0,4
Перепел	85,0	12,5	13,5	30,4	25,0	18,6	18,9	0,8
Рушник	55,0	21,9	14,6	32,5	21,3	25,0	16,3	0,7
Рада	75,0	16,7	20,0	27,5	30,5	21,5	4,2	0,3
Симфония	85,0	9,6	13,8	21,5	22,0	22,6	23,1	1,0
Снежана	65,0	17,8	18,6	34,6	32,8	26,4	13,0	0,5
Талица	80,0	17,5	17,5	36,7	30,5	25,1	19,6	0,5
Флора	65,0	10,4	12,0	35,8	25,0	26,7	11,1	0,4
Фаленская 4, стандарт	55,0	18,4	17,9	31,8	60,0	27,0	18,7	0,5
Индикаторный сорт	20,0	25,9	24,9	43,0	60,0	38,6	67,2	3,9
Среднее	89,6	16,4	16,8	31,6	35,5	23,5	18,8	0,8
НСР ₀₅	8,5	3,4	2,4	2,0	5,8	0,9	6,1	0,8
P, %	3,6	8,1	4,7	2,2	5,5	1,4	6,2	3,4
Сорта селекции других НИУ РФ								
Викрас	70,0	33,7	17,1	15,5	30,0	-**	11,9	0,5
Дана	70,0	19,2	18,8	19,0	30,0	-	26,1	0,9
Дарвет	50,0	25,7	24,6	17,0	35,0	-	26,3	0,9
Марусенька	90,0	23,8	17,9	37,0	70,0	-	13,1	0,5
Саратовская 7	70,0	40,9	17,9	39,6	60,0	-	16,7	0,3
Саратовская 10	70,0	39,6	22,5	38,0	50,0	-	34,7	1,8
Солнышко	90,0	40,0	16,7	51,5	70,0	-	27,1	1,1
Чусовая	50,0	21,3	10,8	22,0	60,0	-	6,7	0,2
Эврика	70,0	15,4	15,8	25,0	40,0	-	11,1	0,5
Эра	60,0	12,4	19,2	23,5	30,0	-	23,4	0,8
Янтарная	40,0	20,9	20,8	18,5	35,0	-	33,3	1,9
Индикаторный сорт	20,0	36,8	37,9	60,0	80,0	-	77,8	9,4
Среднее	68,6	26,4	18,5	32,6	46,5	-	22,9	1,2
НСР ₀₅	7,9	5,8	4,5	6,9	8,1	-	3,7	0,4
P, %	3,7	6,9	7,7	8,1	5,7	-	5,7	3,8

*поражение снежной плесенью 100%; **учеты не проводили.

гическом участке, изучаемый генофонд в значительной степени поражался мучнистой росой, септориозом, бурой и стеблевой ржавчиной. Наименьшая степень поражения мучнистой росой и септориозом до 15,0% выявлена у сортов Кировская 89, Флора, Графиня, Лика, Гармония, Симфония, Перепел, Графит ФП и Эврика. На фоне сильного развития ржавчинной инфекции можно выделить сорта Кировская 89, Симфония, Дана, Янтарная, Дарвет и Викрас с наименьшим (15,5...21,5%) проявлением бурой ржавчины. У стандарта Фаленская 4 степень поражения бурой и стеблевой ржавчиной составляла 31,8% и 60,0% соответственно.

Сорта ФАНЦ Северо-Востока характеризовались преимущественно средней устойчивостью к корневым гнилям. Наименьшее развитие болезни до 20,0% выявлено у сортов Кировская 89, Батист, Гармония, Перепел при величине этого показателя у стандарта на 7% больше.

При инокуляции цветков изучаемых сортов конидиями *S. purpurea* поражение спорыньей варьировало от 4,2 (Рада) до 34,7% (Саратовская 10) при засоренности зерна склероциями – от 0,2 (Кипрез, Чусовая) до 1,8% (Саратовская 10). В контроле (без инокуляции) в течение 3 лет наблюдений склероции отсутствовали у всех сортообразцов. Поэтому определенную ценность в селекции на устойчивость к спорынье могут представлять Рада, Кипрез, Чусовая, Вятка 2, Флора, Эврика, Викрас, Снежана, Марусенька, Дымка, Лика, Батист (4,2...14,7%), которые поражились этой болезнью значительно меньше стандарта на 4,0...14,5%.

Большинство изученных сортообразцов (Батист, Дымка, Перепел, Лика, Симфония, Кипрез, Графит ФП, Флора, Эврика, Дана, Марусенька, Эра, Саратовская 7, Чусовая) достоверно (при $P \geq 0,95$) превосходили стандарт Фаленская 4 по урожайности (рис. 1). У сортов ФАНЦ Северо-Востока она составила в среднем 761,6 г/м², других отечественных сортов – 864,7 г/м² ($HCP_{05} = 41,9$; $P = 1,8\%$).

Известно, что урожайность озимой ржи в условиях Кировской области в значительной степени определяют условия перезимовки и способность к отрастанию после поражения снежной плесенью [16]. В наших исследованиях коэффициент корреляции (r) между этими признаками варьировал от 0,49 (2022 г.) до 0,87 (2020 г.), что еще раз подтверждает высокую вредоносность болезни в регионе. В 2022 г. достоверное (при $P \geq 0,95$) негативное влияние на урожайность оказывало развитие бурой ржавчины ($r = -0,42$); воздействие других болезней на этот признак было слабым ($r = -0,24...-0,28$).

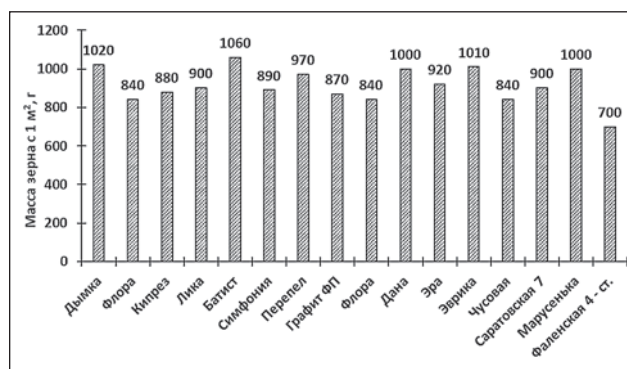


Рис. 1. Высокоурожайные отечественные сорта озимой ржи (провокационно-инфекционные фоны, среднее за 2020–2022 гг.; $HCP_{05} = 41,9$; $P = 1,8\%$).

В ходе многократных учетов развития болезней был проанализирован характер взаимодействия сортимента ржи с фитопатогенами и выявлены источники, обладающие длительным латентным периодом патогенезов, свойством «slow rusting» и комплексной устойчивостью к болезням.

Первые симптомы мучнистой росы отмечали в фазе 51 по шкале Zadoks. При этом у 6 сортов (Гармония, Перепел, Графит, Эра, Эврика, Янтарная) налет *B. graminis* отсутствовал, что может свидетельствовать о более длительном инкубационном периоде болезни в таких бинарных взаимодействиях (табл. 3). Интенсивное нарастание мучнисторосяной инфекции происходило к 3 и 4-му учетам – в фазы 69...75. Развитие болезни до 15,0% выявлено у сортов Лика, Гармония, Симфония, Графит, Графит ФП, Эра, Эврика, Янтарная, Чусовая, Дарвет, Викрас и Саратовская 7. Судя по показателям ПКРБ (139...374 ед.) и ИУ (0,2...0,5) относительно медленным нарастанием мучнистой росы и более длительным инкубационным периодом характеризуются сорта Симфония, Графит ФП, Эра, Эврика, Янтарная, Чусовая, Саратовская 10 и Памяти Бамбышева. Степень поражения этих сортов была меньше, чем у стандарта, на 1,2...9,0%.

Первые симптомы септориоза у большинства сортов, за исключением Янтарная и Чусовая, отмечали в начале колошения растений. При 2-м и 3-м учетах степень поражения варьировала от слабой (8,0%) до средней (15,0%), за исключением сорта Фаленская крупнозерная. Интенсивное нарастание септориозной инфекции происходило к 4-му учету (фаза 75). В этих условиях у сортов Лика, Симфония, Перепел, Эра, Эврика, Янтарная, Саратовская 7 развитие болезни не превышало

Табл. 3. Сорта озимой ржи с медленным нарастанием грибной инфекции в биоценозах

Сорт	Мучнистая роса			Септориоз			Бурая ржавчина			Стеблевая ржавчина		
	СП*, %	ПРКБ	ИУ	СП, %	ПРКБ	ИУ	СП, %	ПРКБ	ИУ	СП, %	ПРКБ	ИУ
Сорта ФАНЦ Северо-Востока												
Лика	15,0	315	0,5	15,0	365	0,5	25,0	643	0,6	18,0	353	0,4
Гармония	15,0	322	0,5	16,7	444	0,5	-	-	-	25,0	270	0,3
Симфония	13,3	312	0,4	14,5	359	0,4	-	-	-	20,0	440	0,5
Перепел	14,7	374	0,5	15,5	423	0,5	18,3	515	0,5	18,0	270	0,3
Графит	15,0	316	0,5	16,5	250	0,3	16,7	583	0,6	-	-	-
Графит ФП	11,7	292	0,4	-	-	-	20,0	500	0,5	22,0	573	0,6
Фаленская 4 - стандарт	16,7	557	0,8	21,7	525	0,8	32,5	729	0,8	30,0	462	0,6
Сорта других НИУ РФ												
Эра	15,5	304	0,4	13,3	402	0,5	-	-	-	20,0	373	0,5
Эврика	7,5	205	0,3	11,7	301	0,4	-	-	-	20,0	271	0,3
Викрас	12,5	422	0,5	18,3	443	0,5	-	-	-	-	-	-
Янтарная	12,5	273	0,4	12,5	342	0,4	-	-	-	-	-	-
Чусовая	11,7	373	0,5	16,7	389	0,5	-	-	-	-	-	-
Саратовская 7	15,0	403	0,5	15,0	415	0,5	-	-	-	20,0	271	0,3
Индикаторные сорта	25,0	690	-	28,3	720	-	37,5	954	-	50,0	830	-

* СП – степень поражения.

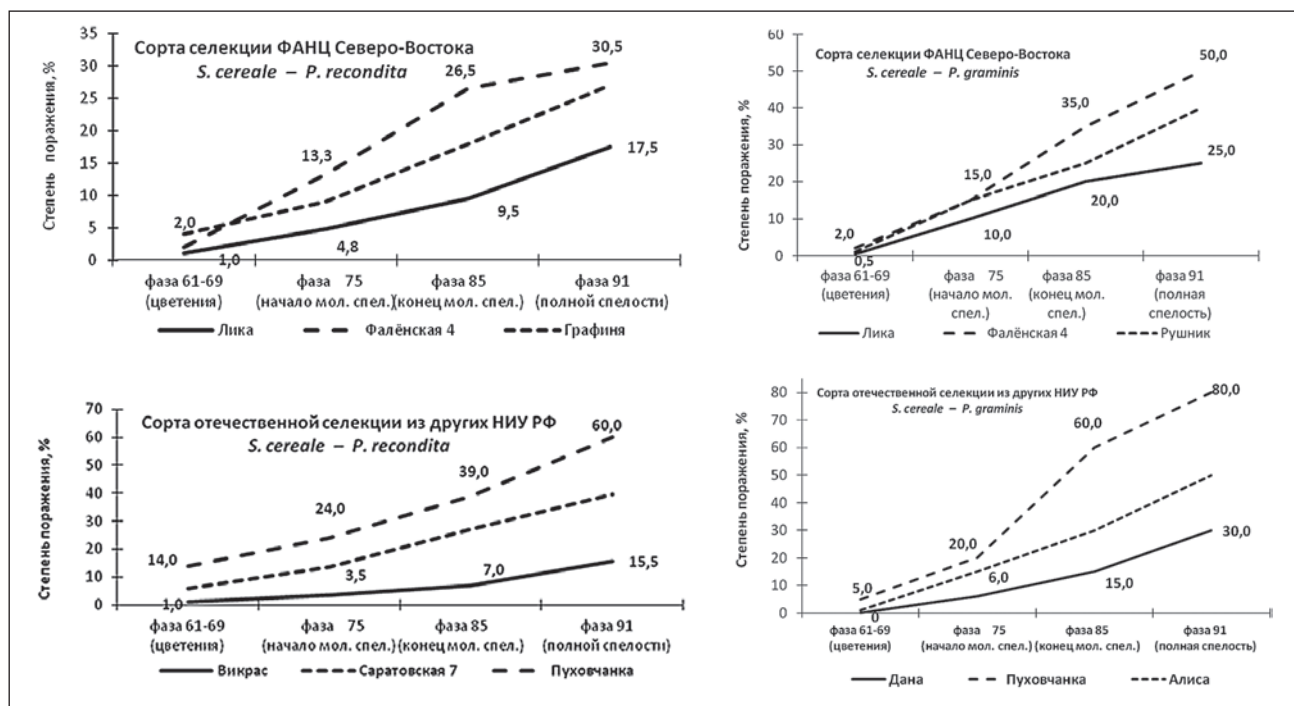


Рис. 2. Нарастание инфекции в биоценозах сортов, контрастных по уровню горизонтальной устойчивости к ржавчинной инфекции (среднее за 2020–2022 гг., n=40...45).

15,5% при значениях ПКРБ от 83 до 423 ед., ИУ – от 0,1 до 0,5. Степень поражения этих сортов была меньше, чем у стандарта Фаленская 4, на 3,4...7,2%.

Первые пустулы *P. recondita* на растениях большинства сортов, за исключением Фаленской крупнозерной, Батиста, Лики, Графита, Эврики, Янтарной, Дарвета, Саратовской 10, обнаруживали в фазе 51...55. Нарастание инфекции усиливалось к фазе 75. В этих условиях степень поражения до 20,0% была выявлена только у 3-х сортов – Графит, Перепел, Графит ФП (рис. 2). Степень поражения этих сортов была меньше, по сравнению со стандартом, на 7,5...15,8%.

Первые симптомы стеблевой ржавчины отмечали в период налива зерна, при котором у 18 сортов они отсутствовали. В годы исследований усиление поражения ржавчинной инфекцией происходило при повышении температуры с 18,0...18,6 °С (1 декада июля) до 19,6...20,2 °С (2 и 3 декада июля). В последу-

ющих учетах развитие болезни на индикаторном сорте достигало 80,0%. Наименьшую степень поражения (18,0...25,0%) отмечали у сортов Лика, Симфония, Перепел, Графит, Графит ФП, Эра, Саратовская 7 при ПКРБ – 271...440 ед., ИУ – 0,3...0,6 ед. Степень поражения этих сортов была меньше, чем стандарта, на 5,0...12,0%.

Регрессионный анализ косвенно отражает уровень возможного увеличения развития ржавчинной инфекции. Приведенные уравнения регрессии (табл. 4) свидетельствуют, что в годы исследований наблюдали значительные различия в росте вредоносности видов ржавчины в Кировской области. При этом на сортах селекции ФАНЦ Северо-Востока степень поражения варьировала в пределах 5,4...9,9% (бурая ржавчина) и 8,4...16,4% (стеблевая ржавчина); на сортах других НИУ РФ – 4,7...15,3% (бурая) и 9,9...26,5% (стеблевая). Коэффициент детерминации ($R^2 = 0,96...0,99$) указывает на сильную связь между уровнем развития бурой или стеблевой ржавчины и суммарным индексом степени поражения ржавчинными болезнями.

Выводы. Таким образом, выявлено 28 сортов озимой ржи, отличающихся неспецифической устойчивостью к двум и более болезням, а также медленным (*slow rusting*) нарастанием инфекции в сортовых биоценозах, которые рекомендуются к использованию в селекционных программах в качестве источников. В селекции на устойчивость к спорынье могут быть использованы наименее поражаемые при искусственной инокуляции *S. purpurea* сорта Рада, Кипрез, Флора, Лика, Батист, Гармония, Чусовая. Наиболее высокоурожайными (840...1060 г/м²) среди изученного генофонда были Батист, Дымка, Перепел, Лика, Симфония, Кипрез, Графит ФП, Флора, Эврика, Дана, Марусенька, Эра, Саратовская 7, Чусовая. Для условий Кировской области установлена достоверная связь между урожайностью и отращиванием растений после поражения снежной плесенью с коэффициентом корреляции (r) от 0,49 (2022 г.) до 0,87 (2020 г.).

Табл. 4. Уравнения регрессии на различных по восприимчивости к бурой и стеблевой ржавчине сортах озимой ржи

Сорт	Происхождение	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R ²
Бурая ржавчина			
Лика	ФАНЦ	$y = 5,42x - 5,35^*$	0,969
Фаленская 4	Северо-Востока	$y = 9,87x - 6,6$	0,962
Графиня		$y = 7,83x - 5,05$	0,984
Викрас	другие	$y = 4,7x - 5,0$	0,919
Саратовская 7	отечественные	$y = 11,43x - 7,05$	0,987
Пуховчанка	НИУ	$y = 15,3x - 4,0$	0,975
Стеблевая ржавчина			
Лика	ФАНЦ	$y = 8,35x - 7,0$	0,982
Фаленская 4	Северо-Востока	$y = 16,4x - 15,5$	0,994
Рушник		$y = 12,7x - 11,5$	0,995
Дана	другие	$y = 9,9x - 12,0$	0,959
Пуховчанка	отечественные	$y = 26,5x - 25,0$	0,970
Алиса	НИУ	$y = 16,2x - 16,5$	0,993

* у – уровень развития бурой или стеблевой ржавчины; x – суммарный индекс степени поражения ржавчинными болезнями.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» по теме FNWE-2022–0007.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Шлегель Р. Селекция гибридных форм как стимул развития молекулярно-генетических исследований у ржи // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2015. Т. 19 (5). С 589–603. doi: 10.18699/VJ15.076.
2. Направления, методы и результаты селекции ржи (*Secale cereale* L.) в Беларуси / Э. П. Урбан, С. И. Гордей, Д. Ю. Артюх и др. // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*. 2022. Vol. 60. No. 2. P. 160–170. doi: 10.29235/1817-7204-2022-60-2-160-170.
3. Пономарева М. Л., Пономарев С. Н., Маннапова Г. С. Исходный материал для селекции озимой ржи (*Secale cereale* L.) // *Вестник Красноярского ГАУ*. 2018. № 3. С 19–24.
4. Сафонова И. В., Аниськов Н. И., Кобылянский В. Д. База данных генетических ресурсов коллекции озимой ржи ВИР как средство классификации генетического разнообразия, анализа истории коллекции и эффективного изучения и сохранения // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019. № 23(6). С 780–786. doi: 10.18699/VJ19.552.
5. Кобылянский В. Д., Солодухина О. В. Использование доноров ценных признаков растений в селекции новых сортов озимой ржи // *Достижения науки и техники АПК*. 2015. № 29 (7). С 7–12.
6. Создание исходного материала озимой пшеницы на устойчивость к биотическим и абиотическим стрессам в Центральном Нечерноземье / Б. И. Сандухадзе, Р. З. Мамедов, В. В. Бугрова и др. // *АгроФорум*. 2019. № 7. С 58–62.
7. Фитосанитарный мониторинг наиболее вредоносных болезней озимой ржи в республике Татарстан / М. Л. Пономарева, С. Н. Пономарев, Г. С. Маннапова и др. // *Вестник Красноярского ГАУ*. 2019. № 9 (150). С 27–34.
8. Щеклеина Л. М. Мониторинг болезней озимой ржи в Кировской области и возможные направления селекции на иммунитет // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020. № 21(2). С 124–132. doi: 10.30766/2072–9081.2020.21.2.124–132.
9. Щеклеина Л. М. Влияние погодных факторов на отдельные периоды развития гриба *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul и уровень вредоносности спорыньи в Кировской области // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2019. № 2. С 134–143. doi: 10.30766/2072–9081.2019.20.2.134-143.
10. Щеклеина Л. М., Шешегова Т. К. Сорты озимой ржи, умеренно устойчивые к спорынье // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022. № 183(4). С 229–238. doi: 10.30901/2227-8834-2022-4-229-238.
11. Кобылянский В. Д., Солодухина О. В. Развитие спорыньи на низкоопентозановой диплоидной озимой ржи // *Зерновое хозяйство России*. 2021. № 4. С 73–78.
12. Johnson D. F., Wilcoxson R. D. A table of areas under disease progress curves // *Technical Bulletin. Texas: Texas Agriculture Experiment Station*, 1981. Vol. 1377. P. 2–10.
13. Селекция озимой ржи на устойчивость к спорынье: методическое пособие / Т. К. Шешегова, Л. М. Щеклеина, Л. И. Кедрова и др. Киров: ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, 2018. 27 с.
14. Miedaner T., Mirdita V., Geiger H. H. Strategies in breeding for ergot (*Claviceps purpurea*) resistance // *Book of abstracts: International Symposium on Rye Breeding & Genetics*. Minsk: ИВЦ Минфина, 2010. P. 26.
15. Кедрова Л. И. Озимая рожь в Северо-Восточном регионе России. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2000. 158 с.

Поступила в редакцию 08.10.2023
 После доработки 25.12.2023
 Принята к публикации 09.01.2024

МУЧНИСТАЯ РОСА – ОПАСНАЯ БОЛЕЗНЬ ЯРОВОЙ ТРИТИКАЛЕ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ

Т. А. Асеева, доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН,
К. В. Зенкина, кандидат сельскохозяйственных наук

Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства,
Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН,
680521, Хабаровский край, Хабаровский р-н, с. Восточное, ул. Клубная, 13
E-mail: aseeva59@mail.ru

Работу проводили в 2015–2022 гг. с целью определения степени поражения коллекционных образцов яровой тритикале мучнистой росой в почвенно-климатических условиях Хабаровского края. Объект исследований – 84 образца различного эколого-географического происхождения. Метеоусловия в период исследований были контрастными, при норме осадков за апрель–август 466 мм, превышение составило 16...263 мм, переувлажнение способствовало повышению относительной влажности воздуха до 100%. Почва опытного участка – тяжелосуглинистая лугово-бурая оподзоленно-глеявая. Интенсивность развития (R) мучнистой росы в посевах тритикале была высокой (80...100%), распространение (P) достигало эпифитотийных значений ежегодно. По интенсивности развития заболевания коллекционные сорта яровой тритикале относились к трем группам: средневосприимчивые (13 образцов), восприимчивые (35 образцов), сильновосприимчивые (36 образцов). Между количеством осадков, выпавших в фазе трубкования–колошение, и степенью инфицирования растений мучнистой росой отмечены высокие коэффициенты корреляции ($r=0,861...0,897$). Зависимость между интенсивностью развития возбудителя мучнистой росы и количеством выпавших осадков за вторую декаду июня характеризует уравнение прямой регрессии. Средней восприимчивостью к возбудителям мучнистой росы ($P=30...40\%$) характеризовались сорта яровой тритикале Аморе, Саур, Праг 409, Дагво (Россия), Лана, Лотос (Беларусь), Згуривский, Обериг харьковский (Украина), 70 HN 458 (Канада), Je 57 (США), Anoas 5, MX 51 (Мексика), Tleridal (Швейцария).

POWDERY MIDLEW IS A DANGEROUS DISEASE OF SPRING TRITICALE IN THE FAR EAST

T. A. Aseeva, K. V. Zenkina

Far Eastern Research Institute of Agriculture, Khabarovsk Federal Research Center,
Far Eastern branch, Russian Academy of Sciences,
680521, Khabarovskii krai, Khabarovskii r-n, s. Vostochnoe, ul. Klubnaya, 13
E-mail: aseeva59@mail.ru

The studies were carried out in 2015–2022. in order to determine the degree of damage to collection samples of spring triticale by powdery mildew in the soil and climatic conditions of the Khabarovsk Territory of the Far East. The object of research is 84 samples of various ecological and geographical origins. The weather conditions during the research period were contrasting; with the normal precipitation for April–August being 466 mm, the excess was 16...263 mm; waterlogging contributed to an increase in relative air humidity to 100%. The soil of the experimental plot is heavy loamy meadow-brown podzolized-gley. The distribution (R) of powdery mildew in triticale crops was high (80...100%), the intensity of development (P) reached epiphytotic values annually. Collection varieties of spring triticale were distributed according to the intensity of disease development: moderately susceptible (13 samples), susceptible (35 samples), highly susceptible (36 samples). High correlation coefficients were calculated between the amount of precipitation in the booting-earing phase and the degree of infection of plants with powdery mildew ($r = 0.861...0.897$), and a linear regression equation was compiled that shows the dependence of the intensity of development of the powdery mildew pathogen and the amount of precipitation in the second ten days of June. Thus, spring triticale varieties were identified that have average susceptibility to powdery mildew pathogens ($P = 30...40\%$): Amore, Saur, Prag 409, Dagvo (Russia), Lana, Lotos (Belarus), Zgurivskiy, Oberig Kharkovskiy (Ukraine), 70 HN 458 (Canada), Je 57 (USA), Anoas 5, MX 51 (Mexico), Tleridal (Switzerland).

Ключевые слова: яровая тритикале (*×Triticosecale* Wittmack), коллекция, эпифитотия, мучнистая роса, Дальний Восток.

Key words: spring triticale (*×Triticosecale* Wittmack), collection, epiphytoty, powdery mildew, Far East.

Возрастающая опасность микозов – общая проблема как для растениеводства, так и животноводства [1]. Обнаружение неизвестных ранее на территории Российской Федерации патогенов требует разработки и освоения новых методов защиты растений, определения порогов вредоносности и поражаемости сортифта возделываемых культур, поиска источников и идентификации генов устойчивости, а также разработки способов их использования [2]. Возбудителей мучнистой росы – *Blumeria graminis* (DC) Speer., серьезного заболевания сельскохозяйственных культур во многих регионах мира [3], подразделяют на более чем 873 видов грибных патогенов, поражающих более 10000 видов растений [4]. В период вегетации растений гриб распространяется конидиями, которые прорас-

тают при влажности воздуха 80...100% (оптимум 96...99%), температуре воздуха 4...30 °C (оптимум 15...20 °C) и рассеянном свете [5]. Под действием высоких температур, как правило, уменьшается продолжительность инкубационного периода патогена, увеличивается количество фитопатогенных микроорганизмов и, как следствие, инфекционная нагрузка [6]. Для снижения вредоносности мучнистой росы на зерновых колосовых культурах целесообразно использовать комплекс приемов, включающий лучших предшественников, устойчивые сорта, оптимальные нормы и сроки посева, сбалансированные дозы внесения минеральных удобрений [7].

Тритикале (*×Triticosecale* Wittmack) – искусственный гибрид пшеницы и ржи. Большинство исследова-

телей считали, что она обладает иммунитетом к возбудителю мучнистой росы [8], а ее современные сорта как в естественных условиях, так и на фоне искусственного заражения, не поражаются этой болезнью [9, 10]. В связи с расширением ареала выращивания тритикале с 2001 г. отмечают тенденцию к увеличению поражения растений мучнистой росой [11, 12]. Большое разнообразие видов возбудителя и рост площадей, занятых несколькими доминирующими сортами, ускорили адаптацию патогена и привели к снижению устойчивости растений тритикале [13].

Между популяциями мучнистой росы тритикале и ее родительских видов установлено незначительное генетическое сходство [14]. Выявлено, что мучнистая роса тритикале (*Blumeria graminis* f. sp. *triticales*) – гибридная форма между мучнистой росой пшеницы (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*) и ржи (*Blumeria graminis* f. sp. *secalis*) [15]. Постоянный мониторинг вирулентности популяций гриба, поиск новых эффективных генов устойчивости к болезни и введение их в перспективные сорта – необходимые этапы селекции [16]. Информация по развитию и распространению мучнистой росы в посевах сортов тритикале, рекомендованных для возделывания в Дальневосточном регионе, на сегодняшний день отсутствует.

Цель исследования – определить степень поражения коллекционных образцов яровой тритикале мучнистой росой в условиях Дальнего Востока.

Методика. Работу выполняли в 2015–2022 гг. в Дальневосточном научно-исследовательском институте сельского хозяйства (Россия, Хабаровский край). Объект исследований – 84 образца яровой тритикале различного происхождения. Контроля устойчивости в опыте не было, так как в регионе не найдено сортов иммунных или устойчивых к заболеванию.

Почва экспериментального участка – тяжелосуглинистая лугово-бурая оподзоленно-глеевая тяжелосуглинистая с содержанием гумуса (по Тюрину) 3,6...3,8%, фосфора и калия (по Кирсанову) – соответственно 9,9...15,5 и 27,7...30,4 мг/100 г абсолютно сухой почвы; рН_{сол.} – 5,1...5,3 ед.; гидролитическая кислотность – 1,14...2,40 мг-экв./100 г почвы.

Материал высевали в оптимальные для региона сроки рендомизировано в трехкратной повторности сеялкой ССФК-7М, уборку проводили комбайном ХЕГЕ-125. Предшественник – черный пар, агротехника – общепринятая для региона [17].

Учет мучнистой росы осуществляли в течение вегетации на естественном инфекционном фоне, определяли интенсивность развития (*R*) и степень распространения (*P*) болезни [18]. По величине *P* образцы оценивали по следующей шкале: устойчивые – <10%, среднеустойчивые – 11...30%, средневосприимчивые – 31...40%, восприимчивые – 41...70%, сильно восприимчивые – 71...100%.

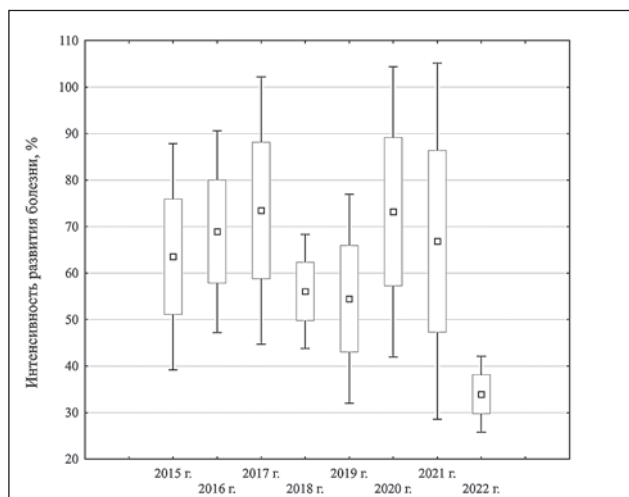
Метеорологические условия в годы исследований характеризовались варьированием температур приземного слоя воздуха и выраженным избытком влаги в летнее время. В период с мая по август ежегодно складывались благоприятные погодные условия для развития мучнистой росы в посевах тритикале – переувлажнение в мае 2015, 2016, 2019 гг. (на 75...106% выше среднегогодовой нормы), июне 2015, 2016, 2018, 2020, 2021 гг. (на 68...167% выше нормы), июле 2015, 2018, 2019 гг. (на 22...39% выше среднегогодовых значений), августе 2016, 2017, 2019, 2020, 2022 гг. (на 27...106% выше нормы). В результате влажность воздуха достигала 80...100% (табл. 1).

Табл. 1. Метеорологические условия в годы проведения исследований

Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август
Температура воздуха, °С					
2015	4,2	10,8	17,2	20,5	20,9
2016	4,8	13,0	17,4	21,9	20,1
2017	5,3	14,5	16,5	22,7	19,8
2018	6,4	13,8	16,7	21,7	19,7
2019	6,1	13,6	15,9	21,6	18,9
2020	5,2	14,3	15,2	22,1	18,5
2021	4,2	12,6	19,0	25,1	20,1
2022	4,7	12,6	19,0	25,1	20,1
Среднегоголетнее значение	4,4	12,0	17,9	21,4	19,6
Количество осадков, мм					
2015	50	105	174	172	119
2016	46	122	136	116	192
2017	31	47	90	112	227
2018	30	24	208	161	59
2019	11	124	99	184	311
2020	16	27	131	118	231
2021	40	63	134	26	9
2022	56	53	89	57	333
Среднегоголетнее значение	45	60	78	132	151

Статистическую обработку данных (корреляционный и регрессионный анализы) проводили с использованием программы Statistica 10.

Результаты и обсуждение. Мучнистую росу на растениях яровой тритикале в условиях Дальневосточного региона отмечали в различной степени ежегодно, средняя интенсивность развития заболевания по годам составляла от 34 до 73% (см. рисунок). Первые симптомы проявлялись в фазе всходов, максимального развития болезнь достигала в межфазный период колошение–цветение.



Распространение мучнистой росы у коллекционных образцов тритикале: □ – Mean, | – Mean±SD, — – Mean±1,96×SD

В результате исследований образцы яровой тритикале по распространению инфицирования (*P*) мучнистой росой при развитии заболевания по всей площади (*R*=80...100%) были распределены следующим образом: средневосприимчивые – 15%, восприимчивые – 42%, сильно восприимчивые – 43%.

К первой группе (средневосприимчивые) отнесены сорта Аморе, Саур, Праг 409, Дагво (Россия), Лана, Лотос (Беларусь), Згурівський, Оберіг харківський (Украина), 70 HN 458 (Канада), Je 57(США), Aноas 5, МХ 51 (Мексика), Tleridal (Швейцария). Распространение заболевания (*P*) на растениях этих образцов в среднем

за годы исследований составляло 38% с варьированием по годам в следующих диапазонах: в 2015 г. – 29...42%, 2016 г. – 37...43%, 2017 г. – 46...58%, 2018 г. – 34...43%, 2019 г. – 22...35%, 2020 г. – 45...54%, 2021 г. – 28...48%, в 2022 г. – 10...30%.

Сорта, вошедшие во вторую группу (восприимчивые) – Скорый, Скорый 2, Золотой Гребешок, Ярило, ЗГ 186, Память Мережко, Ровня, Амиго, СПТГ 5–2, Праг 503, Праг 505, Т-378, Квадро, Ярик, Праг 46/1 (Россия), AC Certa (Канада), Виктория, Кобзар, Хлібодар харківський, Коровай харківський (Украина), Ульяна, Узор, Клад, Рубин, Магнит, Привет (Беларусь), Brjo, Sandio (Швейцария), Crato (Португалия), Gabo, Wanad, Kargo (Польша), Ardi 1/Торо 1419//Erizo 9/4, Ardi 1/Торо 1419//Erizo 9/3, Fahad 8–2*2// PTR/PND–Т/3 (Мексика). В среднем за годы исследований распространение (Р) болезни в их посевах достигало 65%: в 2015 г. – 52...75%, 2016 г. – 63...78%, 2017 г. – 82...94%, 2018 г. – 45...58%, 2019 г. – 52...60%, 2020 г. – 73...89%, 2021 г. – 53...90%, в 2022 г. – 35...45%.

Сильное поражение наблюдали у сортов Кармен, Норманн, ЛТ-Ф6–540–4, Доброе, Россика, Заозерье, Доброе (Россия), Примэвара 5 (Молдавия), AC Soría, AC Alta (Канада), Moloc 4, F7NV Tcl 154, Alamos (Tcl.84), Pollmer 2.1.1, Presto // 2*Тесмо 1 / Mus x 603, Tapir S, Presto 401 (Мексика), Садко, Русло (Беларусь), Жайворонок харківський, Аист харьковский, Соловей харківський, Арсенал, Крупільске, Микола, Легінь харківський, Харків АВІАС, ЯТХ 42, ЯТХ 26–07 (Украина), Trіk (Франция), Taugus (Великобритания), Guadajira (Испания), Лайлак богари (Таджикистан), Breakwell (Австралия), Jenk-60 (США), IT (71/72) – Armadillo (Португалия) с распространением заболевания (Р) в 2015 г. 82...98%, 2016 г. – 81...86%, 2017 г. – 76...79%, 2018 г. – 58...100%, 2019 г. – 77...81%, 2020 г. – 84...90%, 2021 г. – 82...98%, в 2022 г. – 41...44%.

Интенсивность развития и распространение фитопатогенов в значительной степени определяют погодные условия периода вегетации. В годы исследования на развитие возбудителя мучнистой росы яровой тритикале наибольшее влияние оказывали осадки в период от трубкования до колошения растений ($r=0,861...0,897$, $P \geq 95\%$). Самому интенсивному развитию мучнистой росы способствовало обильное выпадение осадков в июне – на 10...167% больше среднеголетних значений. Среднесуточная температура воздуха не оказывала влияния на поражение тритикале возбудителем мучнистой росы ($r=0,140...0,232$).

Для установленной зависимости было составлено уравнение прямолинейной регрессии:

$$Y = 53,973 + 0,5562 \times X,$$

где Y – интенсивность развития возбудителя мучнистой росы, %; X – сумма осадков, выпавших за вторую декаду июня, мм.

С использованием этого уравнения можно прогнозировать развитие заболевания в посевах яровой тритикале в зависимости от количества выпавших осадков.

Выводы. В результате исследований выделены средневосприимчивые (P=30...40%) сорта яровой тритикале – Аморе, Саур, Праг 409, Дагво (Россия), Лана, Лотос (Беларусь), Згурівський, Оберіг харківський (Украина), 70 HN 458 (Канада), Je 57(США), Anoa5, МХ 51 (Мексика), Tleridal (Швейцария). Все остальные образцы в почвенно-климатических условиях региона характеризовались сильной восприимчивостью к воз-

будителям мучнистой росы, поэтому необходим поиск устойчивых генотипов и селекции культуры тритикале в регионе по данному направлению.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета института (учреждения, организации) – номер госзадания 0822–2014–0007; FWWR 2019–0020. 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. Захарченко В. А. Экономика оценки проявления микозов и угнетения эпифитотий стратегических культур // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 12. С. 95–98. doi: 10.24411/0235-2451-2020-11216.
2. Афанасенко О. С. Генетическая защита зерновых культур: итоги и перспективы // *Защита и карантин растений*. 2020. № 9. С. 3–7.
3. Virulence structure of the powdery mildew (*Blumeria graminis*) population occurring on triticale (*x Triticosecale*) in Poland / H. J. Czembor, O. Domeradzka, J. Czembor, et al. // *Journal of Phytopathology*. 2014. No. 162. P. 499–512. doi: 10.1111/jph.12225.
4. Bradshaw M., Tobin P. Sequencing herbarium specimens of a common detrimental plant disease (powdery mildew) // *Phytopathology*. 2020. Vol. 110. P. 1248–1254. doi: 10.1094/PHYTO-04-20-0139-PER.
5. Азбукина З. М. Возбудители болезней сельскохозяйственных растений Дальнего Востока. М.: Наука, 1980. 370 с.
6. Шешегова Т. К., Щеклеина Л. М. Фитопатогенная биота в условиях потепления климата (обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 3. С. 6–13. doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-006-013.
7. Димитриенко О. В. Мучнистая роса зерновых культур и меры борьбы с ней в Краснодарском крае // *Тенденции развития науки и образования*. 2022. № 90–4. С. 11–14. doi: 10.18411/trnio-10-2022-144.
8. Ретьмян С. В., Ключевич М. М. Заболевания листьев тритикале озимой в Полесье Украины // *Защита и карантин растений*. 2017. № 4. С. 24–26.
9. Ковтуненко В. Я., Панченко В. В., Калмыш А. П. Селекция тритикале с пшеничным типом зерна // *Зерновое хозяйство России*. 2016. № 1. С. 42–47.
10. Simultaneous transfer of leaf rust and powdery mildew resistance genes from hexaploid triticale cultivar Sorento into bread wheat / F. Li, Y. Li, C. Li-rong, et al. // *Frontiers in Plant Science*. 2018. No. 9. P. 85–98. doi: 10.3389/fpls.2018.00085.
11. Hybridization of powdery mildew strains gives rise to pathogens on novel agricultural crop species / F. Menardo, C. Praz, S. Wyder, et al. // *Nature Genetics*. 2016. No. 48. P. 201–205. doi: 10.1038/ng.3485.
12. Evaluation of resistance to powdery mildew in triticale seedlings and adult plants / V. Troch, K. Audenaert, A. Vanheule, et al. // *Plant Disease*. 2013. No. 97. P. 410–417. doi: 10.1094/PDIS-02-12-0161-RE.
13. Klocke B., Flath K., Miedaner T. Virulence phenotypes in powdery mildew (*Blumeria graminis*) populations and resistance genes in triticale (*x Triticosecale*) // *European Journal of Plant Pathology*. 2013. No. 137. P. 463–476. doi: 10.1007/s10658-013-0257-9.

14. Мамаева В. С., Еремин Д. И. Генетическая устойчивость зерновых культур к болезням – как фактор экологизации земледелия // *Эпохи науки*. 2022. № 30. С. 27–32. doi: 10.24412/2409-3203-2022-30-27-32.
15. Non-parent of origin expression of numerous effector genes indicates a role of gene regulation in host adaptation of the hybrid triticale powdery mildew pathogen / C. Praz, F. Menardo, M. D. Robinson, et al. // *Frontiers in Plant Science*. 2018. No. 9. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.00049/full> (дата обращения 28.12.2023). doi: 10.3389/fpls.2018.00049.
16. Лебедева Т. В., Брыкова А. Н., Зуев Е. В. Устойчивость к мучнистой росе скандинавских образцов яровой мягкой пшеницы из коллекции ВИР // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020. Т. 181. № 3. С. 146–154. doi: 10.30901/2227-8834-2020-3-146-154.
17. Новый сорт яровой мягкой пшеницы Анфея / Т. А. Асеева, К. В. Зенкина, И. В. Ломакина, и др. // *Зерновое хозяйство России*. 2019. № 4. С. 61–65. doi: 10.31367/2079-8725-2019-64-4-61-65.
18. Койшыбаев М., Муминджанов Х. Методические указания по мониторингу болезней, вредителей и сорных растений на посевах зерновых культур. Анкара: Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций, 2016. 42 с.

Поступила в редакцию 02.12.2023

После доработки 20.12.2023

Принята к публикации 09.01.2024

КОРМОВАЯ И СЕМЕННАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ СОРТОВ КОСТРЕЦА БЕЗОСТОГО СЕЛЕКЦИИ ОМСКОГО АГРАРНОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА

А. Н. Пузиков, О. А. Юсова, кандидаты сельскохозяйственных наук,
А. Х. Момонов, А. В. Дубинин

Омский аграрный научный центр,
646012, Омск, просп. Королева, 26
E-mail: puzikov@anc55.ru

Исследование проводили в 2019–2023 гг. в Омской области с целью оценки кормовой и семенной продуктивности сортов костреца безостого селекции Омского аграрного научного центра и выделения наиболее перспективных для дальнейшего использования в селекционной работе. Материалом служили сорта СибНИИСХоз-189 (стандарт), СибНИИСХоз-88, Титан, СибНИИСХоз-99, Эльбрус и Эффект. Летний посев выполняли в 2019, 2020 и 2021 гг., учет – соответственно в 2020–2021; 2021–2022 и 2022–2023 гг. В ходе экспериментов оценивали урожайность зеленой массы и абсолютно сухого вещества, семенную продуктивность, осуществляли биохимические анализы зеленой массы сортов для определения содержания массовой доли белка и клетчатки. В годы исследований в период вегетации температура воздуха превышала среднеиюлетнюю на 1,6...1,8 °С на фоне большого дефицита осадков. ГТК в 2020 г. был равен 0,60; в 2021 г. – 0,56; в 2022 г. – 1,02; в 2023 г. – 0,85, при оптимальной величине этого показателя 1,13. В среднем за 3 цикла исследований, достоверным превосхождением над стандартом по урожайности зеленой массы отличались сорта СибНИИСХоз-88 и СибНИИСХоз-99 (соответственно на 9,6 и 7,3 %); по сбору абсолютно сухого вещества – СибНИИСХоз-88, СибНИИСХоз-99, Титан и Эффект (на 7,8...11,1 %); по урожайности семян – СибНИИСХоз-99, Эльбрус, Эффект и Титан (на 16,5...22,8 %). Массовая доля белка в зеленой массе сорта Эффект в среднем за 3 цикла оценки была достоверно выше, чем у стандарта, на 0,8 %, при содержании клетчатки на одинаковом уровне.

FODDER AND SEED PRODUCTIVITY OF THE BONFIRE AWNLESS OF THE SELECTION OF OMSK AGRARIAN SCIENTIFIC CENTER

A. N. Puzikov, O. A. Yusova, A. Kh. Momonov, A. V. Dubinin

Omsk Agrarian Scientific Center,
644012, Omsk, prosp. Koroleva, 26
E-mail: puzikov@anc55.ru

The study was conducted in 2019–2023 in the Omsk region in order to assess the feed and seed productivity of varieties of bonfire awnless selected of the Omsk Agrarian Scientific Center and the selection of the most promising material from the studied material for further use in breeding work. The material was varieties SibNIISHoz-189 (standard), SibNIISHoz-88, Titan, SibNIISHoz-99, Elbrus and Effect. Three cycles were carried out: summer sowing in 2019, 2020 and 2021, accounting years, respectively, 2020–2021; 2021–2022 and 2022–2023. During the experiments, the yield of green mass and absolutely dry matter, seed productivity were evaluated, biochemical analyses of the green mass of varieties were carried out to determine the content of the mass fraction of protein and fiber. In all years of the research, during the growing season, increased air temperature was noted, exceeding the long-term average data by 1.6...1.8 °C and a large deficit of precipitation. The GTC values by year were: 2020–0.60; 2021–0.56; 2022–1.02; 2023–0.85, with the optimal –1.13. On average, over 3 cycles of research, a significant excess over the standard was characterized by: in terms of green mass yield – varieties SibNIISKhoz-88 and SibNIISKhoz-99 (9.6 and 7.3 % of st.); in terms of absolutely dry matter yield – SibNIISKhoz-88, SibNIISKhoz-99, Titan and Effect (7.8...11.1 % to st.); in terms of seed yield – SibNIISKhoz-99, Elbrus, Effect and Titan (16.5...22.8 % to st.). The mass fraction of protein in the green mass of the Effect variety, on average, over 3 evaluation cycles significantly exceeded the standard by 0.8 %, while the fiber content was at the standard level.

Ключевые слова: кострец безостый (*Bromus inermis* Leyss.), сорт, урожайность, зеленая масса, сухое вещество, семена, белок, клетчатка.

Key words: bonfire awnless (*Bromus inermis* Leyss.), variety, productivity, green mass, dry matter, seeds, protein, fiber.

Кострец безостый (*Bromus inermis* Leyss.) – наиболее распространенная в Сибири многолетняя злаковая кормовая культура, хорошо отрастающая после скашивания. Среди злаков он выделяется высокими кормовыми качествами (питательностью, переваримостью и поедаемостью). Кострец безостый пригоден для кормления всех видов животных в виде зеленой массы, сена, сенажа и обезвоженного корма. При выращивании этой культуры накапливается большое количество растительных остатков, что способствует повышению плодородия почвы. Благодаря долголетию костреца безостого сокращаются затраты на закладку ежегодных посевов [1, 2].

Кострец безостый обладает большой способностью к вегетативному размножению, благодаря чему со-

храняется в травостое при сенокосном использовании 8...10 лет, а при пастбищном – 6...7 лет. Наибольшие урожайность и продуктивное долголетие (до 20 лет и более) достигаются при одноукосном использовании (в фазе цветения); самый высокий сбор переваримых питательных веществ – при двух- и трехукосном (первый укос не позднее выметывания) [3, 4]. Ряд исследователей пришли к заключению, что продуктивность костреца снижается по мере увеличения возраста травостоя [5, 6, 7].

Несмотря на создание большого количества новых сортов, актуальной остается задача повышения кормовой и семенной продуктивности костреца безостого [8]. Особенно обостряется эта проблема в связи с измене-

нием климата, плодородием почв, распространением и появлением новых болезней и вредителей. Основные недостатки существующих сортов – недостаточная устойчивость к неблагоприятным условиям внешней среды [9, 10].

Для решения такой задачи очень важно изучить имеющиеся сорта, созданные в разные годы и различными методами, для выделения наиболее ценных источников и доноров важных селекционных признаков и свойств, особенно кормовой продуктивности и экологической устойчивости сортов.

Цель исследования – оценка кормовой и семенной продуктивности сортов кострца безостого селекции Омского аграрного научного центра и выделение наиболее перспективного материала для дальнейшего использования в селекционной работе.

Методика. Объектами исследований служили сорта кострца безостого селекции ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», включенные в Государственный реестр селекционных достижений (Госреестр), допущенные к использованию по Западно-Сибирскому региону – СибНИИСХоз-189, СибНИИСХоз-88, Титан, СибНИИСХоз-99, Эльбрус и Эффект [11, 12].

Исследования выполняли в 2019–2023 гг. на опытных полях Омского аграрного научного центра в питомнике конкурсного сортоиспытания лаборатории селекции многолетних трав, лаборатории иммунитета, лаборатории биохимии и физиологии растений. Закладку опытов, наблюдения, учет и оценки проводили по Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Посев проводили летом 2019, 2020 и 2021 гг., учеты – соответственно в 2020–2021 гг., 2021–2022 гг. и 2022–2023 гг.

Почва опытного участка типичная для зоны южной лесостепи Омской области – среднесиловая тяжелосуглинистая лугово-черноземная со следующими агрохимическими характеристиками: содержание гумуса (по Тюрину) – 6,72...6,81%, подвижного фосфора и калия (по Чирикову) – 100...119 мг/кг и 245...315 мг/кг почвы соответственно, нитратного азота (по Кочергину) – 5,5 мг/кг, сумма поглощенных оснований – 31,90 мг экв./100 г почвы, рН_{KCl} почвенного раствора – 6,5...6,8 ед. В составе катионов преобладает кальций (89,1%), на магний приходится 11,0% от общей емкости поглощения, на натрий – менее 1% [13].

Основная обработка почвы – отвальная зябь. С целью выравнивания поверхности проводили осеннюю культивацию, весной – боронование в два следа, предпосевную культивацию, прикатывание (до и после посева), посев (первая декада июля). Площадь учетной делянки 25 м², повторность – 8-и кратная (4 – на зеленую массу, 4 – на семена). Способ посева для учета кормовой продуктивности – рядовой (15 см), на семена – широкорядный (70 см).

В питомниках конкурсного сортоиспытания отмечали следующие фенологические фазы: всходы, отрастание (весной и после укосов), колошение, цветение и созревание. Перед скашиванием на зеленый корм и семена измеряли высоту травостоя.

Общее развитие, зимостойкость (по плотности травостоя осенью и весной), засухоустойчивость (в период максимального проявления засухи), устойчивость к болезням и вредителям, содержание белка и клетчатки в кормовой массе оценивали на естественном фоне. Количество клетчатки в зеленой массе определяли по ГОСТ 31675-2012, белка в зеленой массе и семенах кострца – на автоматическом анализаторе «Kjeltek Auto 1030 Analyzer» [14].

Уборку кострца на зеленую массу осуществляли в фазе начала колошения, на семена – в фазе полной

спелости (первая декада августа). Урожайность зеленой массы учитывали прямым взвешиванием с каждой делянки, после чего отбирали пробный сноп массой 1 кг для определения выхода сена и обливенности. Сбор семян учитывали после подработки на семяочистительной машине СМ-0,15. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили методом дисперсионного анализа по Б. А. Доспехову.

Метеоусловия (по данным ФГБУ «Обь-Иртышская УГМС») не значительно менялись в годы исследований, но существенно отличались от среднесуточных данных. Так, в 2020 г. они были в целом засушливыми. Период вегетации (май–август) был теплее обычного на 1,8 °С (18,5 °С), в том числе май – на 4,9 °С. Во второй половине вегетации установилась жаркая (19,3...21,1 °С) и засушливая (ГТК = 0,20...0,89) погода. В мае 2021 г. среднесуточная температура воздуха была выше климатической нормы на 4,3 °С. Осадков выпало всего 43% от среднесуточного количества. Средняя температура воздуха в июне оказалась на 1,1 °С ниже среднесуточной, сумма осадков составляла 81% от нормы. В июле среднесуточная температура воздуха превышала среднесуточную на 1,0 °С, в августе – на 2,1 °С, сумма осадков составляла соответственно 50% и 75% от нормы. Период вегетации 2022 г. был теплее обычного на 1,7 °С. В мае среднесуточная температура воздуха была выше нормы на 4,2 °С, в июле – на 0,9 °С, в августе – на 1,8 °С, сумма осадков составляла соответственно 86%, 202% и 56% от среднесуточной. Погодные условия вегетации 2023 г. были засушливыми. В мае температура воздуха превышала среднесуточную на 2,0 °С, в июне – на 0,6 °С, в июле – на 3,0 °С, в августе – на 0,7 °С. Недобор осадков составлял 6,0...9,8 мм (табл. 1).

Табл. 1. Среднесуточная температура воздуха и сумма осадков периодов вегетации кострца безостого

Месяц	Температура воздуха, °С				Сумма осадков, мм					
	средне-много-летнее	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	средне-много-летнее	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Май	13,0	17,9	17,3	17,2	15,0	33,0	22,1	13,3	30,2	26,7
Июнь	17,9	16,1	16,8	17,9	18,5	54,0	43,0	36,7	56,0	48,0
Июль	19,6	20,7	20,6	20,5	22,6	71,0	13,0	32,8	121,2	64,7
Август	16,4	19,3	18,5	18,2	17,1	55,0	53,3	41,8	31,4	45,2
Май – август	16,7	18,5	18,3	18,4	18,3	213,0	131,4	124,6	238,8	184,6

В целом метеоусловия периода вегетации в годы проведения исследований (2020–2023 гг.) из-за засухи были не вполне благоприятными для роста и развития кострца безостого. В 2020 г. ГТК находился на уровне 0,60, в 2021 г. – 0,56, в 2022 г. – 1,02 и в 2023 г. – 0,85, при оптимальной величине этого показателя в условиях Омска – 1,13.

Результаты и обсуждение. В условиях южной лесостепи Западной Сибири (г. Омск) урожайность зеленой массы изучаемых сортов кострца безостого в среднем за три цикла возделывания составила 302,4 ц/га, сухого вещества – 86,88 ц/га, семян – 2,94 ц/га (табл. 2). Все изучаемые сорта по величинам этих показателей превосходили стандарт СибНИИСХоз-189.

В среднем за три цикла увеличение сбора зеленой массы варьировало от 4,2% у сорта Эльбрус до 9,6% у сорта СибНИИСХоз-88. Кроме сорта СибНИИСХоз-88 достоверную прибавку (7,3%) сформировал сорт СибНИИСХоз-99. По урожайности сухого вещества существенно превосходили стандарт сорта СибНИИСХоз-88 (11,1%), СибНИИСХоз-99 (10,9%), Титан (7,9%) и Эффект (7,8%). По сбору семян наи-

Табл. 2. Урожайность зеленой массы, сухого вещества и семян сортов коостреца в среднем по трем закладкам (2020–2023 гг.), ц/га

Сорт	1 год	2 год	Среднее за 3 цикла
	пользования	пользования	
Зеленая масса			
СибНИИСХоз-189, st.	262,3	312,9	287,6
СибНИИСХоз-88	306,0	324,2	315,1
Титан	289,4	314,9	302,2
СибНИИСХоз-99	278,6	338,4	308,5
Эльбрус	285,8	313,9	299,8
Эффект	282,5	320,4	301,4
Среднее	284,1	320,8	302,4
НСР ₀₅	10,9	12,5	16,0
Сухое вещество			
СибНИИСХоз-189, st.	72,13	89,90	81,02
СибНИИСХоз-88	84,70	95,37	90,04
Титан	82,17	92,63	87,40
СибНИИСХоз-99	79,53	100,23	89,88
Эльбрус	79,37	91,70	85,54
Эффект	80,57	94,17	87,37
Среднее	79,74	94,00	86,88
НСР ₀₅	6,05	6,65	6,20
Семена			
СибНИИСХоз-89, st.	2,07	3,03	2,55
СибНИИСХоз-88	2,22	3,43	2,83
Титан	2,41	3,53	2,97
СибНИИСХоз-99	2,66	3,59	3,13
Эльбрус	2,67	3,52	3,10
Эффект	2,31	3,83	3,07
Среднее	2,39	3,49	2,94
НСР ₀₅	0,50	0,29	0,41

большим превышением над стандартом отличался сорт СибНИИСХоз-99 – 22,8%, меньшее, но также достоверное превосходство отмечено у сортов Эльбрус (21,6%), Эффект (20,4%) и Титан (16,5%).

Урожайность зеленой массы на второй год пользования травостоем (320,8 ц/га) была в среднем по всем сортам выше на 36,7 ц/га, по урожайности сухого вещества и семян также отмечено превышение второго года пользования над первым. Результаты наших исследований совпадают с литературными данными о том, что в первый год пользования происходит быстрый рост корневой системы и слабый – надземной массы. Интенсивный рост кормовой массы начинается со второго года [5].

Обеспечение животноводческой отрасли высококачественными кормами в достаточном количестве – крайне актуально на сегодняшний день. В этом аспекте большое значение имеют как урожайность, так и питательность кормов. Наиболее питательными считают корма с высоким содержанием белковой массы и пониженным – клетчатки. Согласно результатам наших исследований, на содержание белка (89,2%) и клетчатки (90,3%) в зеленой массе коостреца безостого основное влияние оказывали условия года (фактор А). Доля генотипа (фактор В) в общей фенотипической изменчивости анализируемых показателей была незначительной – 5,9 и 3,3% соответственно (табл. 3).

Табл. 3. Доля факторов в изменчивости основных показателей качества зеленой массы коостреца безостого в среднем по трем закладкам и двум годам пользования

Источник варьирования	Массовая доля белка, %	Массовая доля клетчатки, %
Влияние года (фактор А)	89,2	90,3
Влияние генотипа (фактор В)	5,9	3,3
Взаимодействие (А × В)	1,0	3,3
Влияние случайных факторов	3,9	3,1

Среднее по трем закладкам содержание белка (табл. 4) в кормовой массе коостреца второго года

Табл. 4. Содержание белка и клетчатки в абсолютно сухом веществе кормовой массы коостреца, среднее по трем закладкам (2020–2023 гг.)

Сорт, линия	Содержание в абсолютно сухом веществе, %					
	1 год		2 год		среднее за 3 цикла	
	белок	клетчатка	белок	клетчатка	белок	клетчатка
СибНИИСХоз-189, st.	13,5	29,8	15,7	30,7	14,6	30,2
СибНИИСХоз-88	11,8	31,8	13,9	34,4	12,8	33,1
Титан	14,1	30,3	14,4	31,6	14,2	31,0
СибНИИСХоз-99	12,3	32,2	14,9	32,5	13,6	32,3
Эльбрус	13,6	30,5	16,0	28,6	14,8	29,6
Эффект	15,1	26,1	15,7	33,0	15,4	29,6
Среднее	13,5	30,1	15,1	31,8	14,2	31,0
CV, %	8,2	6,6	5,1	5,8	5,9	4,4
НСР ₀₅	0,8	1,3	0,9	1,4	0,7	1,2

пользования составляло 15,1% (от 13,9 до 16,0%), что на 1,6% больше, чем в первый год пользования – 13,5% (от 11,8 до 15,1%).

Изменчивость исследуемых показателей качества был незначительной как в первый, так и во второй год пользования (CV < 10%). В среднем за 3 цикла оценки достоверное превышение стандарта по массовой доле белка на 0,8% отмечено у сорта Эффект, при содержании клетчатки на уровне стандарта.

Выводы. В результате проведенной оценки сортов коостреца безостого для практического использования в селекционной работе в качестве исходного материала по признаку урожайность зеленой массы и абсолютно сухого вещества выделен сорт СибНИИСХоз-88 (+9,6 и +11,1% к st.); по урожайности семян – сорт СибНИИСХоз-99 (+22,8% к st.), по массовой доле белка в зеленой массе – сорт Эффект (+0,8% к st.).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств федерального бюджета РФ. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Кашевара Н. И., Тюрюков А. Г., Осипова Г. М. Урожайность коостреца безостого в разных природно-климатических зонах Сибири // *Достижения науки и техники АПК*. 2015. Т. 29. № 11. С. 81–83.
2. *Кормовые экосистемы Центрального Черноземья России: агроландшафтные и технологические основы / под ред. В. М. Косолапова, И.А. Трофимова. М.: ФГУП Издательский дом «Типография» Россельхозакадемии. 2016. С. 183–184.*
3. Косолапов В. М., Костенко С. И., Пилипко С. В. Направления и задачи селекции кормовых трав в России // *Достижения науки и техники АПК*. 2018. Т. 32. №2. С. 21–24. doi: 10/24411/0235-2451-2018-10205.
4. Дмитриев В. И., Костомаров В. Н., Храмов С. Ю. *Актуальные вопросы развития кормопроизводства в Западной Сибири // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2019. № 2(34). С. 24–29.*
5. Тормозин М. А., Беляев А. В., Тихолаз Е. М. Влияние возраста травостоя на семенную продуктивность

- костреца безостого // *Аграрный вестник Урала*. 2018. № 6 (173). С. 59–63.
6. Феоктистова Н. А. Влияние возраста травостоя на урожайность зеленой массы костреца безостого (*Bromopsis Inermis*) в Тюменской области // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019. Т. 180. № 2. С. 30–37. doi: 10.30901/2227-8834-2019-2-30-37.
7. Казарина А.В., Абраменко И.С. Особенности формирования семенной продуктивности костреца безостого (*Bromopsis inermis* Leyss.) в природно-климатических условиях лесостепи Среднего Поволжья // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 10. С. 54–59.
8. Еряшев А.П., Табункова А.А. Изменение продуктивности костреца безостого от применения различных агрохимикатов // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. № 2 (58). С. 32–37.
9. Шепелев В. В., Юсова О. А., Момонов А. Х. Оценка качества, продуктивность семян и зеленой массы сортов костреца безостого омской селекции // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2020. №10 (192). С. 35–42.
10. Юсова О. А. Новые источники повышенного качества зеленой массы многолетних трав в условиях южной лесостепи Западной Сибири // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2018. Т. 179. Вып. 4. С. 39–50. doi: 10.30901/2227-8834-2018-4-39-49.
11. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т.1. «Сорта растений» (официальное издание). М.: ФГБНУ «Росинформгротех». 2021. 719 с.
12. Юсова О. А., Пузиков А. Н., Момонов А. Х. Новый перспективный сорт костреца безостого Эффект // *Земледелие*. 2022. №5. С. 32–34.
13. Бобренко И. А., Аксенова Ю. В. Модели плодородия пахотных почв Омской области // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 5. С. 9–14. doi: 10/24411/0235-2451-2021-10501.
14. Плешков Б. В. Практикум по биохимии растений. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 255 с.

Поступила в редакцию 21.11.2023

После доработки 29.12.2023

Принята к публикации 13.01.2024

Агрочоведение и агроэкология

УДК 631.465:631.445.25

DOI: 10.31857/S2500262724010079, EDN: CTPNNC

**ОСОБЕННОСТИ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВ В АГРОЛАНДШАФТАХ
ВЛАДИМИРСКОГО ОПОЛЬЯ****М. К. Зинченко**, кандидат биологических наук,
С. И. Зинченко, доктор сельскохозяйственных наук*Верхневолжский федеральный аграрный научный центр,
601261, Владимирская обл., Суздальский р-н, пос. Новый, ул. Центральная, 3
E-mail: zinchenkosergei@mail.ru*

Исследования проводили с целью изучения ферментативной активности серой лесной почвы (СЛ) и серой лесной почвы со вторым гумусовым горизонтом (СЛ ВГГ) в зависимости от систем удобрений в агроландшафтах во Владимирской области. Работу выполняли в 2021–2023 гг. в стационарном полевом опыте на двух почвенных разностях. Изучали следующие фоны интенсификации применения удобрений (за ротацию 6-польного севооборота): нулевой (Н) – навоз 40 т/га; интенсивный (И) – навоз 40 т/га + $N_{100}P_{80}K_{160}$; интенсивный минеральный (ИМ) – $N_{350}P_{220}K_{390}$; высокоинтенсивный минеральный (ВИМ) – $N_{480}P_{280}K_{575}$; интенсивный органоминеральный (ИОМ) – $N_{310}P_{150}K_{310}$ + навоз 60 т/га; высокоинтенсивный органоминеральный (ВИОМ) – $N_{430}P_{160}K_{360}$ + навоз 80 т/га. На изучаемых фонах применения удобрений в СЛ ВГГ выявлен устойчивый тренд повышения активности каталазы и инвертазы. Средняя активность каталазы в почве второго гумусового горизонта была на 23 % выше, чем в СЛ, на той же глубине (20...40 см). Максимальная в эксперименте активность каталазы отмечена на интенсивном фоне (И) в СЛ ВГГ: слой 0...20 см – 2,41 мл O₂/г; 20...40 см – 1,96 мл O₂/г. Инвертазная активность в почве со вторым гумусовым горизонтом на глубине 20...40 см в среднем на 30 % выше, чем в серой лесной почве. Самая высокая величина этого показателя отмечена в почве двух почвенных разностей на интенсивном фоне в слое 0...20 см – 3,50...3,55 мг глюкозы/г за 40 ч. Среднее содержание гумуса во втором гумусовом горизонте СЛ ВГГ находилось на уровне 3,76 %, что на 33 % выше, чем в СЛ в слое 20...40 см. Максимальная в эксперименте (слой 0...40 см) величина этого показателя отмечена в СЛ ВГГ на интенсивном фоне применения удобрений – 4,86 %.

**FEATURES OF ENZYMATIC ACTIVITY OF SOILS IN AGRICULTURAL LANDSCAPES OF THE
VLADIMIR HIGH PLAINS****M. K. Zinchenko, S. I. Zinchenko***Upper Volga Federal Agrarian Scientific Center
601261, Vladimirskaya obl., Suzdal'skii r-n, pos. Novyi, ul. Tsentral'naya, 3
E-mail: zinchenkosergei@mail.ru*

The research aimed to study the enzymatic activity of grey forest soil (GF) and grey forest soil with a second humic horizon (GF SHH) depending on fertilizer systems in agricultural landscapes in the Vladimir region. The work was carried out in 2021–2023 in a stationary field experiment on two soil varieties. The following backgrounds for intensifying the use of fertilizers were studied (for rotation of a 6-field crop rotation): zero (Z) – manure 40 t/ha; intensive (I) – manure 40 t/ha + $N_{100}P_{80}K_{160}$; intense mineral (IM) – $N_{350}P_{220}K_{390}$; high-intensity mineral (HIM) – $N_{480}P_{280}K_{575}$; intensive organomineral (IOM) – $N_{310}P_{150}K_{310}$ + manure 60 t/ha; high-intensity organomineral (VIOM) – $N_{430}P_{160}K_{360}$ + manure 80 t/ha. Against the studied backgrounds of fertilizer use in the GF SHH, a stable trend of increasing the activity of catalase and invertase was revealed. The average activity of catalase in the soil of the second humus horizon was 23 % higher than in the GF, at the same depth (20–40 cm). The maximum catalase activity in the experiment was observed against an intense background (I) in the GF SHH: layer 0–20 cm – 2.41 ml O₂/g; 20–40 cm – 1.96 ml O₂/g. Invertase activity in soil with a second humus horizon at a depth of 20–40 cm is on average 30 % higher than in grey forest soil. The highest value of this indicator was observed in the soil of two soil phases against an intense background in the 0–20 cm layer – 3.50–3.55 mg of glucose/g in 40 hours. The average humus content in the second humus horizon GF SHH was at level 3.76 %, which was 33 % higher than in GF in a layer of 20–40 cm. The maximum value of this indicator in the experiment (layer 0–40 cm) was observed in GF SHH against the intensive background of fertilizer use – 4.86 %.

Ключевые слова: ферментативная активность каталазы и инвертазы, почвенные разности, серая лесная почва, второй гумусовый горизонт.

Key words: enzymatic activity of catalase and invertase, soil varieties, grey forest soil, second humic horizon.

Среди различных биологических критериев оценки экологического состояния почв наиболее чувствительным показателем выступает активность почвенных ферментов [1, 2]. Биологическая активность почвы обусловлена суммарным содержанием в почве определенного запаса ферментов, как выделенных в процессе жизнедеятельности растений и микроорганизмов, так и аккумулированных почвой после разрушения отмерших клеток микроорганизмов. Плодородие почвы тесно

связано с ферментативной активностью, которая может существенно изменяться в зависимости от вида возделываемой культуры, способа обработки почвы и степени ее удобренности [3, 4]. Гидролитические ферменты (инвертаза, уреазы, фосфатаза и др.) определяют интенсивность мобилизационных процессов в почве, в то время как окислительно-восстановительные (каталаза, полифенолоксидаза, пероксидаза и др.) участвуют в синтезе и распаде гумусовых веществ. Процессы мобилизации

органических веществ, связанные с высвобождением доступных форм азота, фосфора и других элементов, представляют большой интерес с точки зрения оценки плодородия почвы и экологической устойчивости агроландшафтов.

Основными структурообразующими агрокомпонентами почвенного покрова Владимирского Ополя выступают серые лесные (обычные, остаточно-карбонатные, со вторым гумусовым горизонтом), а также серые лесные глееватые и эродированные почвы [5]. Они интересны отчетливо выраженной разницей физико-химических свойств отдельных горизонтов почвенного профиля, что отражается в особенностях структуры, строения порового пространства, содержания органического углерода, теплоемкости, теплопроводности и других свойств. Изменение водного, воздушного и питательного режимов почвенных разностей, которое особенно резко происходит в почвах агроэкосистем, существенным образом сказывается на их биологической активности, которую определяет интенсивность микробиологических и биохимических процессов. Однако особенности функционирования микробиоты и ее ферментативной активности в различных комплексах серых лесных почв пашни до сих пор не получили всесторонней оценки. Это лишает практиков возможности применения биологически и экологически обоснованных приемов регулирования плодородия почвы.

Цель исследования – оценить особенности ферментативной активности почвенных разностей (серой лесной почвы и серой лесной со вторым гумусовым горизонтом) в зависимости от фона интенсификации применения удобрений.

Методика. Работу выполняли в 2021–2023 гг. в стационарном многофакторном полевом опыте по изучению и усовершенствованию адаптивно-ландшафтных систем земледелия в зоне Владимирского Ополя, заложенном в 1996 г. в отделе земледелия Владимирского научно-исследовательского института сельского хозяйства.

На территории стационарного опыта площадью около 3 га сотрудники РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева под руководством академика В. И. Киришина в 1996 г. провели крупномасштабную почвенную съемку. Почвенный покров опытного участка характеризовался высокой неоднородностью. На его площади было выделено 8 почвенных разностей. Более 40 % площади участка занимали типичные серые лесные почвы (СЛ) без видимых признаков оподзоленности в профиле. На типичные для Владимирской области серые лесные почвы со вторым гумусовым горизонтом (СЛ ВГГ) приходилось 20,8 % [6]. Так как серые лесные почвы со вторым гумусовым горизонтом обладают более высоким уровнем почвенного плодородия и выступают компонентом агроландшафтов, то представляет интерес детальное изучение их ферментативной активности в условиях длительного применения различных систем удобрения сельскохозяйственных культур.

Схема опыта включает четыре уровня интенсивности применения минеральных и органоминеральных систем удобрений, рассчитанных на достижение планируемой продуктивности возделываемых культур: нулевой (Н) – навоз 40 т/га; интенсивный (И) – навоз 40 т/га + $N_{100}P_{80}K_{160}$; интенсивный минеральный (ИМ) – $N_{350}P_{220}K_{390}$; высокоинтенсивный минеральный (ВИМ) – $N_{480}P_{280}K_{575}$; интенсивный органоминеральный (ИОМ) – $N_{310}P_{150}K_{310}$ + навоз 60 т/га; высокоинтенсивный органоминеральный (ВИОМ) – $N_{430}P_{160}K_{360}$ + навоз 80 т/га. Во всех вариантах общим фоном проводили еже-

годную плоскорезную обработку на глубину 10...12 см.

С учетом почвенной карты опытного участка микробиологические исследования осуществляли на двух почвенных разностях – серой лесной почве (СЛ) и серой лесной среднеподзоленной почве со вторым гумусовым горизонтом (СЛ ВГГ). Образцы почвы для ферментативного анализа отбирали по вариантам опыта из слоев 0...20 и 20...40 см во второй декаде мая (после внесения азотных удобрений и посева), июля и сентября.

В почвенных образцах учитывали активность следующих ферментов [7]: каталазы – газометрическим методом А. Ш. Галстяна; инвертазы – титриметрическим методом И. Н. Ремейко, С. М. Малиновской; полифенолоксидазы (ПФО) и пероксидазы (ПД) – методом К. А. Козлова. Коэффициент гумусонакопления рассчитывали по активности ПФО и ПД по формуле $K_g = (ПФО/ПД)$ [8]. Содержание гумуса определяли методом И. В. Тюрина.

Статистическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа с вычислением значений средних, отклонения от среднего, коэффициента вариации, НСР и использованием критерия Фишера для оценки существенности разности между средними.

Результаты и обсуждение. В основе синтеза гумусовых компонентов почвы лежат окислительно-восстановительные процессы, в которых участвуют ферменты класса оксиредуктаз. Каталаза – это фермент, по активности которого судят о насыщенности почвы микроорганизмами при катализе реакции разложения перекиси водорода, как продукта их жизнедеятельности. Высокая активность этого фермента служит свидетельством напряженности энергетических процессов в почве, отражая уровень плодородия и характеризуя процессы биогенеза гумуса. Диапазон активности фермента в слое 0...20 см определялся значениями от 1,81 до 2,41 мл O_2 /г почвы, в слое 20...40 см – от 0,91 до 1,96 (табл. 1). Максимальная в эксперименте активность каталазы отмечена на интенсивном фоне (И) в СЛ ВГГ: в слое 0...20 см – 2,41 O_2 /г почвы; в слое 20...40 см – 1,96 мл O_2 /г почвы. В среднем активность каталазы в СЛ ВГГ была выше на всех фонах интенсификации. В слое почвы 0...40 см на интенсивном фоне разница составляла 13 %.

Табл. 1. Активность каталазы в почвенных разностях серой лесной почвы агроландшафтов в зависимости от фона интенсификации применения удобрений (среднее за 2021–2023 гг.), мл O_2 /г почвы в минуту

Фон интенсификации применения удобрений	Слой почвы, см	СЛ	СЛ ВГГ
Н	0...20	2,0±0,51	1,87±0,52
	20...40	1,28±0,51	1,74±0,79
И	0...20	2,22±0,25	2,41±0,39
	20...40	1,43±0,29	1,96±0,61
ИМ	0...20	2,02±0,21	2,34±0,24
	20...40	1,47±0,12	1,47±0,46
ВИМ	0...20	1,99±0,55	2,33±0,36
	20...40	1,35±0,25	1,64±0,19
ИОМ	0...20	1,99±0,15	2,08±0,21
	20...40	1,32±0,37	1,61±0,13
ВИОМ	0...20	1,84±0,16	1,81±0,36
	20...40	0,91±0,24	1,55±0,28
Среднее по почвенной разности	0...20	2,00	2,14
	20...40	1,41	1,74

Локализация фермента в почве интенсивного фона обусловлена значительным микробным пулом и метаболической активностью различных эколого-трофических групп микрофлоры. Многолетнее использование средних доз минеральных удобрений и 40 т/га навоза обусловило благоприятные условия для развития микро-

биоты почвы. На остальных фонах интенсификации статистически достоверных различий не обнаружено, но в течение 3-х лет сохранялся тренд повышения активности каталазы в СЛ ВГГ.

Второй гумусовый горизонт в почве опытного участка был отмечен в основном на глубине 20...40 см, имел различную мощность и протяженность. Он характеризовался повышенной активностью каталазы на всех фонах интенсификации (рис. 1). Средняя величина этого показателя для СЛ ВГГ была на 23% выше, чем для СЛ на той же глубине.

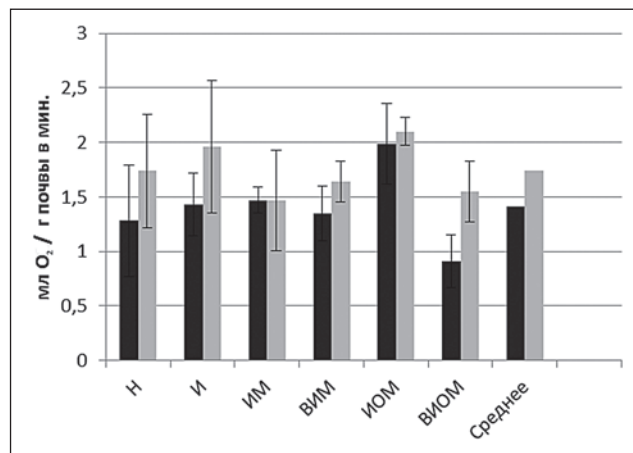


Рис. 1. Катазная активность почвенных разностей агроландшафтов в слое 20...40 см в зависимости от фона интенсификации применения удобрений (среднее за 2021–2023 гг.): ■ – СЛ, ■ – СЛ ВГГ.

Активность фермента ко времени репродуктивного периода развития сельскохозяйственных культур возрастала на обеих почвенных разностях. Это подтверждают и результаты исследований предыдущих лет [9]. На всех фонах интенсификации катазная активность была выше в июле (табл. 2) и в профиле серой лесной почвы со вторым гумусовым горизонтом, по сравнению с серой лесной почвой.

Табл. 2. Сезонная динамика активности каталазы в слое почвы 0...20 см в зависимости от почвенной разности и фона интенсификации применения удобрений (2022 г.), мл O₂/г почвы в мин.

Фон	СЛ			СЛ ВГГ		
	май	июль	сентябрь	май	июль	сентябрь
Н	1,37	1,73	1,77	1,40	1,70	1,77
И	1,97	2,17	1,80	2,17	2,57	1,93
ИМ	2,0	2,00	1,73	2,33	2,70	2,03
ВИМ	2,17	2,27	1,63	2,27	2,61	1,93
ИОМ	1,97	2,30	1,47	2,23	2,43	1,53
ВИОМ	2,13	2,40	1,53	2,33	2,40	1,90
X ₃ ± S(X)	1,94±0,29	2,18±0,23	1,66±0,13	2,12±0,36	2,40±0,36	1,85±0,18

Активность инвертазы определяется уровнем содержания органического вещества в почве, в частности, легкогидролизуемых углеводов, которые служат энергетическим материалом для многих почвенных гетеротрофов. Инвертаза, участвуя в расщеплении дисахаридов, играет важную роль в формировании предгумусовой фракции из разлагающейся растительной и микробной биомассы [9]. Показатель ее активности используют в оценке плодородия почв и при диагностике постагрогенных изменений экологического характера [10].

Наибольшая в эксперименте активность фермента в почвенных разностях отмечена в слое 0...20 см. В серой лесной почве средняя величина этого показателя состав-

ляла 3,16 мг глюкозы/г почвы за 40 ч, в серой лесной со вторым гумусовым горизонтом – 3,27 мг глюкозы/г почвы за 40 ч. Статистически достоверные различия в активности фермента между почвенными разностями отмечены в слое 20...40 см – 1,9 и 2,47 мг глюкозы/г почвы за 40 ч соответственно. Инвертазная активность второго гумусового горизонта была в среднем на 30% выше, чем в серой лесной почве на глубине 20...40 см (рис. 2).

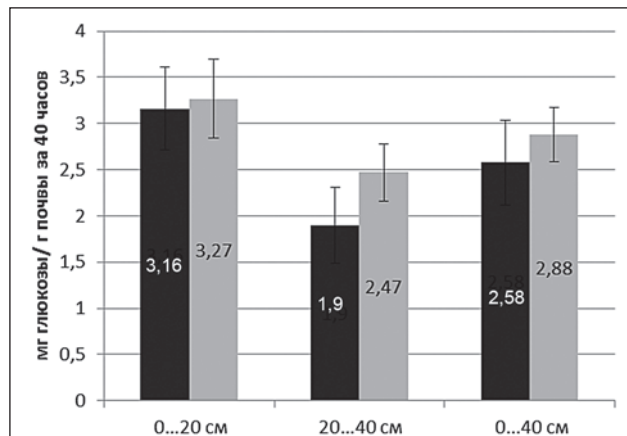


Рис. 2. Активность инвертазы в разностях серой лесной почвы (среднее за 2021–2023 гг.): ■ – СЛ, ■ – СЛ ВГГ.

Самая высокая активность инвертазы отмечена при использовании средних доз минеральных удобрений и 40 т/га навоза за ротацию 6-польного севооборота в слое 0...20 см – 3,50...3,55 мг глюкозы/г почвы за 40 ч. В слое 0...40 см на этом фоне она так же была повышенной (рис. 3).

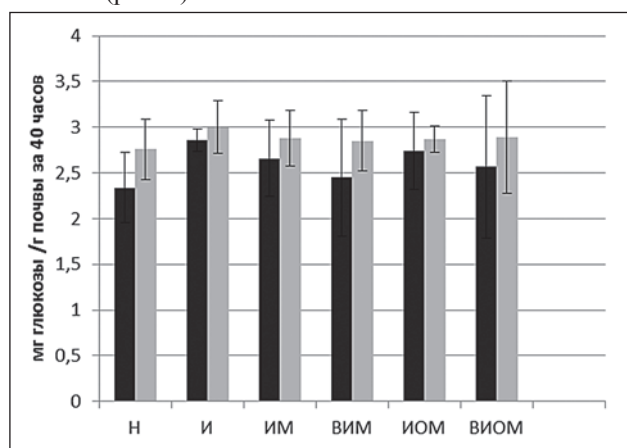


Рис. 3. Активность инвертазы в разностях серой лесной почвы в слое 0...40 см в зависимости от фона интенсификации применения удобрений (среднее за 2021–2023 гг.): ■ – СЛ, ■ – СЛ ВГГ.

Рассчитанные коэффициенты гумусонакопления (Кг) были меньше 1, то есть окислительно-восстановительные процессы в почве агрофонов ориентированы на минерализацию гумусовых веществ (рис. 4). Минимальные величины этого показателя отмечены в серой лесной почве на высокоинтенсивном минеральном фоне. Следовательно, трансформация органического вещества почвы, обусловленная активностью пероксидазы и полифенолоксидазы, активно смещалась к интенсивной минерализации гумуса, что отмечено в других исследованиях [11]. Аналогичная тенденция на этом фоне проявлялась и в СЛ ВГГ при более высоких значениях Кг – 0,47. То есть использование минеральной системы удобрений может провоцировать биохимические процессы, снижающие гумусонакопление в агроландшафтах серой лесной почвы.

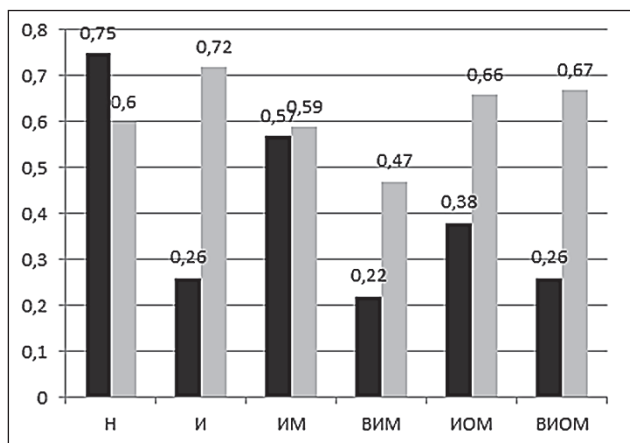


Рис. 4. Коэффициенты гумусонакопления в слое 0...40 см в зависимости от фонов интенсификации и почвенных разностей (среднее за 2021–2022 гг.): ■ – СЛ, ■ – СЛ ВГГ.

Коэффициенты гумусонакопления на органоминеральных фонах, преимущественно в СЛ ВГГ, достигали 0,66...0,72 ед. (см. рис. 4). Вероятно, при использовании комплекса органических и минеральных удобрений формируется биохимический потенциал, направленный на снижение активной минерализации составляющих высокомолекулярных гумусовых соединений, что определяет повышенный уровень ее экологической устойчивости. В целом, судя по величинам Кг, применение навоза в дозах 40, 60 и 80 т/га снижало процессы активной минерализации компонентов гумуса, по сравнению с использованием одних минеральных удобрений.

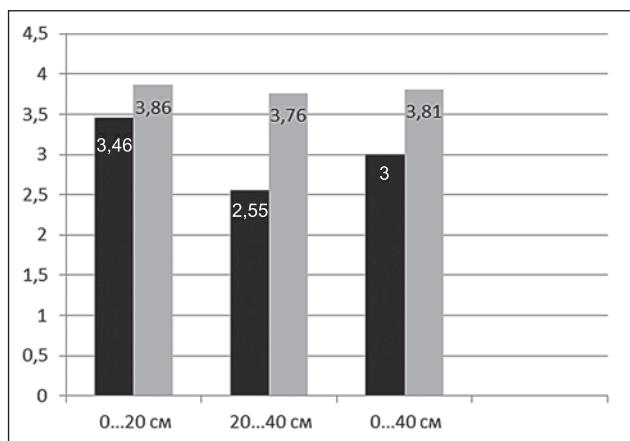


Рис. 5. Содержание гумуса в почвенных разностях серой лесной почвы (2022 г.): ■ – СЛ, ■ – СЛ ВГГ.

Содержание гумуса и запасы органического вещества – наиболее важные показатели плодородия и экологической устойчивости почв. Преимущество в накоплении гумуса имели СЛ ВГГ (рис. 5). Особенно в этом отношении выделялся второй гумусовый горизонт.

Содержание гумуса во втором гумусовом горизонте (20...40 см) находится на уровне пахотного слоя, что создает благоприятные условия для развития сельскохозяйственных растений. Среднее содержание гумуса в СЛ почве в слое 20...40 см было на 33 % ниже, чем во втором гумусовом горизонте.

Наибольшее содержание органического вещества отмечено на интенсивном (И) фоне. В этом варианте в СЛ ВГГ в слое 0...40 см оно достигало 4,86 % (рис. 6), в СЛ – 3,48 %. Полученные результаты согласуются

с данными других исследователей серых лесных почв Владимирского Ополя [12].

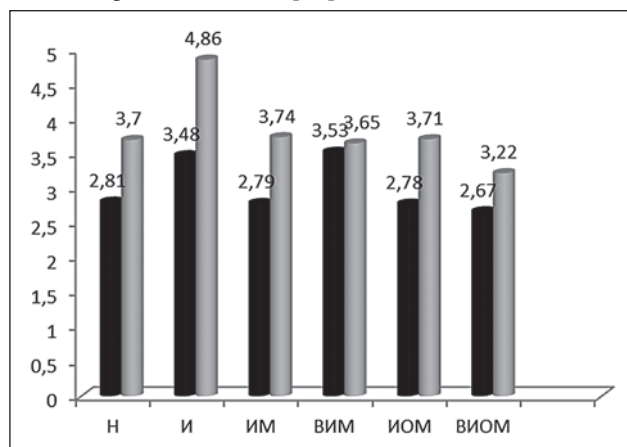


Рис. 6. Содержание гумуса в слое 0...40 см почвенных разностей серой лесной почвы в зависимости от фона интенсификации применения удобрений (2022 г.): ■ – СЛ, ■ – СЛ ВГГ.

Выводы. СЛ ВГГ характеризуется большей активностью каталазы на всех фонах интенсификации. В слое 0...40 см на интенсивном фоне она была больше, чем в СЛ, на 13 %, во втором гумусовом горизонте – на 23 %, по сравнению с СЛ почвой на глубине 20...40 см. Активность фермента возрастает ко времени репродуктивного периода развития сельскохозяйственных растений.

Инвертазная активность серой лесной почвы со вторым гумусовым горизонтом в слое 20...40 см была в среднем на 30 % выше, чем в серой лесной на аналогичной глубине. Самая высокая в опыте активность инвертазы отмечена при использовании средних доз минеральных удобрений и 40 т/га навоза за ротацию 6-польного севооборота в слое 0...20 см – 3,50...3,55 мг глюкозы/г почвы за 4 ч.

Коэффициенты гумусонакопления в вариантах с органоминеральными системами удобрения достигали 0,66...0,72 ед. По всем фонам интенсификации преимуществом в накоплении органического вещества в слое 0...40 см отличались СЛ ВГГ. Содержание гумуса во втором гумусовом горизонте (20...40 см) находилось на уровне пахотного слоя. В серой лесной почве в слое 20...40 см оно было ниже, чем во втором гумусовом горизонте, на 33 %. Лучшее всего органическим веществом была обеспечена почва на интенсивном фоне – в этом варианте в СЛ ВГГ зафиксированное максимальное в опыте содержание гумуса в слое 0...40 см – 4,86 %.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет бюджета Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Верхневолжский федеральный аграрный научный центр». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство этим конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют результаты исследований человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Якушев А. В., Журавлев А. И., Кузнецова И. Н. Влияние длительной и кратковременных засух на гидрולי-

- ческие ферменты серой почвы // Почвоведение. 2023. № 6. С. 745–757.
2. Сергаченко С. Н., Федорова И. Л., Игнатова Т. Д. Влияние нефтяного загрязнения на активность почвенных ферментов классов оксидоредуктаз и гидролаз // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3 (59). С. 83–88.
 3. Дубровина И. А. Влияние биоугля на агрохимические показатели и ферментативную активность почв средней тайги Карелии // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1523–1534.
 4. Зинченко М. К., Зинченко С. И. Ферментативная активность серой лесной почвы при различных приемах основной обработки // Достижения науки и техники АПК. 2021. № 4. С. 17–21.
 5. Свойства и функционирование пахотных почв палеокриогенного комплекса Владимирского ополья / Т. А. Архангельская, М. А. Бутылкина, М. А. Мазиров и др. // Почвоведение. 2007. № 3. С. 261–271.
 6. Научные и методические основы разработки агротехнологий для адаптивно-ландшафтных систем земледелия на комплексе серых лесных почв Владимирского ополья / А. А. Корчагин, Е. В. Шеин, Л. И. Ильин и др. Иваново: ПресСто, 2018. 216 с.
 7. Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
 8. Чундерова А. И. Активность полифенолоксидазы и пероксидазы в дерново-подзолистых почвах // Почвоведение. 1976. Вып. 7. С. 22–28.
 9. Зинченко М. К., Зинченко С. И. Влияние агротехнической нагрузки на ферментативную активность серой лесной почвы со вторым гумусовым горизонтом // Достижения науки и техники АПК. 2018. № 10. С. 63–66.
 10. Изменение растительного покрова и биологических свойств черноземов в постагрогенный период / М. А. Азаренко, К. Ш. Казеев, О. Ю. Ермолаева и др. // Почвоведение. 2022. № 11. С. 1412–1422.
 11. Зинченко М. К., Зинченко С. И. Биологическая диагностика экологического состояния серой лесной почвы в условиях интенсивной агрогенной нагрузки // Земледелие. 2023. № 1. С. 14–18.
 12. Окорков В. В., Окоркова Л. А., Фенова О. А. Влияние длительного применения удобрений на групповой состав органического вещества серых лесных почв Ополья // Агрохимия. 2017. № 10. С. 3–15.

Поступила в редакцию 10.12.2023

После доработки 25.12.2023

Принята к публикации 09.01.2024

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫПАСА НА ДЕПОНИРОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВЕ ПАСТБИЩА

Л. В. Бойцова, С. В. Непримерова

Агрофизический научно-исследовательский институт,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14
E-mail: larisa30.05@mail.ru

Исследование проводили с целью изучения влияния интенсивности выпаса крупного рогатого скота на депонирование органического углерода ($C_{орг}$) в почве пастбища. Работу выполняли в 2010 г. на дерново-среднеподзолистой супесчаной почве в Ленинградской области. Для постановки опыта было выделено три участка пастбища, различающихся по степени интенсивности выпаса: слабая (участок 1), средняя (участок 2), сильная (участок 3). $C_{орг}$ и углерод илстой фракции почвы ($C_{ил}$) определяли по методу И. В. Тюрина. Фракцию ила (<1 мкм) выделяли с использованием седиментации и центрифугирования. Рентгенографический анализ почвенных минералов проводили в пробах илстой фракции почвы на дифрактометре ДРОН-3М: трубка Си Ка, режим 30 мА, 30 кВ, от 3,5 до 75°, скорость вращения гониометра 1° в минуту. Почва участка 3 характеризовалась минимальным содержанием $C_{орг}$ в оба срока обследования (май – 16 С г/кг; июль – 27,8 С г/кг). Величина $C_{орг}$ в июльских пробах была меньше, чем на участке 2, в 1,3 раза, по сравнению с участком 1, – в 1,2 раза. Содержание $C_{ил}$ в мае варьировало в диапазоне 40,8...108,9 С г/кг, в июле – 99,7...140,9 С г/кг. В июльских пробах с участка 3 оно превышало величину этого показателя в пробах с участка 2 в 1,3 раза, с участка 1 – в 1,4 раза. Варьирование коэффициента обогащения (E_{soc}) в мае составляло 1,78...3,50, в июле 2,89...5,07. Наибольшая величина этого показателя зафиксирована для почвы участка 3 в июле, где она была выше, чем на участках 1 и 2, в 1,75 раза. Минералом, депонирующим органическое вещество в илстой фракции почвы участка с сильной интенсивностью выпаса, выступала слюда с дефицитом катионов ($r = 0,90$). Увеличение интенсивности выпаса приводило к росту содержания $C_{ил}$.

INFLUENCE OF GRAZING INTENSITY ON ORGANIC CARBON DEPOSITION IN PASTURE SOIL

L. V. Boitsova, S. V. Neprimerova

Agrophysical Research Institute,
195220, Sankt-Peterburg, Grazhdanskiy prosp., 14
E-mail: larisa30.05@mail.ru

The study was conducted to study the effect of cattle grazing intensity on the deposition of organic carbon (C_{org}) in pasture soil. The work was carried out in 2010 on soddy-medium podzolic sandy loam soil in the Leningrad region. Three pasture areas were identified according to grazing intensity: weak (section 1), medium (section 2), strong (section 3). C_{org} and carbon in the clay fraction of the soil (C_{clay}) were determined according to the method of I. V. Tyurin. The sludge fraction (<1 μm) was isolated using sedimentation and centrifugation. X-ray analysis of soil minerals was carried out in samples of the clay fraction of the soil on a DRON-3M diffractometer, Cu Ka tube mode 30 mA, 30 kV, from 3.5 to 75°, goniometer rotation speed 1° per minute. The soil of site 3 was distinguished by the minimum content of $C_{орг}$ in both periods of the survey (May – 16 C g/kg of soil; July – 27.8 C g/kg). The $C_{орг}$ value in the July samples was 1.3 times less compared to site 2 and 1.2 times less than site 1. C_{clay} values varied in the range: in May 40.8...108.9 C g/kg fractions, in July 99.7...140.9 C g/kg fraction. The content of C_{clay} in July samples from site 3 was 1.3 times higher than the content in samples from site 2 and 1.4 times from site 1. The variation in the enrichment coefficient (E_{soc}) was 1.78...3.50 in May, 2 in July .89...5.07. The highest E_{soc} was recorded for the soil of site 3 in July; its values exceeded the values in sites 1 and 2 by 1.75 times. The mineral depositing organic matter in the clay fraction of the soil of the site with high grazing intensity was mica with a deficiency of cations ($r = 0.90$). The increase in grazing intensity led to an increase in the content of C_{clay} .

Ключевые слова: пастбище, интенсивность выпаса, депонирование углерода, почвенные минералы.

Key words: pasture, grazing intensity, carbon sequestration, soil minerals.

Почвы пастбищ аккумулируют в себе 343 Гт С, что почти на 50% больше, чем в лесах по всему миру [1]. Выпас скота существенно уменьшает количество органического углерода в почве, что связано со снижением растительной биомассы, а также усилением почвенного дыхания [2]. В то же время существуют работы, демонстрирующие положительное влияние выпаса на накопление органического углерода, по сравнению с нативной почвой [3, 4]. Lu X. K. с соавторами [5] обнаружили, что на накопление углерода в почве при различной интенсивности выпаса влияет среднесуточная и среднегодовая температуры почвы, глубина ее слоя, тип домашнего скота и климатические условия [6]. По итогам мета-анализа

результатов 83 исследований отмечено влияние климата на накопление углерода в почве при различной интенсивности выпаса. Высокий уровень выпаса значительно увеличивал содержание органического углерода для пастбищ с преобладанием растений С4, по сравнению с пастбищами с преобладанием С3 и смешанными лугами С3...С4 [7]. Результаты исследований Gebregerges T. с соавторами показали [8], что чрезмерный выпас на пастбищах вызывает изменение структуры растительности вследствие уменьшения её густоты и биомассы. Это приводит к снижению накопления углерода в почве [9].

Процессы, регулирующие удержание углерода, а также образование и разложение стабилизирован-

ного почвенного органического вещества, зависят от взаимодействия между составом поступившего углерода, структурой почвы и микробными сообществами. Защиту углерода от микробного разложения обеспечивают органоминеральные комплексы [10]. Такие взаимодействия были признаны ключевым фактором стабилизации органического вещества в почве [11, 12]. Эффективнее всего его защищают самые мелкие минералы, размеры которых не превышают 1 мкм (фракция ила). Среди них можно назвать глинистые минералы, различные формы оксигидроксидов металлов и слабокристаллические алюмосиликаты.

Цель исследования – установить влияние интенсивности выпаса крупного рогатого скота на накопление органического углерода в верхнем почвенном горизонте пастбища в связи с качественным составом минералов, воздействующих на депонирование углерода в дерново-среднеподзолистой супесчаной почве.

Методика. Почвенные образцы отбирали на пастбище ОПХ «Суйда» (Ленинградская обл., Гатчинский р-он, Россия) на участках с различной интенсивностью выпаса скота в 2010 г. Выделено три участка пастбища со слабой (1), средней (2) и сильной (3) интенсивностью выпаса, расположенных вдоль трансекты (линии) длиной 1500 м. Интенсивность выпаса определяли визуально по степени проективного покрытия почвы луговой растительностью [13]. На участках со слабой (1) и средней (2) интенсивностью преобладали ежа сборная (*Dactylis glomerata*), тимофеевка луговая (*Phleum pratense*), кострец безостный (*Bromopsis inermis*), с сильной (3) – клевер ползучий (*Trifolium repens*), лапчатка гусиная (*Potentilla anserina*), подорожник (*Plantago*). На участках выпасали крупный рогатый скот – 200 коров. Начало выпаса – 30 мая, способ выпаса – пригонная система близ фермы.

Почва дерново-среднеподзолистая супесчаная. Объединённую пробу формировали из индивидуальных, которые отбирали методом конверта с площадок размером 2 м × 2 м из верхнего горизонта, на участке 1 из слоя 8...13 см под дерниной, на участках 2 и 3 – из слоя 2...7 см под дерниной, по стандартной методике с использованием почвенного бура [14]. На каждом участке было по 3 площадки отбора. Образцы отбирали до начала выпаса в мае и конце июля (через 2 месяца после начала выпаса).

Почва характеризовалась следующими агрохимическими показателями: участок 1 – $pH_{KCl}=5,9$, $C_{орг}=3,11\%$, $N_{общ}=0,24\%$; участок 2 – $pH_{KCl}=6,1$, $C_{орг}=4,28\%$, $N_{общ}=0,26\%$; участок 3 – $pH_{KCl}=6,1$, $C_{орг}=1,60\%$, $N_{общ}=0,11\%$.

В период выпаса крупного рогатого скота (июнь–сентябрь) выпало 460 мм осадков, из них в июне – 220 мм, в июле – 90 мм. Средняя температура воздуха в июне составила 18,7 °С, в июле – 27,8 °С.

Содержание общего органического углерода ($C_{орг}$) и углерода илстой фракции ($C_{ил}$) определяли по методу Тюрина [15]. Илстую фракцию (<0,001 мм) почвы выделяли по методике, описанной в работе [16]. Качественный состав почвенных минералов илстой фракции определяли методом рентгенографического анализа. Съёмку образцов осуществляли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М, трубка Cu K α , режим 30 А, 30 кV, от 3,5 до 75°, скорость вращения гониометра 1 гр/мин. Накопление углерода в почве оценивали на основе коэффициента обогащения (E_{soc}) [17]:

$$E_{soc} = C_{ил} / C_{орг}$$

где $C_{ил}$ – содержание углерода илстой фракции, % от массы фракции; $C_{орг}$ – содержание общего органического углерода, % от массы почвы.

Объёмную плотность почвы определяли методом цилиндров [18].

Статистическая обработка результатов предусматривала расчёт средних, стандартных отклонений и коэффициентов корреляции Пирсона. Достоверность различий между средними оценивали методом дисперсионного анализа (ANOVA) при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. В начале наблюдений в мае месяце максимальное содержание общего органического углерода отмечали в почве участка со средней интенсивностью выпаса – 42,8 С г/кг (рис. 1). В почве участка с сильной интенсивностью выпаса количество $C_{орг}$ было наименьшим (16,0 С г/кг). Вероятно, такая картина была обусловлена тем, что на протяжении нескольких предыдущих лет использования пастбища на участке с сильной интенсивностью выпаса в целом происходила большая минерализация органического вещества. Причиной таких изменений может быть связана с сокращением видовой разнообразия и снижением проективного покрытия участка с сильной интенсивностью выпаса, что привело к уменьшению биомассы растений и, как следствие, прихода свежего органического вещества в виде отмирающих приземных и подземных частей растений.

По окончании наблюдений в июле сохранялась аналогичная тенденция в накоплении $C_{орг}$ в почве. Так, в почве участка 1 величина этого показателя составляла 33,9 С г/кг, участка 2 – 37,7 С г/кг, участка 3 – 27,8 С г/кг. Различия между содержанием $C_{орг}$ в майских и июльских пробах почвы были недостоверны ($p < 0,72$).

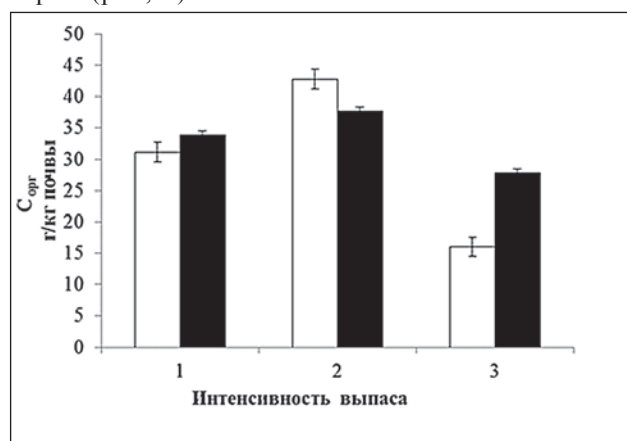


Рис. 1. Содержание общего органического углерода ($C_{орг}$) в дерново-среднеподзолистой супесчаной почве при разной интенсивности выпаса: □ – май, ■ – июль.

При этом, относительно начала наблюдений, наибольшее накопление $C_{орг}$ происходило в почве участка 3, оно возросло на 73%. Можно предположить, что поскольку этот участок характеризовался самым высоким приходом продуктов жизнедеятельности КРС, величина этого показателя повышалась вследствие роста содержания легкой фракции, что сопровождается повышением содержания общего органического углерода в почве [19, 20]. Увеличение $C_{орг}$ в почве участка 1 на 35% и уменьшение в почве участка 2 на 26%, вероятно, связано с пестротой

почвенного участка и неконтролируемым выпасом животных.

В мае отмечали постепенное уменьшение количества $C_{ил}$ в почве по мере увеличения интенсивности выпаса, в конце июля тенденция носила обратный характер (рис. 2). Диапазон его варьирования в мае составлял 40,8...108,9 С г/кг, в июле – 99,7...140,9 С г/кг. Различия между значениями $C_{ил}$ в мае и июле были недостоверными ($p < 0,15$). При этом в почве участка 1 содержание $C_{ил}$ уменьшилось в 1,1 раза, на участках 2 и 3 – возросло соответственно в 1,4 и 3,4 раза. Такое увеличение, особенно на участке с сильной интенсивностью выпаса, с одной стороны, связано с повышенным притоком продуктов жизнедеятельности крупного рогатого скота, с другой – с большей плотностью почвы на этом участке, по сравнению с другими. В начале наблюдений величина последней на участке 1 составляла 1,20 г/см³, 2 – 1,00 г/см³, 3 – 1,10 г/см³, в конце июля она повышалась соответственно до 1,55, 1,42 и 1,75 г/см³. По окончании наблюдений наибольшая плотность почвы на участке 3, по сравнению с участками 1 и 2, создала условия для снижения ее аэрации. При уплотнении в первую очередь разрушаются крупные поры, одновременно происходят существенные изменения в их распределении по размерам. В свою очередь, объемная плотность увеличивается, снижая объем макропор почвы [21], что уменьшает ее воздухопроницаемость. Larsbo M. с соавторами [22] обнаружили значительную положительную корреляцию между содержанием почвенного органического вещества и пористостью для пор диаметром 200...600 мкм, при их диаметре более 600 мкм такой зависимости не обнаружено. Уплотнение служит барьером для транспорта кислорода в почве, уровень которого часто определяет активность почвенных бактерий [23]. Большинство почвенных бактерий лучше развиваются при хорошей насыщенности кислородом, который им необходим для разложения большинства соединений углерода. Кроме того, в переуплотненной почве снижается численность беспозвоночных, которые участвуют в разложении органического вещества. Вероятно, вследствие изложенного в почве этого участка сложились условия, при которых процессы гумификации преобладали над минерализацией органического вещества почвы, что привело к увеличению депонирования $C_{ил}$ в почве по оконча-

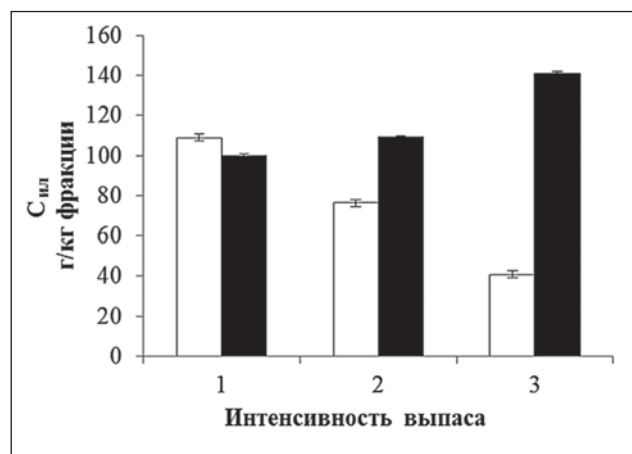


Рис. 2. Содержание органического углерода, связанного с илистой фракцией ($C_{ил}$) в дерново-среднеподзолистой супесчаной почве при разной интенсивности выпаса: □ – май, ■ – июль.

нии периода наблюдений. Корреляционный анализ выявил достоверную положительную взаимосвязь между плотностью почвы и содержанием углерода илистой фракции, которая изменялась от средней в мае ($r=0,48$; $p < 0,05$) до сильной в июле ($r=0,81$ при $p < 0,05$). Взаимосвязь между плотностью почвы и содержанием $C_{ил}$ была отрицательной, но также усиливалась от мая ($r = -0,44$ при $p < 0,05$) к июлю ($r = -0,99$ при $p < 0,05$).

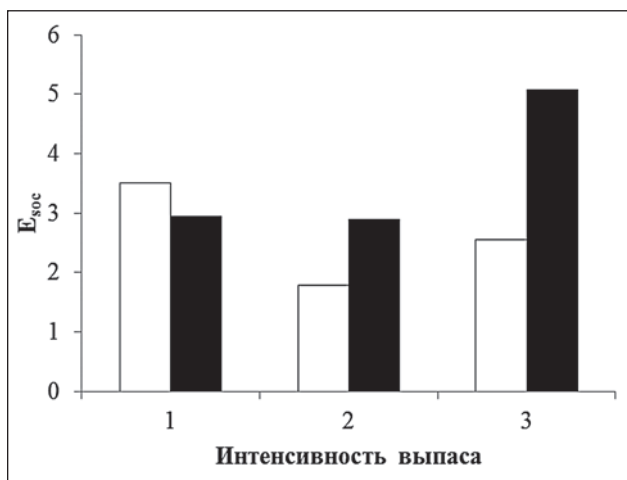


Рис. 3. Величина коэффициента обогащения в дерново-среднеподзолистой супесчаной почве при разной интенсивности выпаса: □ – май, ■ – июль.

Коэффициент обогащения углеродом илистой фракции ($E_{соc}$) в мае был равен 1,78...3,50, в июле – 2,89...5,07. Наибольший в эксперименте $E_{соc}$ отмечали в почве участка 3 в июле, его величина была больше, чем на участках 1 и 2, в 1,75 раза. Полученные результаты подтвердили наибольшее депонирование углерода минералами илистой фракции в почве участка с сильной интенсивностью выпаса. В этом варианте $E_{соc}$ в пробах почвы, отобранных в конце июля, был в 2 раза выше, чем в мае (рис. 3) и в июле на участках с меньшей интенсивностью выпаса.

Корреляционный анализ выявил слабую связь $E_{соc}$ с $C_{орг}$ и $C_{ил}$ в начале наблюдений, по сравнению с их окончанием, когда такая связь была теснее (табл. 1).

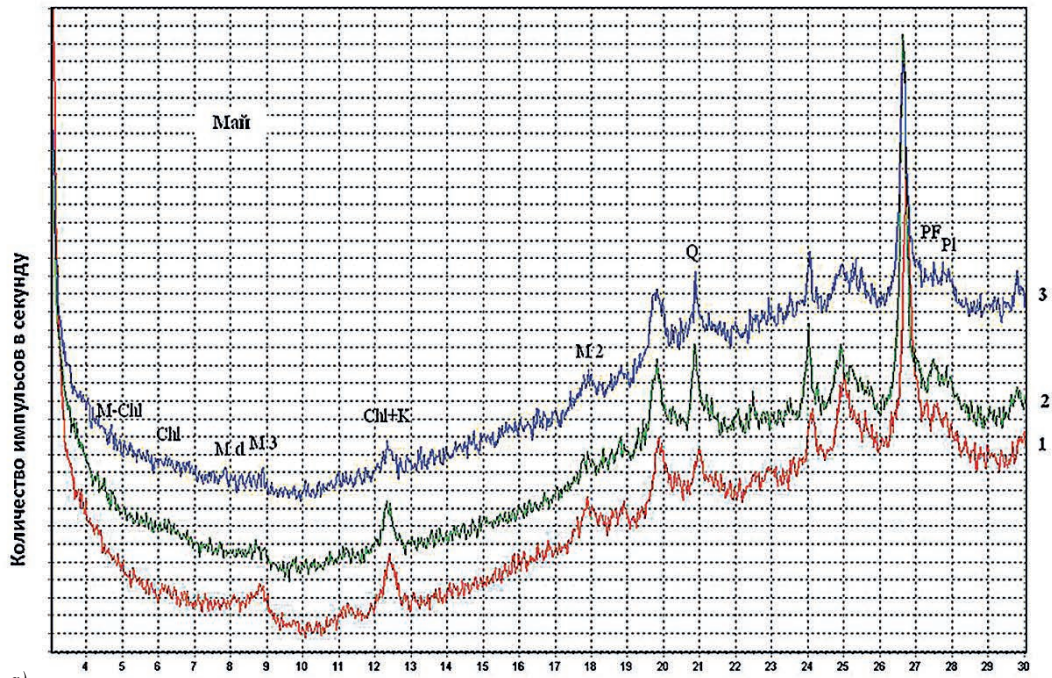
Табл. 1. Коэффициенты корреляции (r) между коэффициентом обогащения $E_{соc}$, общим органическим углеродом ($C_{орг}$) и углеродом, ассоциированным с илистой фракцией почвы ($C_{ил}$)

Май			Июль		
$E_{соc}/C_{орг}$	$E_{соc}/C_{ил}$	$C_{орг}/C_{ил}$	$E_{соc}/C_{орг}$	$E_{соc}/C_{ил}$	$C_{орг}/C_{ил}$
-0,38	0,53*	0,58*	-0,93*	0,97*	-0,82*

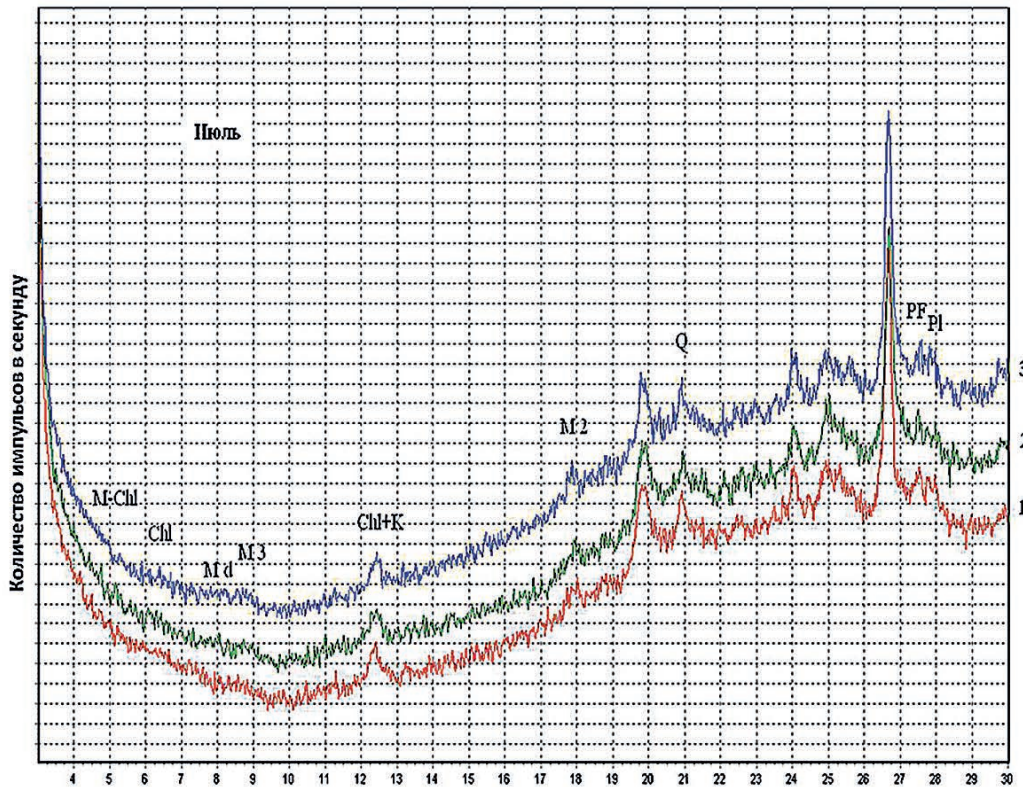
*достоверны для уровня значимости $p = 0,05$.

Рентгеноструктурный анализ илистой фракции почвы выявил наличие в ней основных породообразующих минералов – кварца, полевых шпатов (калиевых и плагиоклазов), слюд (диоктаэдрических, триоктаэдрических и с дефицитом катионов). Кроме того, присутствовали хлорит, следы смешаннослойных минералов с разным переслаиванием пакетов, в некоторых образцах – следы амфиболов и окислов железа (рис. 4).

В целом в илистой фракции почвы на участке со слабой интенсивностью выпаса отмечено больше полевых шпатов, чем на остальных участках, причем



а)



б)

Угол 2θ в градусах

Рис. 4. Рентгенограммы почвенных образцов при слабой (1), средней (2) и сильной (3) интенсивности выпаса в мае (а) и июле (б): M-Chl – смешаннослойный минерал со слюда-хлоритовыми пакетами; Chl – хлорит; Md – слюда с дефицитом катионов; M3 – триоктаэдрическая слюда; Chl+K – хлорит + каолинит; M2 – диоктаэдрическая слюда; Q – кварц; PF – калиевый полевой шпат; Pl – плагиоклаз.

Табл. 2. Диагностические пики минералов (имп./сек)

Интенсивность выпаса	Срок отбора	Смешанно-лольный минерал	Хлорит	Хлорит+каолинит	Слюда			Кварц	Калиевый полевой шпат	Плагиоклаз
					с дефицитом катионов	триоктаэдрическая	диоктаэдрическая			
Слабая	май	32	53	164	53	99	248	600	1049	1163
	июль			164	60		317	705	815	976
Средняя	май		64	256	42	63	383	672	405	577
	июль		63	164		63	289	545	438	691
Сильная	май	61	92	270		89	208	602	344	706
	июль			174	47	78	202	659	726	709

в мае их было больше, чем в июле, а на остальных, напротив – в июле содержание полевых шпатов в илстой фракции оказалось несколько выше, чем в мае (табл. 2). Этот факт можно объяснить тем, что при незначительной нагрузке (слабом выпасе) процесс преобразования полевых шпатов проходит в основном под воздействием растений, которые, извлекая необходимые для роста элементы из минералов, активизируют их химическое выветривание. При среднем и сильном выпасе происходит активное разрушение крупных фракций минералов, вследствие чего илстая фракция обогащается полевыми шпатами, а преобразование этих минералов в илстой фракции идет медленнее. С диоктаэдрическими слюдами ситуация обратная, ими илстая фракция обогащается при слабом выпасе, а обедняется при среднем и сильном, что может происходить в результате преобразования полевых шпатов, так как при выветривании им свойственна серицитизация (образование диоктаэдрической слюды – серицита). Триоктаэдрические слюды очень неустойчивы к выветриванию. Не удивительно, что при слабой интенсивности выпаса в июльских образцах их количество было меньше уровня чувствительности прибора, при средней – не изменилось, при сильной – немного уменьшилось. Преобразование слюд происходит с потерей катионов, вследствие чего илстая фракция пополняется слюдами с их дефицитом, которых было больше при слабой интенсивности выпаса.

В майских образцах содержание хлоритов возросло по мере повышения интенсивности выпаса, в июльских их фиксировали только при средней интенсивности. Лабильный минерал с переслаиванием хлоритовых и слюдяных пакетов выявлен в июльских образцах в вариантах со средней и сильной интенсивностью выпаса, причем его содержание повышалось при увеличении нагрузки на почву. Последнее согласуется с результатами, полученными Савичем В. И. с соавторами [24] на каштановых почвах.

Выводы. По окончании периода наблюдений наибольшим содержанием углерода, связанного с минералами илстой фракции, характеризовались почвы участка с сильной интенсивностью выпаса. В этом же варианте был зафиксирован самый высокий в опыте коэффициент обогащения илстой фракции. Увеличение интенсивности выпаса приводило к повышению содержания органического углерода, ассоциированного с минералами илстой фракции.

Положительное влияние на депонирование органического углерода в илстой фракции почвы оказывали следующие минералы: на участке со слабой интенсивностью выпаса – хлорит, триоктаэдрическая слюда, каолинит; со средней – калиевые полевые шпаты и плагиоклаз; с сильной – слюда с дефицитом катионов. Калиевые полевые шпаты и плагиоклаз оказывали положительное влияние на депонирование углерода в илстой фракции во всех изученных вариантах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Эта работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство этим конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В этой работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы этой работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Laban P., Metternicht G., Davies J. *Soil Biodiversity and Soil Organic Carbon: keeping dry land alive*. Gland, Switzerland: IUCN, 2018. 24 p. URL: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2018-004-En.pdf> (дата обращения: 22.09.2023). doi: 10.2305/IUCN.CH.2018.03.en.
2. *Grazing exclusion reduced soil respiration but increased its temperature sensitivity in a Meadow Grassland on the Tibetan Plateau* / J. Chen, X. Zhou, J. Wang, et al. // *Ecology and Evolution*. 2016. Vol. 6. No. 3. P. 629–870. doi: 10.1002/ece3.1867.
3. *Запасы углерода в типичной степи при различном управлении выпасом* / Сарула, Х. Чэнь, С. Хоу, и др. // *Почвоведение*. 2014. № 11. С. 1365–1374. doi: 10.7868/S0032180X14110100.
4. Wade C., Sonnier G., Boughton E. H. *Does Grazing Affect Soil Carbon in Subtropical Humid Seminal Grasslands?* // *Rangeland Ecology & Management*. 2022. Vol. 80. P. 10–17. doi: 10.1016/j.rama.2021.09.004.
5. *Effects of grazing on ecosystem structure and function of alpine grasslands in Qinghai–Tibetan Plateau: a synthesis* / X. K. Lu, C. Kelsey, Y. Yan, et al. // *Ecosphere*. 2017. Vol. 8 (1). Article 1656. URL: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ecs2.1656> (дата обращения: 22.09.2023). doi: 10.1002/ecs2.1656.
6. *Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis* / G. Zhou, X. Zhou, Y. He, et al. // *Glob. Chang. Biol.* 2017. Vol. 23. P. 1167–1179. doi: 10.1111/gcb.13431.
7. *Smitha Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands* / M. Abdulla, A. Hastingsa, D. R. Chadwickb, et al. // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2018. Vol. 253. P. 62–81. doi: 10.1016/j.agee.2017.10.023.
8. *Gebregerges T., Tessema Z. K., Birhane E. Effect of enclosure ages on woody plant structure, diversity and regeneration potential in the western Tigray region of Ethiopia* // *Journal of Forest Research*. 2017. Vol. 29 (3). P. 697–707. doi: 10.1007/s11676-017-0512-6.

9. Carbon sequestration and soil restoration potential of grazing lands under exclosure management in a semi-arid environment of northern Ethiopia / T. Gebregergs, Z. K. Tessema, N. Solomon, et al. // *EcolEvol*. 2019. Vol. 9. P. 6468–6479. doi: 10.1002/ece3.5223.
10. Lavallee J. M., Soong J. L., Cotrufo M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century // *Glob. Change Biol*. 2020. Vol. 26. P. 261–273. doi: 10.1111/gcb.14859.
11. Бойцова Л. В., Непримерова С. В., Зинчук Е. Г. Влияние различных систем удобрений на секвестрацию органического углерода в дерново-глеевой почве // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2019. № 4. С. 15–20.
12. Islam Md. R., Singh B., Dijkstra F. A. Stabilisation of soil organic matter: interactions between clay and microbes // *Biogeochemistry*. 2022. Vol. 160. P. 145–158. doi: 10.1007/s10533-022-00956-2.
13. Прямая эмиссия закиси азота из лугопастбищных почв Северо-западного Федерального округа Российской Федерации / Е. Я. Рижия, Н. П. Бучкина, Е. А. Соломатова, Балашов Е. В. // *Агрофизика*. 2013. № 1. С. 1–7.
14. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 419 с.
15. Тюрин И. В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии. Учение о почвенном гумусе. М.: ЁЁ Медиа, 2012. С. 290.
16. Бойцова Л. В., Непримерова С. В., Зинчук Е. Г. Влияние минералогического состава почв на стабилизацию в них органического углерода // *Агрофизика*. 2019. № 4. С. 1–8. doi: 10.25695/AGRPH.2019.04.01.
17. Christensen B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates // *Advances in Soil Science*. 1992. Vol. 20 (1). 90 p.
18. Растворова О. Г. Физика почв (Практическое руководство). Л.: Из-во Ленингр. ун-та, 1983. 196 с.
19. Бойцова Л. В., Пухальский Я. В. Динамика содержания органического вещества, его лабильной и инертной частей в дерново-подзолистой супесчаной почве разной степени окультуренности // *Агрофизика*. 2013 № 3. С. 14–22.
20. Бойцова Л. В. Органическое вещество и его легкая фракция в профиле дерново-подзолистой супесчаной почвы // *Агрофизика*. 2015. № 3. С. 1–8.
21. The effect of organic carbon content on soil compression characteristics / K. N. Suravi, K. Attenborough, S. Taherzadeh, et al. // *Soil & Tillage Research*. 2021. Vol. 209. 104975. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198721000453?via%3Dihub> (дата обращения: 10.10.2023). doi: 10.1016/j.still.2021.104975.
22. Preferential transport in macropores is reduced by soil organic carbon / M. Larsbo, J. Koestel, T. Kätterer, et al. // *Vadose Zone Journal*. 2016. Vol. 15. P. 1–17. URL: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/vzj2016.03.0021> (дата обращения: 10.10.2023). doi: 10.2136/vzj2016.03.0021.
23. Dick R. Lecture on soil bacteria in soil Microbiology, personal collection of R. Dick // *The Ohio state University School of Environment and Natural Resources*. Columbus. 2009. Vol. 59. P. 15–20. doi: 10.1080/17429145.2011.597002.
24. Агроэкологическая оценка минералогического состава почв / В. И. Савич, С. Л. Белоухов, М. Е. Котенко, и др. // *Вестник Российского Университета Дружбы Народов. Серия: Агрономия и животноводств*. 2016. № 3. С. 30–39. doi: 10.22363/2312-797X-2016-3-30-39.

Поступила в редакцию 10.11.2023
 После доработки 14.12.2023
 Принята к публикации 09.01.2024

Зоотехния и ветеринария

УДК 636.13.:575

DOI: 10.31857/S2500262724010099, EDN: CSHWZJ

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛИМОРФИЗМА ГЕНОВ *ASIP* И *MC1R* У ЛОШАДЕЙ КАБАРДИНСКОЙ ПОРОДЫ

А. Д. Хаудов¹, научный сотрудник, **М. Х. Жекамухов**², кандидат сельскохозяйственных наук,
А. М. Зайцев³, кандидат сельскохозяйственных наук, **З. Х. Амшокова**², научный сотрудник,
Н. В. Бербекова², кандидат сельскохозяйственных наук, **Х. К. Амшоков**², старший научный сотрудник

¹Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»,
 360002, Нальчик, ул. Балкарова, 2

²Институт сельского хозяйства – филиал ФНЦ «Кабардино-Балкарский научный центр РАН»,
 360004, Нальчик, ул. Кирова, 224
 E-mail: kbniish2007@yandex.ru

³Всероссийский научно-исследовательский институт коневодства,
 391105, Рязанская обл., Рыбновский район, пос. Дивово, ВНИИ коневодства

*Окрас шерсти лошадей представляет значительный интерес по причине его эстетической привлекательности и значимости для идентификации породы. Понимание генетических механизмов, лежащих в основе вариаций окраса шерсти, важно для коннозаводчиков и генетиков. Цель исследования – изучение влияния полиморфизма генов *MC1R* и *ASIP* на окрас шерсти кабардинских лошадей. По результатам генотипирования 127 лошадей кабардинской породы по генам *MC1R* и *ASIP* были определены частоты различных аллелей и генотипов, от которых зависит масть животных. Для определения взаимосвязи между ними был проведен статистический анализ. Для кабардинских лошадей характерен широкий спектр мастей, включая караковую, вороновую, гнедую, темно-гнедую и серую. У большинства исследованных лошадей (96,9 %) выявлено наличие доминантного аллеля *E* гена *MC1R*, связанного с синтезом эумеланина и более темной окраской шерсти. Частота генотипа *A/A* гена *ASIP* увеличивалась по мере осветления окраса шерсти: вороной – 0,0 %, караковый – 9,5 %, темно-гнедой – 56,6 %, гнедой – 84,8 %. Частота мутантного аллеля *a* была равна 0,280. В целом он способствовал образованию черного окраса шерсти у кабардинских лошадей. Результаты исследования способствуют пониманию генетических механизмов, лежащих в основе вариаций окраса шерсти в популяциях лошадей.*

STUDY OF *ASIP* AND *MC1R* GENE POLYMORPHISM HORSES OF THE KABARDIAN BREED

A. D. Khaudov¹, **M. H. Zhekamukhov**², **A. M. Zaitsev**³, **Z. H. Amshokova**²,
N. V. Berbekova², **H. K. Amshokov**²

¹Federal Scientific Center Kabardino-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
 360002, Nal'chik, ul. Balkarova, 2

²Institute of Agriculture – branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
 360004, Nal'chik, ul. Kirova, 224,
 E-mail: kbniish2007@yandex.ru

³All-Russian Research Institute of Horse Breeding,
 391105, Rjazanskaja obl., Rybnovskij rajon, pos. Divovo, VNIИ konevodstva

*The coat color of horses is of considerable interest due to its aesthetic appeal and significance in breed identification. Understanding the genetic mechanisms underlying coat color variation is important for horse breeders and geneticists. The purpose of the study is to study the influence of polymorphism of the *MC1R* and *ASIP* genes on the coat color of Kabardian horses, a unique domestic breed. The proposal is not agreed upon, the idea is not clear. Why was the research done? Based on the results of genotyping 127 horses of the Kabardian breed using the *MC1R* and *ASIP* genes, the frequencies of various alleles and genotypes on which the color of the animals depends were determined. Statistical analysis was carried out to determine the relationship between them. Kabardian horses are characterized by a wide range of colors, including karak, black, bay, dark bay and gray. The majority of the horses studied (96.9 %) were found to have a dominant allele *E* of the *MC1R* gene, associated with the synthesis of eumelanin and darker coat color. The frequency of the *A/A* genotype of the *ASIP* gene increased as the coat color lightened: black – 0.0 %, karak – 9.5 %, dark bay – 56.6 %, bay – 84.8 %. The frequency of the mutant allele *a* was 0.280. In general, it contributed to the formation of black coat color in Kabardian horses. The results of the study provide insight into the relationship of the *MC1R* and *ASIP* genes with the formation of coat colors in Kabardian horses. These results have practical implications for horse breeders when selecting individuals for crossbreeding and contribute to the understanding of the genetic mechanisms underlying variation in coat color within horse populations.*

Ключевые слова: кабардинская порода, лошади, масть, полиморфизм, *MC1R*, *ASIP*.

Key words: Kabardian breed, horses, color, polymorphism, *MC1R*, *ASIP*.

Кабардинская порода лошадей одна из самых древних в России. Ее высоко ценят за выносливость и устойчивость к различным климатическим условиям табунного содержания в средне- и высокогорье. Благодаря прочности копыт кабардинские лошади надежны и безопасны для езды в горных условиях. Кроме того, они обладают высокой скоростной выносливостью и лег-

костью движения, что позволяет им быть успешными участниками различных соревнований.

На сегодняшний день существует несколько программ по улучшению и развитию породы, которые включают в себя подбор качественных жеребцов и кобыл для разведения, а также проведение специальных мероприятий для дальнейшего совершенствования

породы. Для их реализации необходимо определить характеристику породы на морфологическом и генетическом уровне, что служит первым шагом в разработке селекционной стратегии и установлении приоритетов разведения породы.

Лошади относятся к числу самых разнообразных по окраске животных, которые существуют на нашей планете. При этом цвет шерсти имеет не только визуальную функцию, но и может служить индикатором здоровья, уровня стресса и даже способностей к выполнению определенных задач [1]. Наиболее известные варианты мастей лошадей – гнедая и ее оттенки, вороная, серая и рыжая. Как и у многих других видов животных, процесс формирования масти у лошадей довольно сложен [2].

Белок, кодируемый геном *MC1R*, находится на поверхности меланоцитов и активируется меланоцит-стимулирующим гормоном (MSH), что приводит к образованию эумеланина, который представляет собой черный пигмент, обусловленный экспрессией гена дикого типа (аллель *E*). Мутация *MC1R* C901T приводит к образованию рецессивного аллеля *e*, влияние которого обуславливает образование в меланоцитах только феомеланина [3], который представляет собой красно-желтый пигмент. Меланоциты, гомозиготные по рецессивной мутации *e/e* в гене *MC1R*, не могут быть активированы MSH, что приводит к образованию только феомеланина [4, 5].

Ген *ASIP* кодирует сигнальный белок агути (аллель *A* – дикий тип). Этот белок – антагонист MSH и может блокировать функцию *MC1R*, что приводит к ингибированию синтеза эумеланина в меланоцитах лошади [2]. Мутация в виде делеции длиной 11 п. н. в экзоне 2, гена *ASIP*, которая соответствует аллелю *a*, приводит к потере функции сигнального белка агути и обуславливает черный окрас шерсти у лошадей [6].

Гены *MC1R* и *ASIP* полиморфны, то есть они имеют множество различных вариантов, которые могут влиять на окраску шерсти у лошадей [7]. Кроме того, их мутации могут взаимодействовать между собой, что приводит к более сложным вариантам окраски.

Также следует отметить, что на масть лошадей могут влиять и другие гены, например, отвечающие за формирование пятен, полос и других отметин на теле лошади [8]. Однако важность генов *MC1R* и *ASIP* в этом процессе неоспорима, и они остаются предметом активных исследований [9].

Исходя из изложенного, гены *MC1R* и *ASIP* играют важную роль в формировании окраски шерсти у лошадей и могут быть использованы для прогнозирования масти в селекционной работе [10].

Масти в кабардинской породе разнообразны, но наибольшее распространение имеют гнедые, темно-гнедые, вороные и караковые лошади. Так, среди животных производящего состава, записанных в VIII том государственной племенной книги лошадей кабардинской породы [11], светло-гнедых был 0,1%, гнедых – 33,3%, темно-гнедых – 21,7%, вороных – 24,0%, караковых – 20,4%, серых – 0,5%.

Цель исследования – установить распределение аллелей генов пигментобразования *MC1R* и *ASIP* в существующей популяции кабардинской породы для определения ее характеристик по этим ДНК-маркерам.

Методика. Материалом для исследований послужили образцы крови от 127 взрослых лошадей кабардинской породы из хозяйств Кабардино-Балкарии, Краснодарского края, Адыгеи и Карачаево-Черкесии (Хабезский район). Образцы крови собирали в сте-

рильные вакуумные пробирки с антикоагулянтом (К3EDTA) объемом 6 мл. Сбор материала проводили квалифицированные специалисты в присутствии ветеринаров. При взятии проб строго соблюдались все пункты Федерального Закона от 27.12.2018 г. № 498-ФЗ об ответственном обращении с животными (справка № 1671 от 25.04.2022 г.).

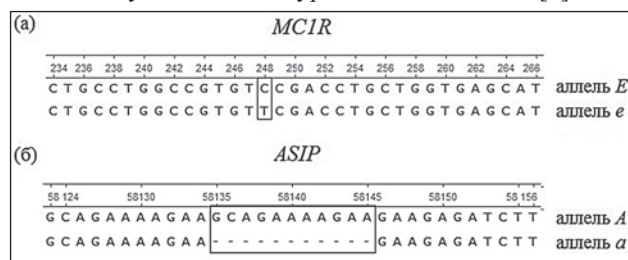
Геномную ДНК выделяли с использованием реагентов «ДНК-Экстран-1» (СИНТОЛ, Россия). Амплификация фрагментов проводили на амплификаторе Biograd T100. Состав ПЦР смеси для обоих локусов, общим объемом 25 мкл включал: 1×ПЦР-буфер, 2,5 mM MgCl₂, смесь дНТФ по 0,2 mM каждого нуклеотида, 0,2 mM каждого праймера 0,5 ед. Taq ДНК-полимеразы («SibEnzyme», Россия) и 50 нг ДНК.

Генотипирование по SNP-маркеру 248C>T (см. рисунок, а) гена *MC1R* осуществляли методом PCR-RFLP согласно описанию L. Marklund с соавт. [12] с использованием опубликованных последовательностей праймеров: 5'-CCTCGGGCTGACCACCAACCAGACGGGGCC-3', 5'-CCATGGAGCCGCAGATGAGCACAT-3'.

Амплификацию локуса *MC1R* проводили по следующей схеме: 10 мин при 95 °С; 30 с при 95 °С, 40 с при 60 °С, 1 мин 30 с при 72 °С (33 цикла); 10 мин при 72 °С (финальная элонгация). Детекцию полиморфизма 248C>T в амплифицированном фрагменте (317 п. н.) ДНК осуществляли с использованием эндонуклеазы рестрикции TaqI («SibEnzyme», Россия). Эта эндонуклеаза рестрикции распознает замену 248C>T, которая приводит к образованию однонуклеотидного полиморфизма в позиции 180 амплифицированного фрагмента. По окончании гидролиза нерестрицированный фрагмент длиной 317 п. н. соответствовал генотипу *E/E*, наличие трех фрагментов длиной 317, 180 и 137 п. н. – генотипу *E/e*, два фрагмента длиной 180 и 137 п. н. – генотипу *e/e*. Условия рестрикции соответствовали рекомендациям производителя, дальнейшее разделение полученных фрагментов проводили путем электрофореза в 2 %-ном агарозном геле.

Детекцию делеции 11 п. н. (см. рисунок, б) в позиции 58135 локуса *ASIP* проводили методом, предложенным S. Rieder с соавт. [6], с использованием последовательностей праймеров: 5'-CTTTTGTCTCTCTTTGAAGCATTG-3', 5'-GAGAAGTCCAAGGCCTACC-TTG-3'. Режим амплификации: 10 мин при 95 °С; 30 с при 95 °С, 40 с при 55 °С, 1 мин 30 с при 72 °С (33 цикла); 10 мин при 72 °С (финальная элонгация). Полученные ампликоны размером 102 п. н. (аллель *A*) и 91 п. н. (аллель *a*) разделяли электрофорезом в 3 %-ном агарозном геле.

Обозначения аллельных вариантов исследуемых генов *MC1R* (*E* – доминантный аллель дикого типа, *e* – рецессивный (мутантный) аллель) и *ASIP* (*A* – доминантный аллель дикого типа, *a* – рецессивный (мутантный) аллель) соответствуют номенклатуре Л. В. Калинковой [1].



Вариации в генах *MC1R* и *ASIP*:
 а) миссенс-мутация в гене *MC1R* обозначена рамкой;
 б) позиция делеции 11 п. н. в гене *ASIP* обозначена рамкой (референсный геном *EquCab3.0*).

Масти лошадей классифицировали в соответствии с результатами ранее проведенных исследований [2, 6]. В исследованной выборке идентифицированы лошади с гнедой (33 гол.), темно-гнедой (23 гол.), вороной (33 гол.), караковой (21 гол.) и серой (17 гол.) мастью. Было установлено, что серые лошади рождаются с исходным окрасом шерсти (например, вороными или гнедыми) и постепенно теряют пигментацию шерсти с увеличением возраста, но сохраняют темную кожу. Для вороной масти характерен черный окрас шерсти на всех частях тела, хотя у некоторых есть белые отметины. Лошади с караковой мастью имеют черную шерсть на гриве, хвосте, ногах, а также почти по всему телу, но красноватые или коричневые пигменты вокруг глаз, морды и в паху. У животных с темно-гнедой мастью черная грива, хвост и ноги, шерсть на туловище черно-бурого или шоколадно-черного цвета при ярких черных подпалах на морде и ярко выраженном черном оплечье на холке. У гнедых лошадей коричневое или красноватое тело, черная грива, ноги и хвост.

Для популяционно-генетического анализа определяли частоту встречаемости аллелей и генотипов в исследуемой породе, а также наблюдаемая гетерозиготность (H_o), которую рассчитывали по формуле: $H_o = N/n$, где N – количество гетерозигот, n – объем выборки. Вычисление наблюдаемой гетерозиготности (H_o) проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2016.

Результаты и обсуждение. В процессе генотипирования кабардинских лошадей по гену *MC1R* установлено, что подавляющее большинство (96,9 %) исследованных животных были носителями доминантного аллеля *E*. Частота аллеля *e* в этом гене, который приводит к подавлению синтеза пигмента эумеланина, в группе исследованных лошадей составляет 0,280 (табл. 1).

Табл. 1. Частоты встречаемости аллелей генов *MC1R* и *ASIP*, детерминирующих пигментацию кожи и волос (n = 127)

Ген	Аллель	Частота	Наблюдаемая гетерозиготность
<i>MC1R</i>	<i>E</i>	0,720	0,417
	<i>e</i>	0,280	
<i>ASIP</i>	<i>A</i>	0,496	0,236
	<i>a</i>	0,504	

Частота генотипа *E/E* гена *MC1R* по мере изменения окраса шерсти с темного (вороного) на более светлый (гнедой) в целом снижается, в отличие от частоты генотипа *E/e*, которая в основном увеличивалась при переходе с вороной на гнедую масть (табл. 2). При этом генотип *E/e* был преимущественным у лошадей гнедой масти (81,8 %), у темно-гнедых лошадей частота генотипа *E/E* составляла 39,1 %, *E/e* – 60,9 %, большинство вороных (69,7 %) и караковых (71,4 %) лошадей имели генотип *E/E*. Генотип *e/e*, который характерен для рыжего окраса шерсти [2], обнаружен только у серых лошадей с частотой 23,5 %. Результаты теста χ^2 свидетельствуют, что фенотипы окрасов шерсти лошадей достоверно ($p < 0,001$) связаны с генотипами *MC1R*.

Табл. 2. Распределение генотипов *MC1R* и *ASIP* по мастям, %

Ген	Генотип	Масть					Значение χ^2
		гнедая	темно-гнедая	вороная	караковая	серая	
<i>MC1R</i>	<i>E/E</i>	18,2	39,1	69,7	71,4	41,2	$\chi^2 = 34,56$ $p < 0,001$
	<i>E/e</i>	81,8	60,9	30,3	28,6	35,3	
	<i>e/e</i>	0	0	0	0	23,5	
<i>ASIP</i>	<i>A/A</i>	84,8	56,6	0	9,5	29,4	$\chi^2 = 98,6$ $p < 0,001$
	<i>A/a</i>	15,2	39,1	0	47,6	35,3	
	<i>a/a</i>	0	4,3	100	42,9	35,3	

Частота мутантного аллеля *a* гена *ASIP* в популяции кабардинской породы составила 0,504 (см. табл. 1), в том

числе 49 особей были его гомозиготными носителями. Ранее Rieder S. с соавторами установили, что генотип *a/a* встречается только у вороных, караковых и серых лошадей [6]. Однако в нашем исследовании его отмечали у темно-гнедых особей с частотой 4,3 %. От темных (караковых) до светлых (гнедых) мастей частота генотипа *A/a* постепенно снижалась, а генотипа *A/A* увеличивалась (см. табл. 2). Генотипы *A/a* и *a/a* у лошадей караковой масти отмечали примерно с одинаковой частотой (47,6 % и 42,9 % соответственно). У гнедых и темно-гнедых лошадей преимущественный генотип изменился на *A/A* (от 84,8 % для гнедых до 56,6 % для темно-гнедых). Все животные вороной масти имели генотип *a/a*, как было отмечено и в предыдущих исследованиях [2]. Результаты теста χ^2 показывают, что окрасы шерсти лошадей были достоверно связаны с генотипами *ASIP* ($p < 0,001$).

В исследованиях, проведенных на людях и других млекопитающих, было показано, что ген *MC1R* играет важную роль в определении цвета волос и шерсти [13, 14, 15].

Выводы. У лошадей кабардинской породы, окрас шерсти меняется преимущественно в зависимости от генотипа *MC1R*, от более темного при более высокой частоте аллеля *E*, на светлый при увеличении частоты аллеля *e*.

Анализ распределения полиморфизмов гена *ASIP* по мастям показал, что генотип *A/a* связан с темным окрасом шерсти (например, темно-гнедой и караковой), *A/A* – с более светлым (например, гнедой).

Полученные результаты могут быть полезны при составлении программ для совершенствования и усилий по сохранению кабардинской породы, а также обеспечат молекулярную основу для дальнейших исследований механизма окраса шерсти лошадей и других млекопитающих.

Литература.

1. Калинкова Л. В., Зайцев А. М., Иванов П. В. Генетическая структура локальной популяции лошадей якутской породы по генам *MC1R*, *ASIP*, *DMRT3* и *MSTN* // *Сельскохозяйственная биология*. 2022. Т. 57. № 2. С. 272–282. doi 10.15389/agrobiology.2022.2.272rus.
2. Synergy between *MC1R* and *ASIP* for coat color in horses (*Equus caballus*) / S. Shang, Y. Yu, Y. Zhao, et al. // *Journal of Animal Science*. 2019. Vol. 97. No. 4. P. 1578–1585. doi 10.1093/jas/skz071.
3. Reißmann M. Die Farben der Pferde: Genetik – Klassifizierung – Charakteristik. München: Cadmos, 2009. 272 p.
4. Genetic characterization of kushum horses in kazakhstan based on haplotypes of mtDNA and y chromosome, and genes associated with important traits of the horses / T. B. Nguyen, R. C. Paul, Y. Okuda et al. // *Journal of Equine Science*. 2020. Vol. 31. No. 3. P. 35–43. doi: 10.1294/jes.31.35.
5. The *MC1R* and *ASIP* coat color loci may impact behavior in the horse / L. N. Jacobs, E. A. Staiger, J. D. Albright, et al. // *Journal of Heredity*. 2016. Vol. 107. No. 3. P. 214–219. doi 10.1093/jhered/esw007.
6. Mutations in the agouti (*ASIP*), the extension (*MC1R*), and the brown (*TYRP1*) loci and their association to coat color phenotypes in horses (*Equus caballus*) / S. Rieder, S. Taourit, D. Mariat, et al. *Mammalian Genome*. 2001. Vol. 12. No. 6. P. 450–455. doi: 10.1007/s003350020017
7. Brooks S. A., Bailey E. Exon skipping in the *KIT* gene causes a Sabino spotting pattern in horses // *Mammalian Genome*. 2005. Vol. 16. No. 11. P. 893–902. doi: 10.1007/s00335-005-2472-y.

8. *Regulatory mutations in TBX3 disrupt asymmetric hair pigmentation that underlies Dun camouflage color in horses* / F. Inslund, K. McGowan, C.-J. Rubin, et al. // *Nature Genetics*. 2016. Vol. 48. No. 2. P. 152–158. doi: 10.1038/ng.3475.
9. *Genetic Background of the Polish Primitive Horse (Konik) Coat Color Variation – New Insight into Dun Dilution Phenotypic Effect* / J. Cieslak, L. Wodas, A. Borowska, et al. // *Journal of Heredity*. 2021. Vol. 112. No. 5. P. 436–442. doi 10.1093/jhered/esab034.
10. Liu X., Ma Y., Jiang L. *Genomic regions under selection for important traits in domestic horse breeds* // *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. 2017. Vol. 4. No. 3. P. 289–294. doi 10.15302/J-FASE-2017155.
11. Амшников Х. К., Тарчокова Т. М., Халилов Р. А. Государственная книга племенных лошадей кабардинской породы. Дивово: изд. ФГБНУ «ВНИИ коневодства», 2019. Т. VIII. 724 с.
12. *Missense mutation in the gene for melanocyte-stimulating hormone receptor (MC1R) is associated with the chestnut coat color in horses* / L. Marklund, Johansson M. Moller, K. Sandberg, et al. // *Mammalian Genome*. 1996. Vol. 7. No. 12. P. 895–899. doi: 10.1007/s003359900264.
13. *Melanocortin 1 receptor variants and their association with phenotypic characteristics and sporadic multiple primary melanomas in a cohort of 402 Spanish subjects* / D. Várseda-González, P. Lázaro-Ochaita, G. Ribas-Despuig, et al. // *Experimental Dermatology*. 2023. Vol. 32 No. 5. P. 678–683. doi: 10.1111/exd.14739.
14. *Mutations in ASIP and MC1R: dominant black and recessive black alleles segregate in native Swedish sheep populations* / C. M. Rochus, K. Westberg Sunesson, E. Jonas, et al. // *Animal Genetics*. 2019. Vol. 50. No. 6. P. 712–717. doi: 10.1111/age.12837.
15. *Genetic Variation in Coat Colour Genes MC1R and ASIP Provides Insights Into Domestication and Management of South American Camelids* // J. C. Marin, R. Rivera, J. Cortés, et al. // *Frontiers in Genetics*. 2018. Vol. 9. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fgene.2018.00487/full> (дата обращения: 29.08.2023). doi: 10.3389/fgene.2018.00487.

Поступила в редакцию 11.09.2023

После доработки 01.10.2023

Принята к публикации 07.11.2023

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМБИНАЦИИ БИОКООРДИНАЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ПРОБИОТИКА НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОДУКТИВНОСТИ ЦЫПЛЯТ-БРОЙЛЕРОВ

С. В. Лебедев, доктор биологических наук,
Т. В. Казакова, О. В. Маршинская, Е. В. Кияева, кандидат медицинских наук

Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН,
460000, Оренбург, ул. 9 Января, 29
E-mail: vaisvais13@mail.ru

*Исследования проводили с целью изучения влияния комбинированного пробиотика, в состав которого входила микробная масса смеси живых бактерий *L. acidophilum*, *B. adolescentis* и хелатного комплекса аминокислот с хромом, на динамику ростовых показателей, потребление и переваримость корма, убойные качества, морфологические и биохимические показатели крови в организме цыплят-бройлеров кросса Арбор Айкросс. До двухнедельного возраста птица (n=60) находилась в режиме подготовительного периода и получала основной рацион. Начиная с возраста 15 дней, бройлерам опытной группы дополнительно вместе с водой давали комбинированный пробиотик в дозе 0,2 г/кг, а с кормом хелатный комплекс аминокислот с хромом в дозе 200 мг/кг. Продолжительность учетного периода составляла 28 дней. У цыплят-бройлеров опытной группы в возрасте 28 и 42 суток масса тела была статистически значимо выше, чем в контроле, соответственно на 18 % (p=0,03) и 14 % (p=0,01). Масса потрошеной тушки в опытной группе была больше, чем в контрольной, на 24 % (p=0,05). Добавление в рацион птиц изучаемой добавки способствовало снижению затрат корма на 1 кг прироста на 0,3 кг (14 %), при этом переваримость сырого протеина достоверно возросла на 2,7 % (p=0,03). Уровень белка в мясе птиц опытной группы был выше, чем в контроле, на 2,76 % (p=0,03). Введение пробиотика в рацион достоверно повышало активность супероксиддисмутазы и глутатиопероксидазы в сыворотке крови на 13 % (p=0,02) и 7,5 % (p=0,03) соответственно. Совместное многоцелевое действие пробиотиков и комплекса аминокислот с хромом оказывает положительное влияние на организм сельскохозяйственной птицы и повышает эффективность птицеводства.*

STUDY OF THE EFFECT OF A COMBINATION OF BIOCOORDINATION COMPOUNDS AND A WATER-BASED PROBIOTIC ON THE PERFORMANCE OF BROILER CHICKENS

S. V. Lebedev, T. V. Kazakova, O. V. Marshinskaia, E. V. Kiyayeva

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the RAS,
460000, Orenburg, ul. 9 Yanvarya, 29
E-mail: vaisvais13@mail.ru

*The aim of the study was to investigate the effect of a combined probiotic, which included microbial mass of a mixture of live bacteria *L. acidophilum*, *B. adolescentis* and chelate complex of amino acids with chromium on the dynamics of growth performance, feed intake and digestibility, slaughter quality, morphological and biochemical blood parameters in the organism of broiler chickens of Arbor Aikress cross (CJSC «Poultry Farm Orenburgskaya»). Up to two weeks of age, the birds were in the preparatory period and received the basic diet (n=60). Starting from the age of 15 days, broilers of the experimental group additionally received with water a combined probiotic at a dose of 0,2 g/kg, and with feed a chelate complex of amino acids with chromium at a dose of 200 mg/kg. The duration of the study period was 28 days. The body weight of broiler chickens of the experimental group was statistically significantly higher by 28 and 42 days of age than in the control by 18 % (p=0,03) and 14 % (p=0,01), respectively. The weight of gutted carcass in the experimental group was higher than in the control group by 24 % (p=0,05). Addition of the studied additive to the diet of birds contributed to the reduction of feed costs per 1 kg of gain by 0,3 kg (14 %). Digestibility of crude protein in the experimental group was significantly higher by 2,7 % (p=0,03). The level of protein in meat of the experimental group was higher than in the control by 2,76 % (p=0,03). The introduction of probiotic in the diet had a stimulating effect on antioxidant enzymes. In broiler chickens of the experimental group the activity of superoxide dismutase and glutathioneperoxidase in blood serum was significantly higher than in the control by 13 % (p=0,02) and 7,5 % (p=0,03), respectively. Thus, probiotics, together with the complex of amino acids with chrome, due to its multipurpose action can have a positive effect on the organism of farm poultry and increase the efficiency of poultry farming.*

Ключевые слова: цыплята-бройлеры, кормление, пробиотики, хелатный комплекс аминокислот, продуктивность цыплят.

Key words: broiler chickens, feeding, probiotics, amino acid chelate complex, performance of chickens

Продуктивность цыплят-бройлеров напрямую связана с такими факторами, как питательность комбикормов [1], норма посадки, способ содержания [2], световой [3], температурный [4] и влажностный режимы, функциональное состояние желудочно-кишечного тракта [5], использование различных кормовых добавок [6] и др.

Одна из наиболее частых причин снижения продуктивности и падежа цыплят-бройлеров – заболе-

вания желудочно-кишечного тракта, в результате которых происходит нарушение баланса микрофлоры в сторону преобладания условно-патогенных и патогенных микроорганизмов [7]. При нарушении здоровья кишечника цыплята-бройлеры не могут полноценно использовать питательные вещества сбалансированного рациона [8]. Следовательно, применение кормовых добавок, направленных на под-

держание нормального состояния кишечного микробиома, представляется достаточно перспективным.

В современных условиях отечественные и зарубежные ученые активно изучают влияние пробиотиков на кишечный иммунитет и показатели продуктивности сельскохозяйственной птицы [9, 10, 11]. Пробиотики способствуют нормализации баланса бактерий в желудочно-кишечном тракте, усиливают иммунный ответ и предотвращают воспалительные процессы в кишечнике, улучшают потребление корма и пищеварение благодаря повышению активности пищеварительных ферментов и снижению активности бактериальных ферментов, уменьшают выработку аммиака, нейтрализуют энтеротоксины и стимулируют иммунную функцию организма сельскохозяйственной птицы [12, 13]. Пробиотики в кормах используют изолированно либо в сочетании с другими компонентами (микроэлементами, аминокислотами, витаминами, флавоноидами и др.). Немаловажно и то, что пробиотические препараты, в отличие от антибиотиков, не оставляют следов в продуктах животного происхождения (мясе и яйцах), что улучшает потребительские характеристики бройлеров.

Цель исследования – оценить эффективность использования добавки, содержащей комбинированный пробиотик и хелатный комплекс аминокислот с хромом в кормлении цыплят-бройлеров.

Методика. Объект исследования – цыплята-бройлеры кросса Арбор Айкросс (ЗАО «Птицефабрика Оренбургская»).

Для проведения эксперимента было отобрано 60 двухнедельных цыплят, которых по принципу пар-аналогов разделили на две группы – контрольную и опытную. До двухнедельного возраста птица находилась в режиме подготовительного периода и получала основной рацион (ОР) по рекомендациям ВНИТИП (2014). Начиная с пятнадцатидневного возраста, бройлеры опытной группы дополнительно получали вместе с водой комбинированный пробиотик, в состав которого входила микробная масса смеси живых бактерий *L. acidophilum* и *B. adolescentis*, высушенных лиофильным способом на мальтодекстрине (водорастворимая форма), в дозе 0,2 г/кг веса птицы, а с кормом хелатный комплекс аминокислот с хромом в дозе 200 мг/кг корма. Продолжительность учетного периода составила 28 дней.

Динамику ростовых показателей оценивали путём индивидуального взвешивания птиц в возрасте 15, 21, 28, 35 и 42 дней до кормления, в конце эксперимента проводили лабораторные исследования, включавшие морфологический и биохимический анализ сыворотки крови.

Образцы крови для исследования отбирали в конце эксперимента из подкрыльцовой вены с использованием пробирок VACUETTE (Австрия). Для измерения гематологических параметров кровь отбирали в пробирки с антикоагулянтом (этилендиаминтетрауксусная кислота), для определения биохимических показателей в пробирки с активатором свертывания крови и гелем для получения сыворотки.

Гематологические параметры измеряли с использованием анализатора URIT-2900 Vet Plus (Китай). Определяли количество лейкоцитов с дифференциальным подсчетом (эозинофилы, лимфоциты, базофилы и моноциты), количество эритроцитов, концентрацию гемоглобина и количество тромбоцитов.

Биохимические анализы сыворотки крови проводили с использованием коммерческих реагентов

и в соответствии с надлежащей лабораторной практикой на анализаторе CS-T240 (Китай). Измеряли содержание глюкозы, общего белка, холестерина, аланинаминотрансферазы (АЛТ), аспаргатаминотрансферазы (АСТ), каталазы (САТ), супероксиддисмутазы (СОД), глутатиопероксидазы (GSH-Px).

Для сравнительной оценки влияния дополнительных добавок на качество и пищевую ценность мяса, на примере поверхностной грудной мышцы, определяли его химический состав (влага, сухое вещество, протеин, жир, зола).

Обработку полученных данных проводили методами вариационной статистики с использованием программ «Excel» («Microsoft») и «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.»). Проверку соответствия полученных данных нормальному закону распределения осуществляли при помощи критерия согласия Колмогорова. Гипотеза о принадлежности данных нормальному распределению была отклонена во всех случаях с вероятностью 95%, что обосновало возможность применения непараметрических процедур обработки статистических совокупностей (U-критерий Манна-Уитни). Полученные данные представлены в виде медианы (Me) и 25–75-го квартилей (Q₂₅-Q₇₅). При всех процедурах статистического анализа рассматривали достигнутый уровень значимости (p), критическим принимали p ≤ 0,05.

Результаты и обсуждение. Введение в рацион птиц кормовой добавки оказало положительный эффект на динамику их массы тела. У цыплят-бройлеров опытной группы к 28-му и 42-дневному возрасту она была статистически значимо выше, чем в контроле, на 18% (p=0,03) и 14% (p=0,01) соответственно (табл. 1). Одновременно у птиц этой группы наблюдали интенсивный прирост массы тела, среднесуточная величина которого была достоверно больше, по сравнению с контролем, на 17%, (p=0,05).

Табл. 1. Зоотехнические показатели цыплят-бройлеров¹

Возраст, сут.	Группа	
	контрольная	опытная
Масса тела, г		
15	455,0 (440,0...475,0)	467,0 (442,0...480,0)
21	800,0 (766,0...834,0)	900,0 (860,0...910,0)
28	1 228,0 (1 010,0...1 356,0)	1 446,0 (1 2221,0...1 532,0)*
35	1 667,0 (1 668,0...1 800,0)	1 999,0 (1 952,0...2 222,0)
42	2 266,0 (2 207,0...2 345,0)	2 596,0 (2 451,0...2 679,0)**
Среднесуточный прирост, г/сут		
15...42	64,8 (62,2...66,7)	76,0 (71,7...78,5) *

¹здесь и далее, числа в скобках обозначают значения 25 и 75-го квартилей (Q₂₅-Q₇₅); * – p ≤ 0,05; ** – p ≤ 0,01, по сравнению с контрольной группой.

Цыплята-бройлеры контрольной группы за период проведения эксперимента потребляли 4164 г корма, что на 14 г меньше, чем в опытной (табл. 2). В целом добавление в рацион птиц комбинации водорастворимого пробиотика и органической формы хрома способствовало снижению затрат корма на 1 кг прироста на 0,3 кг (14%).

Табл. 2. Потребление кормов при выращивании цыплят-бройлеров

Возраст, сут.	Группа	
	контрольная	опытная
Фактическое потребление корма за период выращивания, г/гол		
15...28	1 634,0	1 723,0
28...42	2 530,0	2 455,0
За весь период	4 164,0	4 178,0
Затраты корма на 1 кг прироста, кг		
15...42	2,2	1,9

Полученные различия в живой массе цыплят-бройлеров можно объяснить разной переваримостью

питательных веществ рациона, которая в обеих группах была достаточно высокой (табл. 3). Переваримость органического вещества, сырого жира, сырой клетчатки, сухого вещества и безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) в опытной группе практически не отличалась от контроля. Достоверные различия фиксировали только по переваримости сырого протеина, в опытной группе она была выше на 2,7 % ($p=0,03$).

Табл. 3. Коэффициенты переваримости питательных веществ корма, %

Коэффициент переваримости	Группа	
	контрольная	опытная
Органическое вещество	76,0 (75,1...76,5)	80,0 (78,1...80,4)
Сырой протеин	78,2 (77,4...78,6)	80,9 (79,1...81,2)*
Сырой жир	73,1 (72,9...74,2)	74,5 (74,0...75,6)
Сырая клетчатка	13,3 (12,3...14,9)	13,8 (12,1...14,0)
Сухое вещество	76,9 (75,8...77,1)	78,2 (77,3...78,4)
БЭВ	78,2 (76,3...80,1)	82,0 (81,1...83,2)

* – $p \leq 0,05$, по сравнению с контрольной группой.

Результаты разделки свидетельствуют, что масса потрошенной тушки в опытной группе была больше, чем в контрольной, на 24 % ($p=0,05$). Кроме того, у птиц, получавших водорастворимый пробиотик и органическую форму хрома, убойный выход был достоверно выше на 5,8 % ($p=0,05$). По массе субпродуктов (печень и сердце) статистически значимых различий между группами не установлено (табл. 4).

Табл. 4. Убойные качества бройлеров

Показатель	Группа	
	контрольная	опытная
Предубойная живая масса, г	2266,0 (2207,0...2345,0)	2596,0 (2451,0...2679,0)**
Полупотрошенная тушка, г	1984,0 (1903,3...2018,3)	2275,0 (2110,0...2360,1)
Потрошенная тушка, г	1539,0 (1447,0...1588,1)	1914,4 (1884,0...1970,8)*
Печень, г	75,09 (74,64...84,46)	82,96 (79,07...87,29)
Сердце, г	14,76 (13,59...14,77)	15,77 (14,05...16,04)
Убойный выход тушки, %	67,9 (65,6...68,1)	73,7 (72,9...74,5)*

* – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$, по сравнению с контрольной группой.

Результаты исследования химического состава показали, что содержание влаги в белом мясе обеих групп было выше нормы примерно на 2 % (табл. 5). При этом количество белка в белом мясе птиц контрольной групп ниже рекомендуемой величины, а у птиц опытной группы соответствовало нормативным параметрам. Уровень белка в мясе птицы опытной группе был выше, чем в контроле, на 2,76 % ($p=0,03$). Зольность белого мяса и уровень жира в мясе птиц обеих групп находились практически в пределах рекомендуемых значений.

Табл. 5. Содержание химических веществ в мясе бройлеров, %

Показатель	Группа	
	контрольная	опытная
Влага	75,26 (75,18...75,3)	75,62 (75,41...76,26)
Сухое вещество	24,6 (24,47...24,74)	25,15 (24,9...25,55)
Протеин	19,57 (19,17...20,75)	22,33 (20,17...22,57)*
Жир	5,4 (4,95...5,62)	5,02 (5,01...5,11)
Зола	0,95 (0,94...0,96)	0,95 (0,94...0,96)

* – $p \leq 0,05$, по сравнению с контрольной группой; рекомендуемые величины (Справочные таблицы содержания основных пищевых веществ и энергетической ценности пищевых продуктов / под ред. И. М. Скурихина, М. Н. Волгарева. М., 1987; ГОСТ 31962-2013): влага – не более 73,0% для грудки, 66,0% для красного мяса; жир – соответственно не более 5,0 и 8,0%; протеин – не менее 21,0 и 17,0%; зола – не более 1,1 и 1,0%.

Морфологические показатели крови бройлеров обследуемых групп в возрасте 42 дней находились

в пределах физиологических норм, разработанных по Ч. П. Кондрахина (1985), что свидетельствует о здоровом физическом состоянии птицы. Статистически значимых различий между величинами этих показателей у птиц опытной и контрольной группы не выявлено, прослеживалась только тенденция к увеличению уровня эритроцитов и гемоглобина (табл. 6).

Биохимические параметры крови всех птиц так же находились в пределах рекомендуемых норм (по Садовникову Н. В., 1995). В конце экспериментального периода у бройлеров опытной группы содержание глюкозы было статистически достоверно выше (табл. 7), чем в контрольной, на 20 % ($p=0,03$), общего белка – на 76 % ($p=0,01$), активность АЛТ – на 8,5 % ($p=0,02$), АСТ – на 15 % ($p=0,02$).

Введение пробиотика в рацион оказало стимулирующий эффект на антиоксидантные ферменты, что сопровождалось повышением их активности. У цыплят-бройлеров опытной группы активность супероксиддисмутазы и глутатиопероксидазы в сыворотке крови была достоверно выше, чем в контроле, на 13 % ($p=0,02$) и 7,5 % ($p=0,03$) соответственно.

На сегодняшний день установлено, что пробиотики, благодаря своему многоцелевому действию, способны оказывать положительное влияние на организм сельскохозяйственной птицы и повышать эффективность птицеводства [14, 15, 16].

Результаты нашего исследования свидетельствуют о наличии положительного эффекта от добавле-

ния в корм комбинированного пробиотика (смесь живых бактерий *L. acidophilum* и *B. adolescentis*) и хелатного комплекса аминокислот с хромом в дозе 200 мг/кг, после которого масса птиц опытной группы к 28- и 42-дневному возрасту статистически значимо превышала контроль на 18 % и 14 % соответственно. Это согласуется с данными, которые отмечали прирост массы бройлеров, получавших в составе корма Лактобифадол Форте (*Lactobacillus acidophilus*, *Bifidobacterium adolescentis*) [17]. Такой эффект может быть связан со способностью пробиотиков повышать активность пищеварительных ферментов (протеаз и амилаз), которые улучшают скорость переваривания питательных веществ корма, увеличивая усвояемость крахмала, жира и белка, что, в свою очередь, может привести к повышению прироста живой массы бройлеров [18]. Определенное

Табл. 6. Морфологические показатели крови бройлеров

Показатель	Группа	
	контрольная	опытная
Лейкоциты, $10^9/л$	35,5 (27,84...40,73)	33,5 (21,7...37,8)
Лимфоциты, %	56,1 (51,7...58,5)	49,9 (43,5...60,8)
Эозинофилы, %	8,0 (5,9...10,0)	6,4 (5,6...7,7)
Базофилы, %	2,3 (1,2...2,5)	2,2 (2,1...2,6)
Моноциты, %	5,8 (5,3...6,9)	6,7 (5,2...7,9)
Эритроциты, $10^{12}/л$	3,15 (2,97...3,3)	3,28 (2,89...3,33)
Гемоглобин, г/л	121,0 (96,0...127,0)	127,0 (103,0...131,0)
Тромбоциты, $10^9/л$	64,33 (52,09...72,3)	52,43 (44,07...80,3)

Табл. 7. Биохимические показатели бройлеров

Показатель	Группа	
	контрольная	опытная
Глюкоза, ммоль/л	13,44 (11,89...14,06)	16,19 (15,1...17,24)*
Общий белок, г/л	41,13 (40,37...42,27)	72,25 (71,93...72,91)**
Холестерин, ммоль/л	1,45 (1,17...1,62)	1,05 (0,86...2,12)
АЛТ, Ед/л	19,03 (18,60...20,58)	20,65 (18,1...22,8)*
АСТ, Ед/л	152,66 (120,69...203,84)	175,86 (165,37...186,23)*
SOD, Ед/мл	12,62 (11,93...13,21)	14,29 (14,03...14,53)*
CAT, Ед/мл	4,56 (4,31...4,78)	4,99 (4,57...5,28)
GSH-Px, Ед/мл	209,87 (205,36...212,37)	225,64 (220,34...228,42)

* – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$, по сравнению с контрольной группой.

положительное влияние оказало и лучшее усвоение хрома из хелатной формы [19].

Потребление корма в опытной группе снизилось на 14 %, что очень важно с экономической точки зрения. Некоторые исследователи отмечают, что потребление корма снижается при добавлении пробиотиков [20, 21]. Другие авторы пришли к выводу, что добавление пробиотиков не повлияло на потребление корма [22]. В литературе также имеются данные, что добавление пробиотиков приводит к увеличению потребления корма [23]. Противоречивость данных может быть связана с несколькими факторами, такими как вид сельскохозяйственной птицы, ее пол, пробиотический штамм и его дозировка и др. Возможно, в нашем исследовании снижение потребления корма в опытной группе связано с тем, что используемые штаммы микроорганизмов в дозе 0,2 г/кг массы птицы привели к улучшению усвояемости и абсорбции питательных веществ из корма благодаря повышению активности пищеварительных ферментов и улучшению морфологии пищеварительного тракта.

Обращают на себя внимание изменения биохимических показателей крови опытной группы. Достаточно закономерным на фоне введения изучаемых добавок представляется увеличение содержания общего белка, поскольку пробиотики способствуют усвоению аминокислот [10]. Повышение уровня глюкозы в крови бройлеров опытной группы может быть результатом увеличения всасывательной способности слизистой оболочки кишечника благодаря гистоморфологическим изменениям, вызванным воздействием пробиотиков и аминокислот [24, 25]. Кроме того, рост содержания глюкозы может свидетельствовать о повышении энергетического статуса птицы опытной группы и положительном влиянии добавок на углеводный обмен. Полученные результаты согласуются с данными ранее проведенных исследований [26].

АСТ и АЛТ – активные физиолого-биохимические маркеры, обладающие широким спектром действия. Они участвуют в регуляции азотистого обмена, обмена белков, жиров и углеводов, а также в биологическом окислении [27]. Повышенная активность этих ферментов в крови птиц опытной группы может свидетельствовать о большей скорости метаболизма белка на фоне пробиотиков и хелатного комплекса аминокислот.

Изменение активности антиоксидантных ферментов в сыворотке крови может быть связано с соответствующими свойствами пробиотиков, которые были предметом многочисленных исследований в последние годы [28, 29]. Наши данные согласуются с результатами Lihuan Zhang и соавт. [30], которые обнаружили, что введение в корм пробиотических добавок приводит к увеличению концентрации супероксиддисмутазы и глутатиопероксидазы у цыплят-бройлеров.

Выводы. Многоцелевое действие пробиотиков совместно с комплексом аминокислот с хромом оказывает положительное влияние на организм сельскохозяйственной птицы и повышает эффективность птицеводства. У цыплят-бройлеров опытной группы масса тела в возрасте 28 и 42 суток была статистически значимо выше, чем в контроле, соответственно на 18 % ($p=0,03$) и 14 % ($p=0,01$), масса потрошенной тушки – на 24 % ($p=0,05$). Введение в рацион птиц изучаемой добавки способствовало снижению затрат корма на 1 кг прироста на 0,3 кг (14%) при увеличении переваримости сырого протеина на 2,7 % ($p=0,03$). Уровень белка в мясе бройлеров опытной группы выше, чем в контроле, на 2,76 % ($p=0,03$). Введение пробиотика в рацион достоверно увеличивало активность супероксиддисмутазы и глутатиопероксидазы в сыворотке крови соответственно на 13 % ($p=0,02$) и 7,5 % ($p=0,03$).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств Российской науки фонда (проект № 22–16–00070).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

Экспериментальные исследования выполняли в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов (Приказ Минздрава СССР № 755 от 12.08. 1977 «О мерах по дальнейшему совершенствованию организационных форм работы с использованием экспериментальных животных»), протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434–2009). Все процедуры над животными осуществляли в соответствии с правилами Комитета по биоэтике Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий РАН, г. Оренбург, Россия (протокол № 2 от 6.06.2023).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

- Петрянкин Ф. П., Лаврентьев А. Ю., Шерне В. С. Влияние кормления на иммунный статус организма животных (научный обзор) // *Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии*. 2017. № 2(2). С. 46–50.
- Астраханцев А. А. Продуктивность цыплят-бройлеров при различных технологических вариантах выращивания // *Птицеводство*. 2019. № 1. С. 26–30. doi: 10.33845/0033-3239-2019-68-1-26-30.
- Бахарев А. А., Александрова С. С. Влияние освещения на продуктивность цыплят бройлеров // *Эпоха науки*. 2018. № 15. С. 120–124.
- Impact of heat stress and nutritional interventions on poultry production / S. P. He, M. A. Arowolo,

- R. F. Medrano, et al. // *World's Poultry Science Journal*. 2018. Vol. 74. No. 4. P. 647–664. doi: 10.1017/S0043933918000727.
5. Шацких Е. В., Королькова-Субботкина Д. Е. Состояние кишечника цыплят-бройлеров при включении в рацион фитобиотической добавки // *Аграрный вестник Урала*. 2022. № S14. С. 81–91. doi: 10.32417/1997-4868-2022-229-14-81-91.
 6. Кротова Н. Ю., Лаврентьев А. Ю., Шерне В. С. Продуктивность цыплят-бройлеров при использовании мультиэнзимного препарата // *Птицеводство*. 2020. № 2. С. 27–30. doi: 10.33845/0033-3239-2020-69-2-27-30.
 7. Грозина А. А. Состав микрофлоры желудочно-кишечного тракта у цыплят-бройлеров при воздействии пробиотика и антибиотика (по данным *t-rflp-rt-pcr*) // *Сельскохозяйственная биология*. 2014. № 6. С. 46–58. doi:10.15389/agrobiol.2014.6.46rus.
 8. Yadav S., Jha R. Strategies to modulate the intestinal microbiota and their effects on nutrient utilization, performance, and health of poultry // *J Anim Sci Biotechnol*. 2019. Vol. 10. P. 2. URL: <https://jasbsci.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40104-018-0310-9> (дата обращения: 04.09.2023). doi: 10.1186/s40104-018-0310-9.
 9. Dietary effect of probiotics and prebiotics on broiler performance, carcass, and immunity / A. Rehman, M. Arif, N. Sajjad et al. // *Poult Sci*. 2020 Vol. 99. No. 12. P. 6946–6953. doi: 10.1016/j.psj.2020.09.043.
 10. Probiotics in poultry feed: A comprehensive review / M. E. Abd El-Hack, M. T. El-Saadony, M. E. Shafi, et al. // *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 2020. Vol. 104. No. 6. P. 1835–1850. doi: 10.1111/jpn.13454.
 11. Wu X. Z., Wen Z. G., Hua J. L. Effects of dietary inclusion of *Lactobacillus* and inulin on growth performance, gut microbiota, nutrient utilization, and immune parameters in broilers // *Poult Sci*. 2019. Vol. 98. No. 10. P. 4656–4663. doi: 10.3382/ps/pez166.
 12. The use of probiotics as eco-friendly alternatives for antibiotics in poultry nutrition / M. Alagawany, M. E. Abd El-Hack, M. R. Farag, et al. // *Environ Sci Pollut Res Int*. 2018. Vol. 25. No. 11. P. 10611–10618. doi: 10.1007/s11356-018-1687-x.
 13. Impact of restricting feed and probiotic supplementation on growth performance, mortality and carcass traits of meat-type quails / R. N. Soomro, M. E. Abd El-Hack, S. S. Shah, et al. // *Anim Sci J*. 2019. Vol. 90. No. 10. P. 1388–1395. doi: 10.1111/asj.13290.
 14. Neveling D. P., Dicks L. M. T. Probiotics: an Antibiotic Replacement Strategy for Healthy Broilers and Productive Rearing // *Probiotics Antimicrob Proteins*. 2021. Vol. 13. No. 1. P. 1–11. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12602-020-09640-z> (дата обращения: 04.09.2023). doi: 10.1007/s12602-020-09640-z.
 15. *Bacillus* Probiotics as Alternatives to In-feed Antibiotics and Its Influence on Growth, Serum Chemistry, Antioxidant Status, Intestinal Histomorphology, and Lesion Scores in Disease-Challenged Broiler Chickens / I. P. Ogbuwu, M. Mabelebele, N. A. Sebola, et al. // *Front Vet Sci*. 2022. Vol. 9. P. 876725. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fvets.2022.876725/full> (дата обращения: 04.09.2023). doi: 10.3389/fvets.2022.876725.
 16. Probiotics as Alternatives to Antibiotics for the Prevention and Control of Necrotic Enteritis in Chickens / R. R. Kulkarni, C. Gaghan, K. Gorrell, et al. // *Pathogens*. 2022. Vol. 11. No. 6. P. 692. URL: <https://www.mdpi.com/2076-0817/11/6/692> (дата обращения 04.09.2023). doi: 10.3390/pathogens11060692.
 17. Изучение влияния пробиотиков на продуктивные и гематологические показатели крови цыплят-бройлеров / Р. А. Тузинов, С. В. Лебедев, А. Е. Аринжанов и др. // *Животноводство и кормопроизводство*. 2022. Т. 105. № 4. С. 195–207. doi: 10.33284/2658-3135-105-4-195.
 18. Wang Y., Gu Q. Effect of probiotic on growth performance and digestive enzyme activity of Arbor Acres broilers // *Res Vet Sci*. 2010. Vol. 89. No. 2. P. 163–167. doi: 10.1016/j.rvsc.2010.03.009.
 19. The effect of feed supplementation with zinc chelate and zinc sulphate on selected humoral and cell-mediated immune parameters and cytokine concentration in broiler chickens / Ł. Jarosz, A. Marek, Z. Grądzki, et al. // *Res Vet Sci*. 2017. Vol. 112. P. 59–65. doi: 10.1016/j.rvsc.2016.09.007.
 20. Effect of pelleting temperature and probiotic supplementation on growth performance and immune function of broilers fed maize/soy-based diets / A. M. Amerah, A. Quiles, P. Medel, et al. // *Animal Feed Science and Technology*. 2013. Vol. 180. No. 1–4. P. 55–63. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2013.01.002.
 21. The effects of different growth promoters on performance and carcass characteristics of broiler chickens / R. Mokhtari, A. R. Yazdani, M. Rezaei, et al. // *Journal of Animal and Veterinary Advances*. 2010. Vol. 9. No. 20. P. 2633–2639. doi: 10.3923/javaa.2010.2633.2639.
 22. Effect of supplementation of prebiotic mannan-oligosaccharides and probiotic mixture on growth performance of broilers subjected to chronic heat stress / M. U. Sohail, M. E. Hume, J. A. Byrd, et al. // *Poult Sci*. 2012. Vol. 91. No. 9. P. 2235–2240. doi: 10.3382/ps.2012-02182.
 23. Abdel-Raheem S. M., Sherief M. S. Abd-Allah S. M. S. The effect of single or combined dietary supplementation of mannan oligosaccharide and probiotics on performance and slaughter characteristics of broilers // *Int. J. Poult. Sci.* 2011. Vol. 10. No. 11. P. 854–862. doi: 10.3923/ijps.2011.854.862.
 24. Effect of dietary supplementation of prebiotics and probiotics on intestinal microarchitecture in broilers reared under cyclic heat stress / S. Ashraf, H. Zaneb, M. S. Yousaf, et al. // *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)*. 2013. Vol. 97 Suppl 1. P. 68–73. doi: 10.1111/jpn.12041. PMID: 23639019.
 25. Wealleans A. L., Sirukhi M., Egorov I. A. Performance, gut morphology and microbiology effects of a *Bacillus* probiotic, avilamycin and their combination in mixed grain broiler diets // *Br Poult Sci*. 2017. Vol. 58. No. 5. P. 523–529. doi: 10.1080/00071668.2017.1349298.
 26. Probiotic level effects on growth performance, carcass traits, blood parameters, cecal microbiota, and immune response of broilers / M. Pourakbari, A. Seidavi, L. Asadpour, et al. // *An Acad Bras Cienc*. 2016. Vol. 88. No. 2. P. 1011–1021. doi: 10.1590/0001-3765201620150071.
 27. Музакаева Х. С. Влияние микроэлементов на ферментативную активность // *Вестник Медицинского института*. 2020. Т. 17. № 1. С. 66–69. doi: 10.36684/med-2020-17-1-66-69.
 28. Probiotics as potential antioxidants: a systematic review / V. Mishra, C. Shah, N. Mokashe, et al. // *J Agric Food Chem*. 2015. Vol. 63. No. 14. P. 3615–3626. doi: 10.1021/jf506326t.

29. *Antioxidant Properties of Probiotic Bacteria* / Y. Wang, Y. Wu, Y. Wang, et al. // *Nutrients*. 2017. Vol. 9. No. 5. P. 521. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6643/9/5/521> (дата обращения: 04.09.2023). doi: 10.3390/nu9050521.
30. *Supplementation of probiotics in water beneficial growth performance, carcass traits, immune function, and antioxidant capacity in broiler chickens* / L. Zhang, R. Zhang, H. Jia, et al. // *Open Life Sci.* 2021. Vol. 16. No. 1. P. 311–322. doi: 10.1515/biol-2021-0031.

Поступила в редакцию 15.10.2023

После доработки 29.11.2023

Принята к публикации 19.12.2023

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

УДК 631.174:004

DOI: 10.31857/S2500262724010116, EDN: CSBYBY

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ АЗОТОМ В ПОСЕВАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР**В. К. Каличкин, доктор сельскохозяйственных наук,
К. Ю. Максимович, Д. С. Федоров, Л. В. Гарафутдинова***Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН,
630501, Новосибирская обл., Новосибирский р-н, пос. Краснообск
E-mail: vk.kalichkin@gmail.com*

Исследования проводили с целью разработки концептуальной модели цифрового управления азотом в посевах сельскохозяйственных культур. Использовали когнитивный анализ структуры знаний в этой предметной области, концептуальное моделирование цифрового управления азотом в агрофитоценозах с применением объектно-ориентированного подхода и унифицированного языка моделирования (UML). Создана детализированная система цифрового управления азотом, содержащая диаграммы классов, процессов и взаимодействий. Модель базируется на трех абстрактных объектах – класс (7 шт.), атрибут (32) и межклассовые отношения (18 шт.), по которым распределены основные понятия, подчеркивающие сложность и многогранность подходов к цифровому управлению азотом. В качестве центрального класса принят «Агрофитоценоз», с которым напрямую взаимодействуют 5 классов и косвенно 1 класс. Атрибуты входят в состав классов и отражают их особенности. Для отображения взаимодействия между классами и их атрибутами используются отношения четырех видов: «зависимость», «ассоциация», «агрегация» и «внутренний класс». В диаграмме процессов системы цифрового управления азотом выделены две основные подсистемы: подсистема анализа и планирования, подсистема корректировки, а также инструменты и источники для сбора и обработки данных. Особенность созданной концептуальной модели заключается в использовании принципа темпоральности, сочетании статических и динамических процессов в системе цифрового управления азотом в агрофитоценозе. Концептуальная модель разработана для создания программно-аппаратного комплекса диагностики азотного питания культурных растений и управления применением удобрений на основе современных средств цифрового мониторинга и обработки информации.

CONCEPTUAL MODEL OF DIGITAL NITROGEN MANAGEMENT IN AGRICULTURAL CROPS**V. K. Kalichkin, K. Yu. Maksimovich, D. S. Fedorov, L. V. Garafutdinova***Siberian Federal Research Center of Agricultural Biotechnology, Russian Academy of Sciences,
630501, Novosibirskaya obl., Novosibirskii r-n, pos. Krasnoobsk,
E-mail: vk.kalichkin@gmail.com*

The research was aimed at developing a conceptual model of digital nitrogen management in crops. Cognitive analysis of the knowledge structure in this subject area, conceptual modeling of digital nitrogen management in agrophytocenoses using object-oriented approach and Unified Modeling Language (UML) were used. A detailed system of diagrams was created, encompassing class, process, and interaction diagrams. The model is anchored on three abstract objects: class (7 in total), attribute (32), and inter-class relationships (18), which distribute the main concepts, emphasizing the complexity and multifaceted approaches to digital nitrogen management. The central class is «Agrophytocenosis», which directly interacts with 5 classes and indirectly with 1 class. Attributes are integral to the classes and reflect their specific characteristics. To depict the interaction between the classes and their attributes, four types of relationships are employed in the model: «dependency», «association», «aggregation», and «inner class». In the process diagram of the digital nitrogen management system, two primary subsystems are highlighted: the analysis and planning subsystem and the adjustment subsystem, as well as tools and sources for data acquisition and processing. A distinctive feature of the developed conceptual model is the application of the temporality principle, integrating static and dynamic processes in the digital nitrogen management system within the agrophytocenosis. Subsystems for analysis, planning and adjustment of emerging conditions in the management areas allow ensuring more efficient use of nitrogen fertilizers in crops. The conceptual model is aimed at developing a hardware-software complex for diagnostics of nitrogen nutrition of cultivated plants and management of fertilizer application based on modern digital monitoring and data processing tools.

Ключевые слова: концептуальная модель, цифровое управление, азотные удобрения, сельскохозяйственные культуры.**Key words:** conceptual model, digital management, nitrogen fertilizers, crops.

Эффективность использования азота (N) в растениеводстве зависит от таких взаимосвязанных факторов, как генетический потенциал сельскохозяйственных культур, условия окружающей среды (почва, погода), азотное удобрение (вид и количество, время и технология внесения), чередование культур в севообороте, уровень интенсификации производства и др. [1, 2].

Принятие решений при внесении азотных удобрений основано на эмпирическом подходе, который

реализуют на основе полевых опытов путем оценки средней оптимальной дозы для культуры в конкретных почвенных и климатических условиях или на упрощенных балансах этого минерального элемента. Среди наиболее распространенных в агрохимической службе РФ методов расчета доз N удобрений можно назвать следующие: по нормативам затрат N удобрений на единицу урожая (прибавки урожая); по нормативам выноса N на единицу урожая основной продукции с учетом

побочной; балансово-расчетный по выносу N на единицу урожая, с учетом коэффициентов использования растениями из почвы и удобрений. Модификация этих методов в последние годы достигла значительного разнообразия. Например, Ю. И. Ермохин насчитал более 40 методов определения оптимальных доз удобрений под разные культуры [3]. В дополнение к расчетным методам оптимизации азотного питания сельскохозяйственных культур используют исследования азотного статуса посевов в процессе вегетации и проводят подкормки азотными удобрениями по данным растительной диагностики [4, 5].

В последние годы разработан ряд отечественных программ для ЭВМ, которые позволяют рассчитывать дозы применения минеральных удобрений под сельскохозяйственные культуры с различной степенью автоматизации [6, 7]. В этих программах используются, в основном, различные варианты балансово-расчетного метода, с учетом данных об агрохимических свойствах почв, выносе питательных веществ планируемым урожаем культур и коэффициентов возмещения этого выноса [8, 9].

Широко обсуждаются проблемы создания автоматизированных цифровых систем в качестве инструментов оптимизации азотного питания сельскохозяйственных культур в англоязычной литературе. Например, разработана концепция программного обеспечения системы управления азотом на ферме (farm N management system – FNMS), которая включает модули управления данными фермы, определения потребностей в удобрениях, балансировки азота и его циклов, оборота азота и возможных потерь, поддержки принятия решений [10]. Для оценки воздействия различных стратегий управления азотом используют подходы, основанные на биофизических моделях сельскохозяйственных культур. Так, удовлетворительные результаты для нитратов и влажности почвы были получены при тестировании модели STICS (v8.2.2) со стандартным набором параметров на базе данных, охватывающих 15 культур и широкий спектр агропедоклиматических условий Франции [11]. Описана модель NLES5, прогнозирующая ежегодное выщелачивание нитратов из корневой зоны [12]. Существуют инструменты, специфичные для конкретных культур, например, кукурузы [13], картофеля [14], пшеницы [15]. Разработан комплексный инструмент AzoFert® системы поддержки принятия решений по расчету оптимальных доз внесения азота для 40 культур в масштабе поля [16].

Эти исследования привели к созданию цифровых инструментов для консультационных служб и фермеров, а также повлияли на эволюцию практики применения азотных удобрений. Существенный недостаток российских программ для ЭВМ заключается в отсутствии интеграции между планированием систем удобрений под культуры с оперативной диагностикой N-статуса посевов в реальном времени и, соответственно, оперативной корректировкой азотного питания растений. Кроме того, расчет доз азота по усредненным агрохимическим показателям почв сельскохозяйственных предприятий на планируемый урожай содержит значительную неопределенность в использовании азота растениями из почвы и удобрений.

То есть, разработка отечественной системы цифрового управления азотом (ЦУА), которая может обеспечить поддержку принятия решений относительно применения азотных удобрений специалистам на местах, крайне необходима. ЦУА должно охватывать широкий

спектр сельскохозяйственных ситуаций, с которыми сталкиваются специалисты в системах земледелия, использовать разумное количество вводимых данных и иметь возможность интегрировать новую информацию (новые параметры, новые модули) с течением времени, что важно в контексте развития решений экономических и экологических задач.

Цель исследования – разработать концептуальную модель цифрового управления азотом в посевах сельскохозяйственных культур с использованием объектно-ориентированного подхода и унифицированного языка моделирования (UML).

Методика. Необходимый этап создания программного обеспечения (ПО) любой интеллектуальной информационной системы – концептуализация предметной области (ПрО) или концептуальное моделирование. Под концептуальным моделированием понимается моделирование сущностей (классов) ПрО, их концептуальных структур и отношений между ними. По существу, концептуальное моделирование предоставляет собой когнитивные исследования, отражающие структуру знаний о ПрО, которые служат необходимой предпосылкой для правильного проектирования системы поддержки принятия решений. Концептуальная модель ПрО также выступает начальным этапом разработки ПО, когда определяется базовая структура системы, ее компоненты, их назначение и взаимосвязь. При этом выполняется построение семантической модели ПрО с высоким уровнем абстракции [17].

В качестве основы концептуализации использована объектно-ориентированная методология, которая служит развитием структурного программирования и моделирования данных, обеспечивающих локализацию и структуризацию как самих данных, так и процессов их обработки [18]. Объектно-ориентированный подход предполагает, что при разработке ПО должны быть определены классы используемых в нем объектов, созданы экземпляры и установлено взаимодействие между ними. Развитие этой методологии связано с созданием методов визуального описания данных, их структурой и состоянием.

Для описания ПрО использован унифицированный язык моделирования (Unified Modeling Language – UML) [19], который в последние годы принят в качестве «стандартной» нотации объектно-ориентированного моделирования. UML обеспечивает адекватный подход к представлению как концептуальных, так и реальных процессов, функций и схем для программных систем, а диаграммы классов UML могут документировать ключевые элементы любого объектно-ориентированного подхода. Считается, что использование нотации UML позволяет увеличить скорость разработки ПО и уменьшить количество синтаксических, семантических и других видов ошибок.

Для визуализации концептуального моделирования ЦУА использовали структуру иерархии классов, их атрибуты и связи, а также взаимодействие между ними (диаграмма процессов) [20]. Диаграммы классов и процессов UML построены в программном пакете Draw.IO (app.diagrams.net) [21].

Результаты и обсуждение. Для описания концептуальной модели ЦУА в посевах сельскохозяйственных культур (агрофитотенозе) выбраны 3 абстрактных объекта – класс, атрибут и межклассовые отношения, по которым распределены основные понятия, неотъемлемо связанные с ЦУА. Для 7 сущностей выбран абстрактный объект «класс», для 32 – «атрибут», для 18 связей процессов в модели – «межклассовые от-

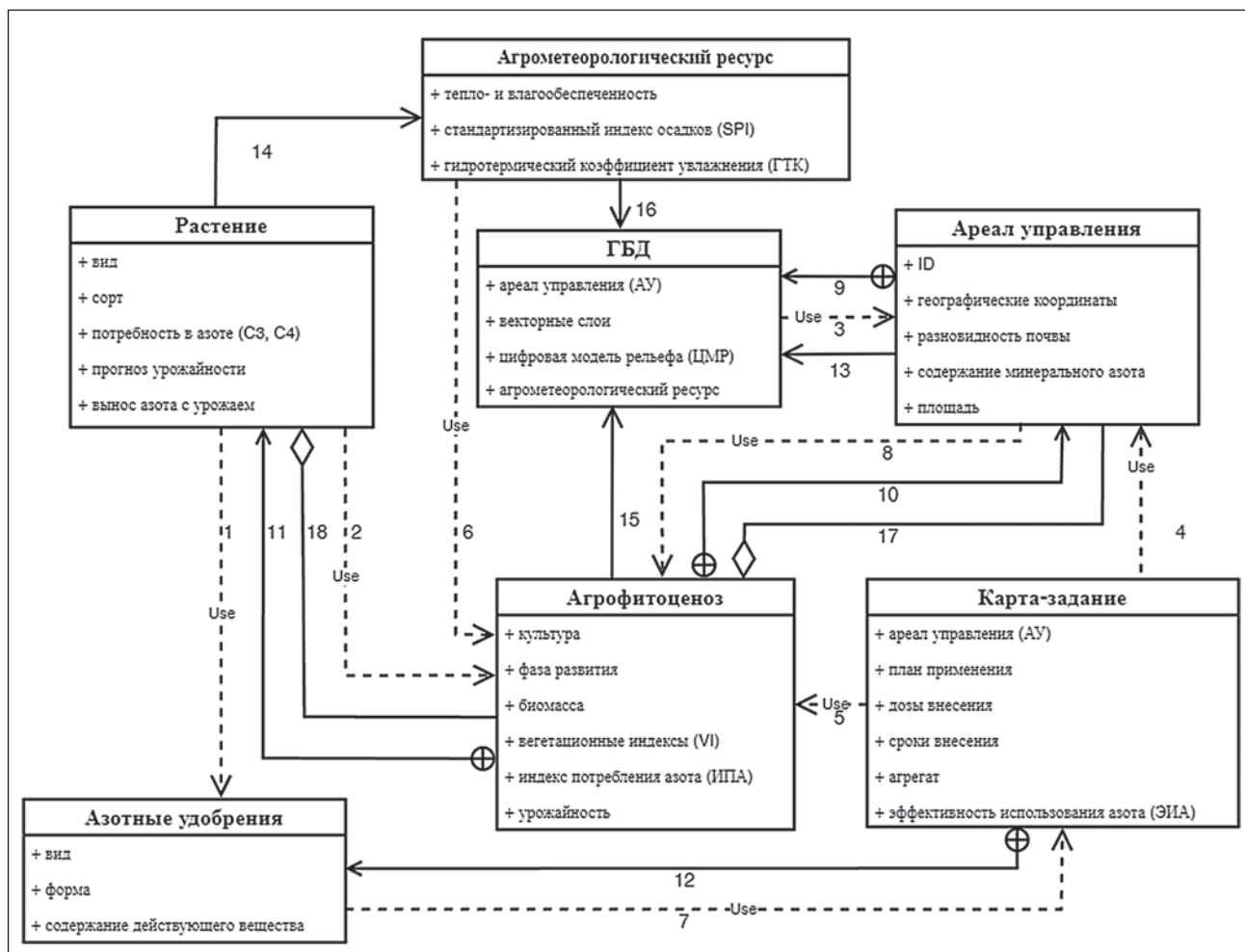


Рис. 1. UML-диаграмма классов ЦУА.

ношения», которые отражены на UML-диаграмме классов (рис. 1). Центральным классом выступает «Агрофитоценоз», с которым напрямую взаимодействуют 5 классов: «Растение», «Ареал управления», «Агрометеорологический ресурс», «Геоинформационные базы данных (ГБД)», «Карта-задание» и косвенно класс «Азотные удобрения». Атрибуты входят в состав классов и отражают их особенности. Для отображения взаимодействия между классами и их атрибутами используются межклассовые отношения четырех видов: зависимость (Dependency) – связи 1...8 обозначают зависимости между различными классами и атрибутами, при которых один объект зависит от другого; ассоциация (Association) – связи 13...16 представляют собой отношения между классами и атрибутами, при которых классы имеют отношения между собой, но не обязательно зависят один от другого; агрегация (Aggregation) – связи 17...18, когда один класс выступает частью другого; внутренний класс (InnerClass) – связи 9...12 представляют внутренние классы, которые связаны с основными классами.

В UML-диаграмме процессов системы ЦУА отражены последовательность действий, основные операции и инструменты их выполнения, а также источники данных, необходимые для реализации процесса управления азотным питанием растений (рис. 2).

В модели системы выделены две основные подсистемы:

анализа и планирования – верхняя левая половина диаграммы относится к задачам картирования, средняя часть к моделированию, нижняя – к планированию. Эти блоки позволяют осуществлять анализ данных, создавать цифровую модель АУ агрофитоценоза в ГИС и разрабатывать планы управления азотным питанием растений;

корректировки – обеспечивает коррекцию и исправление выполненных действий и планов в течение вегетационного периода, что позволяет системе адаптироваться к складывающимся условиям окружающей среды и изменениям объектов управления.

Подсистемы используют *инструменты* получения и обработки данных о статических и динамических процессах в агрофитоценозе. Некоторые инструменты отнесены к обеим подсистемам, что подчеркивает интегрированный характер системы ЦУА.

Следует отметить, что при создании ГБД и их сопровождении используется принцип темпоральности, который заключается в отражении множества состояний объекта ПрО в виде совокупности снимков ГБД в определенный период времени. Такой подход в ГИС-моделях позволяет проводить анализ за прошлые и текущий моменты времени с последующей их экстраполяцией в предстоящие [22]. Кроме того, посредством анализа информации об АУ, содержащейся в ГБД, возможно реализовать принцип индивидуальности и максимально адаптировать систему к высокой степени дифференциации агроландшафтных условий,

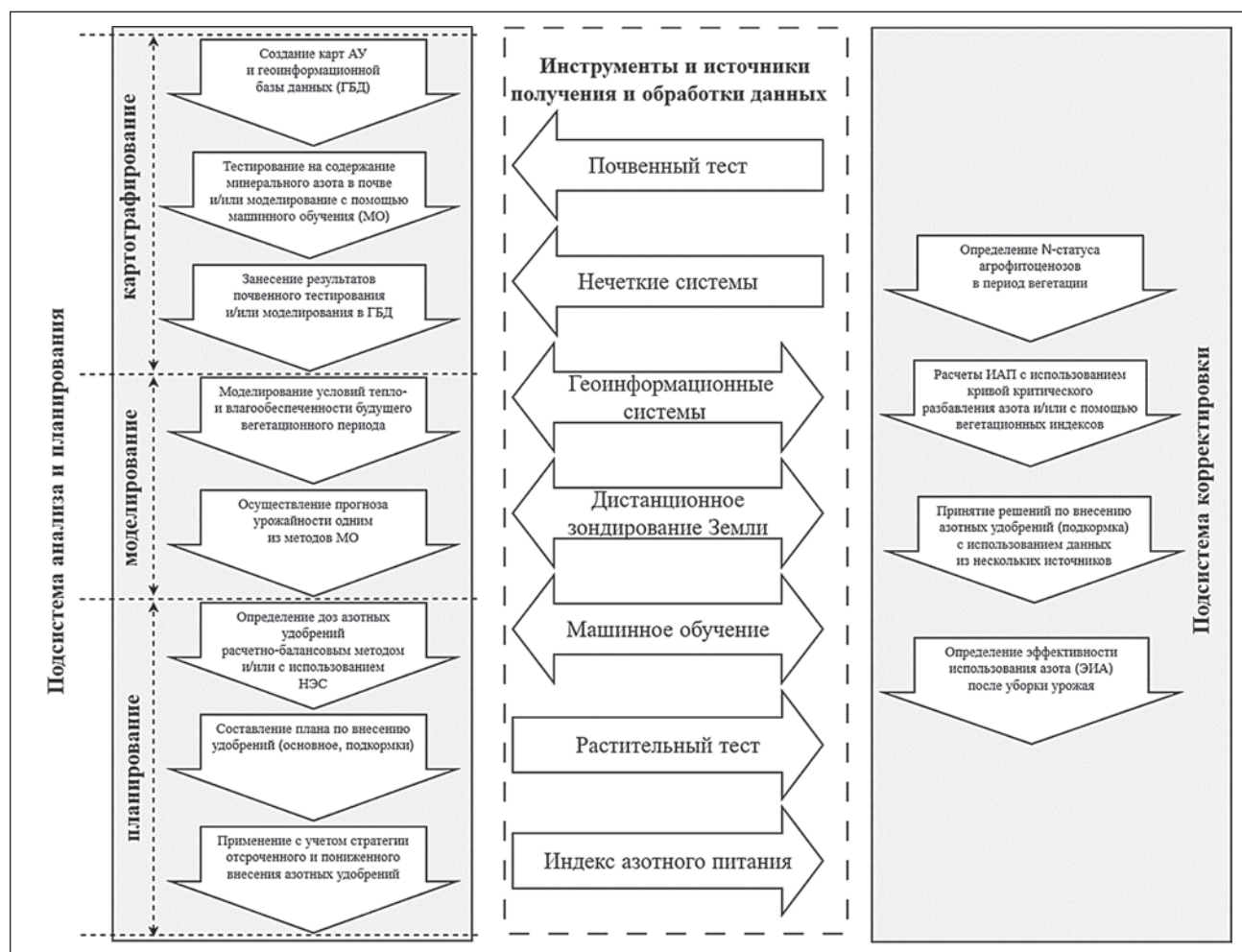


Рис. 2. UML-диаграмма процессов системы ЦУА.

особенностям структуры почвенного покрова, а также экспозиции и кривизны поверхности рабочих участков.

Методологической основой разработки концептуальной модели ЦУА и формирования UML-диаграмм классов и процессов служил когнитивный анализ структуры знаний в ПрО, представленный далее.

Пространственно изменяющиеся биологические, эдафические, топографические и другие факторы, а также их взаимодействия с погодой и агротехнологиями вызывают сезонную и межгодовую временную и пространственную динамику, влияющую на усвоение азота из почвы и удобрений, а также на формирование урожая и его связь с потреблением азота. С такой сложной системой вряд ли можно справиться с использованием параметрических статистических или даже объединенных моделей. Биофизические модели сельскохозяйственных культур, учитывающие эту естественную сложность в управлении азотом, за последние десятилетия сильно продвинулись вперед, но все еще подвержены значительным ограничениям и сложны в исполнении. Существенные достижения в прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур и оценке состояния азота были получены при использовании методов машинного обучения (МО). Это связано со способностью систем, основанных на машинном обучении, обрабатывать большое количество входных данных и решать нелинейные задачи [23, 24]. В рамках этого направления развиваются подходы с использованием нечетких экспертных

систем (НЭС) [25, 26]. Помимо влияния окружающей среды и максимизации урожая, важными динамическими факторами, которые следует учитывать в тактике применения азотных удобрений, выступают производственные (экономические) показатели [27].

В основе системы ЦУА в посевах сельскохозяйственных культур должна лежать синхронизация между спросом на азот и его предложением для конкретной культуры на определенном участке в реальном времени (или близком к реальному). Ее наиболее важные аспекты относятся к параметрам, которые необходимо учитывать, а также к агрономическим алгоритмам, определяющим дозы, сроки и способы внесения азотных удобрений.

Наиболее экономичный принцип управления азотным питанием растений основан на определении ареалов управления (АУ) с аналогичными потенциалами продуктивности посевов. Известны различные подходы к определению их границ, например, структура почвенного покрова, топография, история урожайности на участке. Слои данных с географической привязкой статистически группируют или объединяют с использованием геопространственного анализа в географических информационных системах. При этом определение АУ во многом зависит от данных, которые статичны и менее последовательны из-за временных колебаний урожайности культур. Кроме того, взаимосвязь почвы и растений меняется во времени и пространстве, снижая эффективность статических

конструкций АУ. Для учета всей изменчивости потребности посевов в азоте статистических данных об АУ недостаточно [28]. Основным ограничением при этом выступает слабая адаптация к погодным условиям, обусловленная вариабельностью агрометеорологических ресурсов. В таком контексте метеопредусловия, несмотря на высокую изменчивость и неопределенность, служат важнейшим источником информации для управления азотом. Поэтому представляется маловероятным, что концепция АУ только на основе данных о почве, рельефе и истории урожайности будет адекватной для применения азотных удобрений.

Для преодоления этого ограничения предлагается новый рабочий процесс определения временных границ АУ, основанный на интеграции данных дистанционного зондирования растений и почвы [29]. Для решения такой задачи разработан простой алгоритм автоматической сегментации границ посевов сельскохозяйственных культур различной продуктивности, основанный исключительно на оптических мультиспектральных спутниковых данных [30], осуществлена программная реализация базового алгоритма обнаружения и выделения границ внутривидовой изменчивости по аэрокосмическим снимкам и оптическим критериям посевов [31].

Кроме того, дополнение алгоритмов определения АУ о N-статусе культуры в период вегетации информацией, полученной из спектральных снимков спутниковых или наземных наблюдений, помогает решить проблему пространственной изменчивости и осуществляется одновременно в течение вегетационного периода. Этот подход может быть улучшен путем предварительного разграничения поля на АУ с применением технологий ГИС с анализом свойств почвы и предшествующего использования, для уточнения, связанного с измерением различных индексов.

Почвенная диагностика азотного питания растений в последние годы в системе агрохимической службы РФ выступает одним из основных методов определения потребности сельскохозяйственных культур в азотном удобрении. Однако большая трудоемкость проведения почвенных тестов, противоречивые результаты при различных сроках тестирования и недостаточная изученность размера использования растениями минерального азота из нижних слоев почвы (доступность этого минерального элемента из разных горизонтов почвы в значительной мере зависит от ее гранулометрического состава, морфологических особенностей корневой системы и погодных условий) ограничивает применение такого метода [32]. Кроме того, величина содержания минерального азота в почвах внутри поля значительно варьирует [33]. Пределы ее изменений достигают 10 раз и более не только в дерново-подзолистых почвах, но и в ряде случаев в черноземах. Коэффициенты вариации по объектам исследования составляли 22...87% при отсутствии какой-либо общей закономерности. Для дерново-подзолистых почв коэффициенты вариации находились на уровне 32...69%, серой лесной почвы – 87, чернозема выщелоченного – 24...52, чернозема типичного – 22...59%. Это наблюдается повсеместно. Например, в лесостепной зоне Западной Сибири установлено [34], что коэффициент вариации содержания нитратного азота в зависимости от типа почв изменялся от 2 до 38%. Расчет силы влияния отдельных факторов показал, что вариабельность и динамика нитратного азота в пахотном слое на 21% зависели от типа почвы и на 24% от погодных условий вегетаци-

онного периода. Авторы исследования констатируют, что высокая вариабельность содержания азота делает малоэффективной систему дифференцированного внесения удобрений, в основе которой лежит только определение исходного содержания нитратов по АУ в предпосевной или послеуборочный период. Для устранения внутривидовой неоднородности в течение вегетации предлагается использовать систему некорневых подкормок. В связи с этим, общепринятый в агрохимической службе России подход, основанный на использовании шкал обеспеченности минеральным азотом и применении «ориентировочных» доз азотных удобрений [35, 36], не должен быть базовым, поскольку сопряжен с большим количеством ошибок и неопределенностей. Тем не менее, для реализации системы ЦУА тестирование почвы на содержание минерального азота остается необходимой операцией для составления ориентировочной системы удобрений в хозяйстве и планирования их приобретения.

Наравне с проведением почвенных тестов или вместо них можно использовать модели, полученные с использованием методов машинного обучения, которые позволяют оперативно с допустимой достоверностью ($R^2=0,8$) прогнозировать содержание нитратного азота перед посевом в 0...40 см слое почвы. При этом используются данные о погоде, способе основной обработки почвы, предшественнике и запасе продуктивной влаги перед посевом [37]. Прогнозные градации содержания нитратного азота в почве могут в дальнейшем использоваться при формировании нечетких лингвистических переменных и создании семантических правил в НЭС.

Для повышения эффективности применения азотных удобрений при основном внесении целесообразно использовать их минимальное количество, необходимое для удовлетворения потребностей растений на ранних стадиях роста (стратегия отсроченного и пониженного внесения азотных удобрений). Основано это не только тем, что использование азота удобрений посевами сельскохозяйственных культур в год внесения не превышает 50%, но и вымыванием нитратов в нижние горизонты почвенного профиля. Так, в опытах, проведенных в лесостепи Новосибирского Приобья на выщелоченном черноземе, показано, что при ежегодном внесении под яровую пшеницу азотных удобрений в дозе N_{90} в течение 12 лет в слое почвы 0...200 см дополнительно накопилось ≈ 350 кг $N-NO_3$ /га. При этом большая часть нитратного азота (≈ 270 кг N /га) находилась в слое 100...200 см [38]. Поэтому значительную часть азотных удобрений целесообразно вносить непосредственно перед быстрым экспоненциальным ростом биомассы в процессе вегетации путем подкормки. При таком применении саму культуру можно использовать в качестве индикатора потенциальной потребности в азотных удобрениях.

В качестве логического ядра технологической основы ЦУА целесообразно использовать НЭС, которые относятся к мягким вычислениям. Они обеспечивают простые и эффективные средства для учета множества входных данных в стратегиях автоматизированного управления, обладают относительно высокой надежностью и отказоустойчивостью, поскольку могут справляться с неточностями и неопределенностями во входных параметрах, а также со сложностью и нелинейностью их взаимодействий. В отличие от жестких вычислений, которые требуют точно заданной аналитической модели и часто большого времени для расчетов, при мягких вычислениях используется до-

пуск с неточностями, неопределенностью, частичной достоверностью и аппроксимацией для достижения гибкости, надежности и низкой стоимости решения. Нечеткая логика (FL), искусственные нейронные сети (ANN) и генетические алгоритмы (GA) рассматриваются как основные методы мягких вычислений.

НЭС может применяться в интеграции с ГИС для составления карт АУ и определения необходимости внесения N-удобрений. Например, используя значения содержания минерального азота в почве и применяя шкалу обеспеченности почв $N-NO_3$, создается набор нечетких лингвистических переменных и оценивается принадлежность каждого АУ к таким переменным. Пространственная информация описывается как геопространственные растры (разрешение не более 10 м) и преобразуется в двоичные изображения путем реклассификации ячеек в пределах указанного нечеткого набора. Для моделирования НЭС можно использовать метод вывода Такаги-Сугено, который имеет ряд преимуществ при работе с линейными данными. В базе правил поведения системы определяются взаимосвязи между входными и выходными параметрами. Это делается путем соединения соответствующих лингвистических терминов с использованием условных обозначений «ЕСЛИ (действие) – ТО (результат)». Правилам может быть присвоен вес для выражения их достоверности. Нечеткие выходные данные, полученные в результате используемых правил, агрегируются и дефазифицируются, чтобы получить четкое выходное значение из результатов моделирования [25].

Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур с использованием машинного обучения можно осуществлять с применением различных подходов. Например, использовать временные ряды урожайности, полученные в длительных полевых опытах, и анализировать их с применением алгоритмов случайного леса (Random Forests – RF) [39], дерева решений (CART) [40] или искусственных нейронных сетей (Artificial neural networks – ANN) [41]. Используются также материалы дистанционного зондирования. Например, исследована эффективность прогнозирования урожайности с использованием данных солнечной флуоресценции хлорофилла, которую сравнивали с показателями спутниковых индексов растительности (VI), включая нормализованный разностный индекс растительности (NDVI), улучшенный индекс растительности (EVI), отражательную способность растительности в ближней инфракрасной области (NIRv) и температуру поверхности земли (LST) [42]. Использовали пять алгоритмов машинного обучения для построения моделей прогнозирования урожайности с переменными, относящимися только к дистанционному зондированию и с комбинированными переменными. Следует отметить, что выбор метода (алгоритма) машинного обучения зависит от принятой методологии при решении задачи прогнозирования урожайности, а также качества и количества имеющихся данных или знаний.

Наиболее важно с точки зрения планирования (прогнозирование) урожайности и эффективности азотных удобрений моделирование возможных условий увлажнения и теплообеспеченности. Для этого можно использовать математический инструмент – «стохастический имитатор суточных погодных метеопараметров» [43]. С математической точки зрения он представляет собой специальный алгоритм статистического моделирования (в основу его работы заложена методика Richardson, Wright), который по-

зволяет по набору постоянных параметров, описывающих закономерности погоды в конкретной местности (60-летний временной ряд), получать «синтетические» краткосрочные и долгосрочные погодные сценарии в любом количестве. Долгосрочное прогнозирование условий атмосферного увлажнения, баланса тепла и влаги, можно также осуществлять с использованием относительных величин, например, стандартизованного индекса осадков (SPI) и гидротермического коэффициента (ГТК). Эти показатели зарекомендовали себя в области агроэкологической оценки земель и выступают удобными инструментами для мониторинга атмосферного увлажнения исследуемой территории [44]. Необходимое условие реализации такой задачи – динамический доступ к привязанным к сетке погодным данным высокого разрешения (осадки, максимальная и минимальная температура и др.), которые можно получать от мобильных (полевых) метеостанций в дополнение к информации метеорологических станций базовой сети Гидрометцентра, что позволяет своевременно вносить коррективы в зависимости от конкретного поля.

По нашему мнению, для более устойчивого и эффективного управления применением азотных удобрений старая парадигма, основанная на прогнозировании доступности питательных веществ в почве, оцениваемая с использованием почвенных тестов, должна быть пересмотрена. В последние годы предложен новый подход к питанию сельскохозяйственных культур азотом «диагностики на основе растений» («plant-based diagnosis»), использующий концепцию «кривой критического разбавления азота» («critical N dilution curve») и хорошо подкрепленный теоретической базой. Критическая концентрация N определяется как минимальное требуемое количество азота в растении для достижения максимальной биомассы посевов (урожая). Критическая концентрация N снижается в процессе роста и связана с биомассой посредством аллометрической зависимости. Кривая критического разбавления азота – это отрицательная степенная функция: $N_c = a \cdot CB^{-b}$, где N_c – содержание азота в растении, выраженное в процентах от СВ, СВ – сухое вещество надземной массы растений (т/га), a – концентрация N в СВ при СВ = 1 т/га, b – статистический параметр, влияющий на наклон зависимости. Используя кривые N_c , можно рассчитать индекс азотного питания (ИАП): $ИАП = N_a / N_c$, где N_a – реальное содержание азота в растениях. На основе этого индекса можно точно оценить состояние N в сельскохозяйственных культурах [45]. Значение ИАП, близкое к 1, указывает на достаточность азота, при величине этого показателя ниже или выше 1 указывает на его дефицит или избыток соответственно. Предложены общие модели критических концентраций азота и надземного сухого вещества в культурах C_3 и C_4 , а именно $N_c = 4,8CB^{-0,34}$ и $N_c = 3,6CB^{-0,346}$, а также для многих культур (кукуруза, озимая и яровая пшеница, рапс, сорго, рис и др.). Например, для яровой пшеницы, возделываемой в Канаде, кривая критического разбавления азота выглядит следующим образом: $N_c = 3,85CB^{-0,57}$ [46]. Диагностика *in situ* помогает определить, когда и в каком количестве необходимо применение азотных удобрений, и может быть включена в процедуры управления внесением удобрений.

Хотя этот метод обладает достаточно высокой точностью, он очень трудоемкий, дорогостоящий и отнимает много времени, поэтому будет сопряжен с определенными трудностями для оценки во всех

конкретных АУ. С целью преодоления такого негативного фактора в последние годы активно развивается направление определения ИАП неразрушающими методами. Например, его можно оценить удаленно с использованием оптического зондирования [47]. Это возможно на основе анализа взаимосвязи между вегетационными индексами и пространственно распределенными значениями концентрации азота в сухом веществе растений. Показано [48], что наиболее эффективно прецизионное проведение азотных подкормок по картам-заданиям, сгенерированным на основе аэрофотоснимков посевов, дешифрированных с использованием тестовых площадок.

В развитие такого направления разрабатываются модели, использующие данные из нескольких источников. Они могут интегрировать климатические условия и управляющие факторы с вегетационным индексом, или взаимосвязи между значениями индексов вегетации, содержания хлорофилла в листьях, площади листьев, концентрации N в растениях, биомассы и ИАП с использованием возможностей ГИС и различных алгоритмов машинного обучения. Например, известен [49] гибридный метод определения содержания азота в культурах, использующий физический подход в сочетании с регрессией машинного обучения по гиперспектральным снимкам. При его реализации использовали вероятностные методы машинного обучения (стандартный гомоскедастический гауссовский процесс и гетероскедастическая регрессия), учитывающие отношения сигнал/шум. Обе рассмотренные модели обеспечивали точное моделирование, при этом результаты гетероскедастической модели были несколько лучше с точки зрения ее тестирования с использованием измерения азота *in situ* в листьях и стеблях (RMSE составила 2,1 г/м²).

Сложность определения эффективности использования азота (ЭИА) заключается во множестве его источников, которые могут быть задействованы при формировании биомассы агрофитоценозов и урожая зерна. Существуют различные подходы к определению ЭИА: растительный (физиологическая эффективность, эффективность внутреннего использования, индекс накопления азота), почвенный (эффективность поглощения азота), экологический (продуктивность по азоту), системный (индекс азотного баланса системы), на основе удобрений (агрономическая эффективность, производительность частичного фактора, частичный баланс питательных веществ, кажущаяся эффективность извлечения). Общая эффективность использования азота посевами включает в себя как эффективность поглощения, так и эффективность использования и может быть рассчитана по формуле: $ЭПА \times ЭИА = N_z / N_p \times V_3 / N_z = V_3 / N_p$, где ЭПА – эффективность поглощения азота; ЭИА – эффективность использования азота; N_z – общий азот в зерне; N_p – общий азот, поступивший в растения; V_3 – общая масса зерна. Другой подход заключается в определении соотношения размеров сухого вещества надземной биомассы (СВ) и поступившего (поглощенного) азота (N_p). При определении ЭИА можно также воспользоваться агрономической эффективностью, которая рассчитывается по формуле: $AЭ = (Y - Y_0) / N$, где Y – урожайность культуры при внесении азота (кг/га); Y_0 – урожайность культуры на контрольном участке, без внесения азота (кг/га); N – количество азота в удобрениях (кг/га). Оценку эффективности использования азота удобрений сельскохозяйственными культурами можно также осуществить с использованием других методов [1].

Важным аспектом системы ЦУА должно быть использование не только ГБД и системы знаний, но и экспертных знаний специалистов на местах. В своей повседневной работе им необходимо учитывать природные, технические и экономические факторы, а за многие годы профессионального опыта и дополнительного образования они накапливают объем важных ситуационных знаний о причинно-следственных связях в своих местных системах земледелия, которые с научной точки зрения недоступны. У таких специалистов формируются так называемые «неявные знания», которые не всегда могут быть сформулированы в закодированной форме. Они ассоциируются с опытом и ноу-хау человека, который ими обладает, и заключаются в действиях, процедурах, образах, идеях и ценностях этого человека [50]. Эти знания необходимо рассматривать как важный источник информации для анализа и объединения различных соответствующих слоев пространственных данных и определения моделей системы ЦУА. Такие возможности открываются при реализации концепции «гражданская наука», которая реализуется в странах с развитым информационным обслуживанием сельского хозяйства.

Выводы. Проблемы, с которыми сталкивается концепция ЦУА, связаны с точным отображением и анализом сложных взаимосвязей, а также разработкой соответствующих моделей для управления азотным питанием растений. Сбор и согласование данных, необходимых для этого, могут быть достигнуты с использованием соответствующего ПО, которое учитывает и документирует потоки N на уровне АУ. Программное обеспечение должно включать научно обоснованные алгоритмы и практически применимые агроэкологические показатели, а также настраиваться в соответствии с индивидуальными потребностями пользователя.

Особенность созданной концептуальной модели заключается в использовании принципа темпоральности и необходимости синхронизации между спросом на азот у растений и его предложением в реальном времени, а также принципа индивидуальности для конкретного посева на определенном участке. В концептуальной модели отражены наиболее важные блоки системы, которые необходимо учитывать, при определении доз, сроков и способов внесения азотных удобрений.

Согласно разработанной концептуальной модели, предлагаются следующие необходимые действия для реализации системы ЦУА:

- создание карт АУ и геоинформационной базы данных (ГБД), учитывающих агрометеорологические (погодные) и агроландшафтные особенности территории;
- тестирование почвы на содержание минерального азота и/или его моделирование с использованием машинного обучения;
- занесение результатов почвенного тестирования и/или моделирования в ГБД;
- прогноз урожайности одним из методов машинного обучения;
- моделирование условий тепло- и влагообеспеченности с использованием стохастического имитатора суточных погодных метеопараметров и/или применения SPI и ГТК;
- определение доз азотных удобрений расчетно-балансовым методом или с использованием нечетких экспертных систем;
- составление плана по внесению удобрений (основное, подкормки);

применение азотных удобрений с учетом стратегии отсроченного и пониженного внесения;

определение N-статуса растений посевов сельскохозяйственных культур в период вегетации посредством дистанционного (или проксимального) зондирования;

расчеты ИАП с использованием кривой критического разбавления азота и/или вегетационных индексов;

принятие решений по внесению азотных удобрений во время вегетации с использованием данных из нескольких источников;

определение эффективности использования азота (ЭИА) после уборки урожая.

Концептуальная модель системы ЦУА объединяет две ключевые подсистемы – подсистему анализа и планирования, а также подсистему корректировки – для обеспечения более эффективного управления азотным питанием растений и позволяет приступить к разработке ПО. Оптимизация концептуальной модели ЦУА, описываемая с использованием диаграмм классов и процессов, со временем может быть расширена путем локального уточнения с последующим добавлением новых классов и элементов UML.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий» по теме № 0533–2022–0001.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют результаты исследований человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Эффективность использования азота в длительных и краткосрочных опытах агрохимслужбы и Геосети Российской Федерации / В. А. Романенков, М. В. Беличенко, О. В. Рухович и др. // *Агрохимия*. 2020. № 12. С. 28–37. doi: 10.31857/S0002188120120091.
2. Rütting T., Aronsson H., Delin S. Efficient use of nitrogen in agriculture // *Nutrient cycling in Agroecosystems*. 2018. Vol. 110. No. 1. P. 1–5. doi: 10.1007/s10705-017-9900-8. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10705-017-9900-8.pdf> (дата обращения: 07.10.2023).
3. Ермохин Ю. И. Почвенная диагностика минерального питания яровой пшеницы в условиях Западной Сибири // *Мир Инноваций*. 2015. № 1–4. С. 67–72.
4. Спектрометрическое обеспечение диагностики азотного питания растений и идентификации азота органических и минеральных удобрений / Р. А. Афанасьев, В. В. Носиков, В. А. Литвинский и др. // *Плодородие*. 2019. № 4 (109). С. 26–29.
5. Ерошенко Ф. В., Сторчак И. Г., Чернова И. В. Оценка состояния растений методами экспресс-диагностики // *Аграрный вестник Урала*. 2019. № 7 (186). С. 19–25. doi: 10.32417/article_5d52af440f71b8.16701399.
6. Программа для ЭВМ автоматизированного расчёта оптимальных доз минеральных удобрений под планируемую урожайность основных сельскохозяйственных культур в условиях Нечерноземья / В. Г. Сычев, Р. А. Афанасьев, Л. М. Державин и др. Номер регистрации (свидетельства): 2015615582. Дата регистрации: 21.05.2015.
7. Программа «Расчет оптимальной дозы

- пропорционально-дифференцированного внесения удобрений» / А. Ю. Измайлов, С. А. Белых, Г. И. Личман и др. Номер регистрации (свидетельства): 2016611615. Дата регистрации: 05.02.2016.
8. Расчет доз внесения минеральных удобрений / С. М. Васильев, А. Н. Бабичев, В. А. Монастырский и др. Номер регистрации (свидетельства): 2018663750. Дата регистрации: 02.11.2018.
 9. Пономаренко И. Г., Забродин В. П., Портаков А. Б. Расчёт нормы внесения минеральных удобрений v2.0 / Номер регистрации (свидетельства): 2021613345. Дата регистрации: 05.03.2021.
 10. Conceptual Design of a Comprehensive Farm Nitrogen Management System / F. Weckesser, F. Leßke, M. Luthardt, et al. // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. No. 12. P. 2501. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/12/2501> (дата обращения: 03.07.2023). doi: 10.3390/agronomy11122501.
 11. Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil – crop model for plant, water and nitrogen outputs: evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France / E. Coucheney, S. Buis, M. Launay, et al. // *Environmental Modelling & Software*. 2015. Vol. 64. P. 177–190. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.11.024.
 12. NLESS – An empirical model for estimating nitrate leaching from the root zone of agricultural land / C. D. Børgesen, J. W. M. Pullens, J. Zhao, et al. // *European Journal of Agronomy*. 2022. Vol. 134. P. 126465. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030122000132/pdf> (дата обращения: 28.07.2023). doi: 10.1016/j.eja.2022.126465.
 13. Dynamic model improves agronomic and environmental outcomes for maize nitrogen management over static approach / S. Sela, H. M. van Es, B. N. Moebius-Clune, et al. // *Journal of Environmental Quality*. 2017. Vol. 46. P. 311–319. doi: 10.2134/jeq2016.05.0182.
 14. Goffart J. P., Olivier M., Frankinet M. Crop nitrogen status assessment tools in a decision support system for nitrogen fertilization management of potato crops // *HortTechnology*. 2011. Vol. 21. No. 3. P. 282–286. doi: 10.21273/HORTTECH.21.3.282.
 15. Assessing and modeling economic and environmental impact of wheat nitrogen management in Belgium / B. Dumont, B. Basso, B. Bodson, et al. // *Environmental Modelling & Software*. 2016. Vol. 79. P. 184–196. doi: 10.1016/j.envsoft.2016.02.015.
 16. A Dynamic Decision-Making Tool for Calculating the Optimal Rates of N Application for 40 Annual Crops While Minimising the Residual Level of Mineral N at Harvest / J.-M. Machet, P. Dubrulle, N. Damay, et al. // *Agronomy*. 2017. Vol. 7. No. 4. P. 73. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/7/4/73> (дата обращения: 05.06.2023). doi: 10.3390/agronomy7040073.
 17. Сорокин А. Б. Концептуальное проектирование интеллектуальных систем поддержки принятия решений // *Онтология проектирования*. 2017. Т. 7. № 3 (25). С. 247–269.
 18. Объектно-ориентированный подход к разработке моделей данных / Е. П. Емельченков, В. И. Мунерман, Д. В. Мунерман и др. // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2020. Т. 16. № 3. С. 564–574. doi: 10.25559/SITITO.16.202003.564-574.
 19. Буч Г., Рамбо Д., Якобсон А. Язык UML. Руководство пользователя. Второе издание. М.: ДМК Пресс, 2006. 496 с.
 20. Carpendale S. Process diagrams // *arXiv preprint arXiv:2209.11765*. 2022. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2209/2209.11765.pdf>. (дата обращения: 05.09.2023).

21. Maker F. Online Diagram Software // Flowchart Maker & Online Diagram Software. URL: <https://app.diagrams.net/> (дата обращения: 05.09.2023).
22. Temporal GIS models for cadastral data management: the knowns, unknowns and future / J. Mango, J. Ngondo, D. Xu, et al. // Survey Review. 2023. Vol. 55. No. 390. P. 233–246. doi: 10.1080/00396265.2022.2049104.
23. Chlingaryan A., Sukkarieh S., Whelan B. Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review // Computers and electronics in agriculture. 2018. Vol. 151. P. 61–69. doi: 10.1016/j.compag.2018.05.012.
24. Comparing Random Forest to Bayesian Networks as nitrogen management decision support systems / J. Sulik, K. Banger, K. Janovicek, et al. // Agronomy Journal. 2023. Vol. 115. No. 3. P. 1431–1446. doi: 10.1002/agj2.21320.
25. Modeling and simulation of a multi-parametric fuzzy expert system for variable rate nitrogen application / A. Heiß, D. S. Paraforos, G. M. Sharipov, et al. // Computers and Electronics in Agriculture. 2021. Vol. 182. P. 106008. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169921000260/pdf> (дата обращения: 08.12.2023). doi: 10.1016/j.compag.2021.106008.
26. Nithiya S., Annapurani K. Optimised fertiliser suggestion in smart agriculture system based on fuzzy inference rule // Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science. 2021. Vol. 71. No. 3. P. 191–201. doi: 10.1080/09064710.2021.1872695.
27. Versatile and user-centered concept for temporally and spatially adapted nitrogen application based on multiple parameters / A. Heiß, D. S. Paraforos, G. M. Sharipov, et al. // European Journal of Agronomy. 2023. Vol. 145. P. 126792. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030123000606/pdf> (дата обращения: 04.11.2023). doi: 10.1016/j.eja.2023.126792.
28. Sharma L. K., Bali S. K. A Review of Methods to Improve Nitrogen Use Efficiency in Agriculture // Sustainability. 2018. Vol. 10. No. 1. P. 51. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/51/pdf?version=1514284702> (дата обращения: 01.10.2023). doi: 10.3390/su10010051.
29. Workflow to Establish Time-Specific Zones in Precision Agriculture by Spatiotemporal Integration of Plant and Soil Sensing Data / E. Scudiero, P. Teatini, G. Manoli, et al. // Agronomy. 2018. Vol. 8. No. 11. P. 253. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/8/11/253/pdf?version=1541586725> (дата обращения: 01.05.2023). doi: 10.3390/agronomy8110253.
30. Automatic delineation algorithm for site-specific management zones based on satellite remote sensing data / C. Georgi, D. Spengler, S. Itzerott, et al. // Precision Agriculture. 2018. Vol. 19. P. 684–707. doi: 10.1007/s11119-017-9549-y.
31. Автоматизация процесса обнаружения и выделения границ внутривидовой изменчивости по аэрокосмическим снимкам и оптическим критериям / В. П. Якушев, А. Ф. Петрушин, В. В. Якушев и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 151–162. doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-161-162.
32. Кидин В. В. Основы питания растений и применения удобрений. М.: РГАУ-МСХА, 2008. 415 с.
33. Шафран С. А., Леонова Е. В., Пупынин В. М. Внутривидовая вариабельность элементов питания в почвах и ее влияние на урожайность озимых зерновых культур // Агрохимия. 2011. № 2. С. 15–23.
34. Ренев Е. П., Еремин Д. И. Внутривидовая и временная вариабельность нитратного азота на полях Западной Сибири // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2021. № 12 (177). С. 116–124. doi: 10.36718/1819-4036-2021-12-116-124.
35. Гамзиков Г. П. Практические рекомендации по почвенной диагностике азотного питания полевых культур и применению азотных удобрений в сибирском земледелии: производственно-практ. изд. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. 48 с.
36. Гамзиков Г. П. Почвенная диагностика азотного питания растений и применения азотных удобрений в севооборотах // Плодородие. 2018. № 1 (100). С. 8–14. doi: 10/25680/S19948603.2018.100.02.
37. Прогнозирование содержания нитратного азота в почве с использованием машинного обучения / В. К. Каличкин, Т. А. Лужных, В. С. Риксен и др. // Сибирский вестн. с.-х. науки. 2021. Т. 51. № 5. С. 91–100. doi: 10.26898/0370-8799-2021-5-11.
38. Шарков И. Н., Колбин С. А., Самохвалова Л. М. Проблема азота при использовании чернозема выщелоченного по интенсивной технологии в лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2021. № 2. С. 3–10. doi: 10.31857/S0002188121020101.
39. Машинное обучение в качестве инструмента прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур / П. К. Куценогий, В. К. Каличкин, А. Л. Пакуль и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 1. С. 72–75. doi: 10.31857/S2500262721010178.
40. Разработка программ анализа и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур / В. К. Каличкин, Д. С. Федоров, О. К. Альсова и др. // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36. № 1. С. 51–56. doi: 10.53859/02352451_2022_36_0_0.
41. Прогнозирование урожайности яровой пшеницы на основе использования нейронной сети в условиях лесостепи Приобья / К. Ю. Максимович, Д. С. Федоров, В. К. Каличкин и др. // Южно-Сибирский научный вестник. 2022. № 6. С. 333–338.
42. Assessing the benefit of satellite-based Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence in crop yield prediction / B. Peng, K. Guan, W. Zhou, et al. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2020. Vol. 90. P. 102126. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243419313029/pdf> (дата обращения: 08.09.2023). doi: 10.1016/j.jag.2020.102126.
43. Использование динамической модели агроэкосистемы для оценки влияния климатических изменений на продуктивность посевов / Р. А. Полуэктов, А. Г. Топаж, В. П. Якушев и др. // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. № 2. С. 7–12.
44. О возможности использования стандартизованного индекса осадков для выявления засух и в прогнозах количественной оценки урожайности зерновых и зернобобовых культур / А. Страшная, В. А. Тищенко, О. В. Береза (Чуб) и др. // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. № 357. С. 81–97.
45. Remote Monitoring of Crop Nitrogen Nutrition to Adjust Crop Models: A Review / L. Silva, L. A. Conceição, F. C. Lidon, et al. // Agriculture. 2023. Vol. 13. No. 4. P. 835. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/4/835/pdf?version=1680862563> (дата обращения: 08.10.2023). doi: 10.3390/agriculture13040835.
46. Determination of a critical nitrogen dilution curve for spring wheat / N. Ziadi, G. Bélanger, A. Claessens, et al. // Agronomy Journal. 2010. Vol. 102. No. 1. P. 241–250. doi: 10.2134/agronj2009.0266.

47. Aranguren M., Castellón A., Aizpurua A. Crop sensor based non-destructive estimation of nitrogen nutritional status, yield, and grain protein content in wheat // *Agriculture*. 2020. Vol. 10. No. 5. P. 148. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/5/148/pdf?version=1590567529> (дата обращения: 08.10.2023). doi: 10.3390/agriculture10050148.
48. Матвеев Д. А., Якушев В. В., Якушев В. П. Прецизионное управление азотным режимом яровой пшеницы на основе дистанционного зондирования посевов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 3. С. 79–86. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-79-86.
49. Retrieval of aboveground crop nitrogen content with a hybrid machine learning method / K. Berger, J. Verrelst, J. B. Féret, et al. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. Vol. 92. P. 102174. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243420303500/pdf> (дата обращения: 08.09.2023). doi: 10.1016/j.jag.2020.102174.
50. Chergui W., Zidat S., Marir F. An approach to the acquisition of tacit knowledge based on an ontological model // *Journal of King Saud University-computer and information sciences*. 2020. Vol. 32. No. 7. P. 818–828. doi: 10.1016/j.jksuci.2018.09.012.

Поступила в редакцию 07.10.2023

После доработки 15.11.2023

Принята к публикации 12.12.2023

МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ДИАГНОСТИКИ БОЛЕЗНЕЙ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР (НА ПРИМЕРЕ *PYRENOPHORA TERES* ОЗИМОГО ЯЧМЕНЯ)

И. В. Ариничев¹, кандидат экономических наук, **И. В. Ариничева**², доктор биологических наук,
Г. В. Волкова³, член-корреспондент РАН, доктор биологических наук,
Я. В. Яхник³, аспирант

¹Кубанский государственный университет,
350040, Краснодар, ул. Ставропольская, 149

²Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина,
350044, Краснодар, ул. Калинина, 13

³Федеральный научный центр биологической защиты растений,
350039, Краснодар, п/о 39
E-mail: galvol.bpp@yandex.ru

Исследования проводили с целью обоснования возможности использования цифровых интеллектуальных технологий при прогнозировании развития сетчатой пятнистости озимого ячменя. Предложенный подход представляет собой бинарное дерево решений, способное прогнозировать сценарии развития сетчатой пятнистости: депрессивное, умеренное и эпифитотийное. Для настройки параметров алгоритма в 2021–2023 гг. были проведены полевые и лабораторные опыты по подготовке данных. В качестве входных факторов, фиксируемых в выборке, использовали наблюдаемую степень пораженности листьев, тип устойчивости сорта, фазу вегетации, в которую произошло первичное заражение, среднюю относительную влажность воздуха за фазу вегетации, в которой произошло заражение. Общий объем выборки составил 144 наблюдения. Обученная модель показала высокое качество классификации как на обучающей, так и на тестовой выборке с долей правильных ответов более 96%. Согласно результатам статистической оценки важности факторов, влияющих на развитие сетчатой пятнистости ячменя, наибольшим весом обладает текущая пораженность листьев (74,3%), второй по важности фактор – средняя относительная влажность воздуха (11,9%), далее следуют устойчивость сорта к болезни (10,4%) и фаза вегетации, в которую произошло заражение (3,4%). Предложенное решение имеет важное практическое значение, так как предоставляет новые возможности для процесса диагностики сетчатой пятнистости озимого ячменя, среди которых: высокая скорость диагностики, точность составления прогнозов, применимость в полевых условиях.

AI SOLUTIONS FOR DIGITAL DIAGNOSTICS OF DISEASES OF GRAIN CROPS (USING THE EXAMPLE OF *PYRENOPHORA TERES* OF WINTER BARLEY)

I. V. Arinichev¹, **I. V. Arinicheva**², **G. V. Volkova**³, **Y. V. Yakhnik**³

¹Kuban State University,
350040, Krasnodar, ul. Stavropol'skaya, 149

²Trubilin Kuban State Agrarian University,
350040, Krasnodar, ul. Kalinina, 13

³Federal Research Center of Biological Plant Protection,
350039, Krasnodar, p/o 39
E-mail: galvol.bpp@yandex.ru

The aim of the research is to justify the feasibility of using digital intelligent technologies in forecasting the development of spot blotch in winter barley. The AI solution developed is a binary decision tree capable of predicting scenarios of net blotch development: depressive, moderate, and epiphytotic. To configure the algorithm's parameters from 2021 to 2023, field and laboratory experiments were conducted at the Federal Scientific Center for Biological Plant Protection. The data preparation involved several stages, including setting up field plots to create an artificial infection background, preparing an inoculum, sowing highly susceptible and resistant winter barley varieties, and artificial inoculation. The selected input factors included the observed degree of leaf damage, type of variety resistance, vegetation phase at the time of primary infection, average relative air humidity during the vegetation phase of infection. The total sample size comprised 144 observations. The trained model demonstrated high classification accuracy on both the training and test datasets, with an accuracy rate exceeding 96%. Based on a statistical assessment of the factors influencing the development of spot blotch in barley, it is shown that the most influential factor is the current degree of leaf infection (74,3%), followed by the average relative air humidity (11,9%), the variety's resistance to the disease (10,4%), and the stage development during which infection occurred (3,4%). The proposed solution holds significant practical importance as it provides new opportunities for the diagnostic process of spot blotch in winter barley. Among these are high diagnostic speed, accuracy in forecast predictions, and applicability in field conditions.

Ключевые слова: зерновое производство, озимый ячмень (*Hordeum vulgare* L.), сетчатая пятнистость (*Pyrenophora teres*), цифровая диагностика, искусственный интеллект.

Key words: grain production, winter barley (*Hordeum vulgare* L.), spot blotch (*Pyrenophora teres*), digital diagnostics, artificial intelligence.

Зерновое производство – наиболее крупная подотрасль сельского хозяйства, устойчивое развитие которой играет критическую роль в достижении продовольственной безопасности страны и имеет страте-

гическое значение в решении ряда задач, среди которых обеспечение населения страны безопасной, качественной и доступной сельскохозяйственной продукцией, создание рабочих мест в сельских районах, развитие

аграрной инфраструктуры, укрепление экономического положения страны на мировых рынках и др. Зерновые культуры, такие как пшеница, ячмень, рис и кукуруза, служат фундаментом мирового продовольственного рынка, обеспечивая стабильный поток продуктов как для внутреннего потребления, так и для экспорта.

Несмотря на устойчивый прирост валового сбора зерна за последние 5 лет (со 113,3 млн т в 2018 г. до 157,7 млн т в 2022 г.) [1] и уверенное превышение порогового значения доли зерна отечественного производства, определенного Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации на уровне 95 % (в 2022 г. уровень самообеспеченности превысил 150%) [2], перед отраслью возникают новые все более серьезные вызовы, самый значимый из которых – угроза фитосанитарному состоянию посевов.

Среди основных факторов массового распространения болезней и вредителей на посевах зерновых решающее значение имеют следующие:

ухудшение погодно-климатических условий, включая повышение среднегодовых температур на большей части зернопроизводящих регионов, непредвиденные и продолжительные осадки в более поздние сроки вегетации, экстремальные погодные явления (засухи, наводнения и аномальные температуры), которые способствуют распространению болезней и вредителей;

частое и несвоевременное использование химических средств защиты растений, которое приводит к развитию резистентности болезнетворных организмов к применяемым препаратам, делает обычные методы борьбы менее эффективными и требует более интегрированных подходов;

монокультура, способствующая накоплению патогенов и вредителей в почве, что увеличивает риск распространения болезней и усугубляет проблемы с фитосанитарным состоянием;

недостаточное внимание к системе мониторинговых мероприятий, осуществляемых в рамках производственной деятельности и имеющих решающее значение для обнаружения, прогнозирования и контроля фитосанитарного состояния посевов.

Не вызывает сомнений, что решение одной из главных проблем зернового производства – массового распространения болезней и вредителей – невозможно без перехода к инновационным методам ведения производства. Сегодня на передний план всех инновационных решений выходит искусственный интеллект, определяющий ядро таких инноваций и обладающий огромным потенциалом для цифровой трансформации.

Освоение интеллектуальных решений открывает новые возможности для повышения устойчивости, снижения зависимости и минимизации ручного труда и, следовательно, увеличивает эффективности всей отрасли, что способствует решению сложных вызовов и обеспечению продовольственной безопасности хозяйства, региона, страны [3].

Ранее была проведена интеллектуальная диагностика сетчатой пятнистости ячменя, вызываемой грибом *Pyrenophora teres* Drechsler, одним из доминантных патогенов в ценозе культуры, как на юге России, так и во всем мире. Ежегодные потери урожая от его воздействия составляют от 15 до 50%, а частота эпифитотий – 5 раз в 10 лет. При благоприятном сочетании факторов (погода, восприимчивость сорта, фаза вегетации) распространенность болезни может достигать до 100%, развитие – 50...90% [4, 5].

Актуальность цифровой диагностики сетчатой пятнистости обусловлена малой эффективностью

классических методов борьбы с этим заболеванием, включающих агротехнологические приемы, протравливание семян, возделывание устойчивых сортов и др. Гарантированное сохранение урожая можно обеспечить только путем применения эффективных фунгицидов. При этом контрольной точкой в процессе производства служит принятие решения о целесообразности их использования в конкретный заданный промежуток времени.

Для поддержки принятия таких решений ранее были разработаны модели на основе искусственного интеллекта (ИИ-модели), с использованием которых были решены задачи обнаружения и классификации *Pyrenophora teres*, по отношению к другим видам болезней со схожими симптомами [6], а также локализации пораженных участков и определения степени пораженности листьев [7], что служит одним из основных сигналов для применения химических средств защиты.

Однако, наряду с перечисленными задачами, где ИИ-решения уже показали высокие результаты, как вследствие сокращения времени диагностики, так и благодаря росту доли числа точных прогнозов, высокой практической ценности и актуальностью обладают вопросы, связанные с прогнозированием развития болезни. Важно не просто диагностировать заболевание и констатировать степень пораженности растений на текущий момент, но и составить прогноз течения болезни.

Цель исследования – обосновать возможность использования цифровых интеллектуальных технологий в процессе прогнозирования развития сетчатой пятнистости озимого ячменя.

Методика. Для достижения поставленной цели в 2021–2023 гг. на площадках ФГБНУ ФНЦБЗР были выполнены полевые и лабораторные исследования, предусматривающие заражение растений популяцией *Pyrenophora teres*; мониторинг первичного проявления и динамики развития. В исследованиях использовали 3 сорта озимого ячменя (Виват, Рубеж, Романс), высеваемых на юге России и отличающихся по устойчивости к возбудителю сетчатой пятнистости (устойчивые и восприимчивые). При проведении экспериментов использовали классические фитопатологические методы и подходы. Идентификацию *P. teres* осуществляли по определителю Билай В. И. [8]. Нарработку инокулюма гриба и инокуляцию в фазе полного кушения в полевых условиях осуществляли по стандартным методикам [9]. Учеты проводили начиная с первичного проявления заболевания и до фазы молочно-восковой спелости зерна с интервалом 10...12 суток. Степень пораженности листьев и других органов сетчатой пятнистостью определяли по шкале Э. Э. Гешеле.

В качестве входных факторов модели, фиксируемых в процессе реализации опыта и влияющих на степень развития сетчатой пятнистости, использовали наблюдаемую степень пораженности листьев (%); тип устойчивости сорта (У = устойчивый, В = восприимчивый); фаза вегетации, в которую произошло первичное заражение (кущение, выход в трубку, флаг-лист); средняя относительная влажность воздуха за фазу вегетации, в которой произошло заражение (%).

Выходная целевая переменная – степень развития болезни в фазе ранней молочной спелости со следующими возможными значениями: Д – депрессия, У – умеренное развитие, Э – эпифитотия. Метки классов результирующей переменной были выбраны на основе работы [10], авторы которой прогнозировали фитосанитарное состояние посевов пшеницы.

Объем выборки в общей сложности составил 144 наблюдения, соответствующих различным комбинациям искомым признаков. Из них случайным образом 115 объектов использовали в качестве тренировочного набора и 29 – для итоговой оценки качества модели. Разбиение выборки на обучающую и тестовую – важный этап методологии машинного обучения и прикладной статистики, цель которого заключается в оценке производительности модели и ее обобщающей способности. Основная идея, стоящая за таким разбиением, «спрятать» от алгоритма часть данных, которые используют при настройке параметров модели, чтобы на нужном этапе выполнить на них проверку качества. Если модель может делать точные прогнозы на тестовой части данных, которые ранее не подавались на вход, то с ее использованием возможно обобщение и применение знаний, полученных в процессе обучения, к новым данным.

В процессе анализа пригодности различных моделей для прогнозирования развития сетчатой пятнистости озимого ячменя в качестве базового было выбрано семейство алгоритмов деревьев решений. Обучение итоговой модели, детерминирующей объекты выборки по разным классам развития сетчатой пятнистости, проводили в соответствии с общепринятыми методами машинного обучения (стохастического градиентного спуска, обратного распространения ошибки и др.).

Результаты и обсуждение. Выбор деревьев решений для прогнозирования развития сетчатой пятнистости озимого ячменя обоснован несколькими ключевыми причинами:

древовидные алгоритмы предоставляют четкие и интерпретируемые результаты. Это особенно важно для сельского хозяйства, где товаропроизводители должны составлять прогнозы без использования специальных программных средств. При использовании выбранного алгоритма достаточно пройти из корневой вершины к одной из конечных, проверяя соблюдение условий в узлах модели, и получить прогноз развития болезни;

применение дерева решений дает возможность относительно быстро обрабатывать как небольшие, так и огромные объемы данных, что позволяет в конечном итоге оперативно выполнять предиктивную функцию;

деревья решений могут масштабироваться под новые условия и требования задачи, что делает их пригодными для разнообразных ситуаций, в частности, для других культур и их патогенов;

модели на основе деревьев решений могут работать с категориальными признаками, не имеющими выражения в числовой шкале, что особенно ценно для аграрного производства, где качественные факторы часто выступают предикторами. В нашем случае к типу категориальных относились два из четырех факторов.

При построении дерева решения использовали рекурсивную процедуру машинного обучения *Induction of Decision 3* (ID3). Наиболее важным ее шагом выступает поиск предиката (бинарной функции), который ставится в соответствие каждой внутренней вершине дерева и разделяет в ней выборку на две части. Он сводится к оптимизации информационного критерия ветвления – специальной метрики, помогающей алгоритму определить, какой признак лучше использовать для разделения данных на каждом уровне дерева.

В работе использовали наиболее распространенный и часто применяемый критерий Джини, показывающий сколько пар объектов, лежащих в одном и том же классе, одновременно попадут либо в левую, либо в правую дочернюю вершину дерева (значения предиката на них совпадают):

$$I(\beta, X^l) = \#\{(x_i, x_j) : y_i = y_j, \beta(x_i) = \beta(x_j)\},$$

где X^l – обучающая выборка, x_i, x_j – признаки (факторы) объектов обучающей выборки, β – предикат, $\#$ – оператор, подсчитывающий количество пар, удовлетворяющих условию.

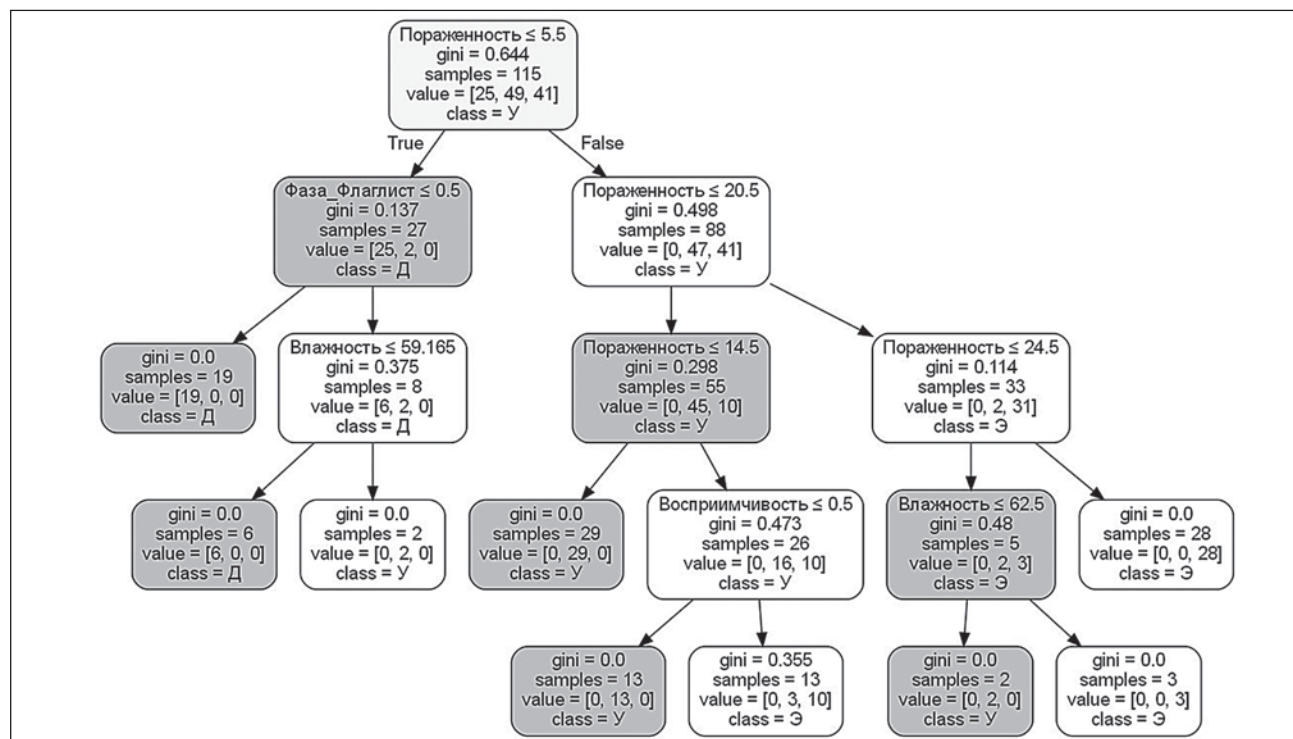


Рис. 1. Обученное дерево решений, прогнозирующее развитие сетчатой пятнистости озимого ячменя.

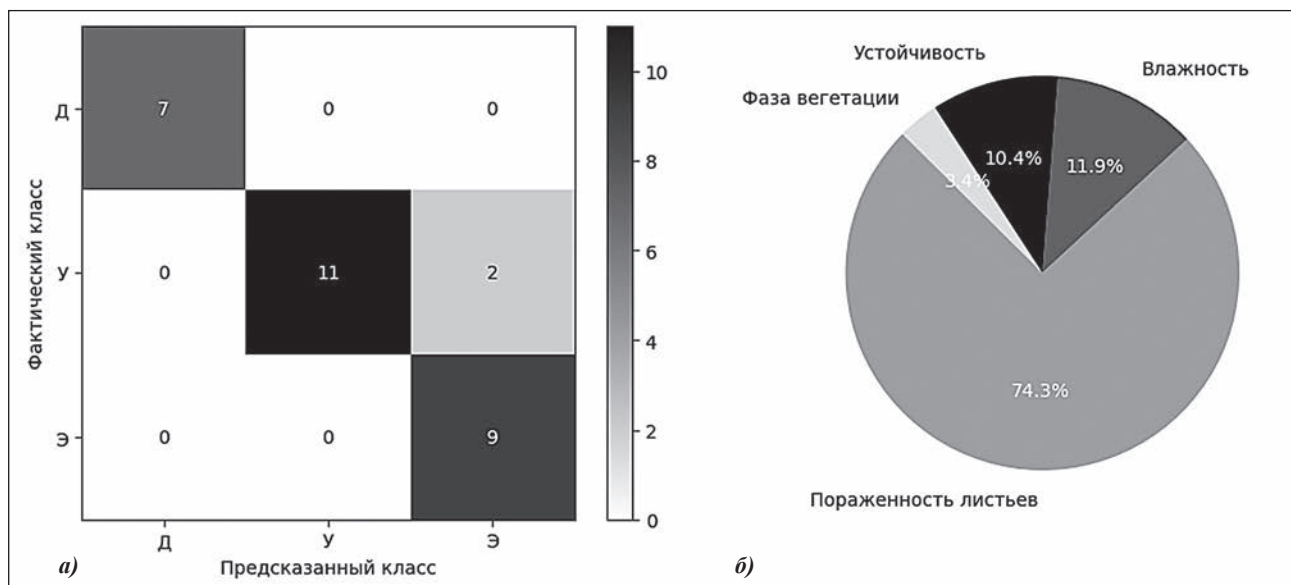


Рис. 2. Результаты моделирования:
а) матрица ошибок алгоритма; б) важность факторов при моделировании.

Построение модели прогноза сетчатой пятнистости осуществляли на языке программирования *Python*. Для имплементации алгоритма дерева решений, определения параметров модели и ее отрисовки (рис. 1) задействовали библиотеку *scikit-learn 1.0.2*, которая предоставляет собой обширный функционал для машинного обучения. Каждый блок построенного дерева имеет однотипную структуру:

наименование фактора – признак, по которому разбивается выборка на две подгруппы. Узел дерева сравнивает значение этого признака с некоторым порогом, и, в зависимости от результата, данные направляются в одну из ветвей дерева;

индекс Джини («gini») – измеряет степень «перепутанности» классов в узле. Чем меньше его значение, тем «чище» узел;

объем выборки (samples) – количество наблюдений (экземпляров) в узле дерева;

значение (value) – содержит информацию о распределении классов в узле. Например, если узел разбивает выборку на две подгруппы, значение будет представлять собой количество экземпляров каждого класса в каждой подгруппе;

класс (class) – если узел листовой (конечный), то есть не имеет дочерних узлов, этот параметр отражает прогнозируемый класс для такого листа.

В каждой внутренней вершине дерева отражен признак, по которому проводится разбиение выборки на два множества. При этом для всех качественных признаков предварительно провели «быстрое кодирование» (*one-hot encoding*), представляющее категориальные признаки в виде бинарных векторов, что делает их пригодными для использования в моделях машинного обучения, включая деревья решений. Так, для фактора «устойчивость сорта» было выполнено обычное бинарное кодирование: 0 – устойчивый сорт, 1 – восприимчивый. Для фактора «фаза вегетации» кодирование проводили уже с использованием двух бинарных переменных:

$$\text{Фаза_кущения} = \begin{cases} 0, & \text{наблюдение не относится к фазе кущения,} \\ 1, & \text{наблюдение относится к фазе кущения.} \end{cases}$$

$$\text{Фаза_флаглист} = \begin{cases} 0, & \text{наблюдение не относится к фазе флаглиста,} \\ 1, & \text{наблюдение относится к фазе флаглиста.} \end{cases}$$

После этого три возможные фазы вегетации, которые фиксировали в опыте, представляли в виде парных комбинаций значений фиктивных переменных: (1, 0) – фаза кущения; (0, 1) – фаза флаглиста; (0, 0) – фаза выхода в трубку, а затем подавали на вход модели.

Результатом классификации служили метки, содержащиеся в терминальных (листовых) вершинах. Для оценки качества работы алгоритма на обучающей выборке достаточно сравнить распределение истинных значений целевой переменной для всех объектов, попавших в листовую вершину (вектор *value*) со значением прогнозируемого класса. Например, если в листовой вершине вектор *value* = [0, 13, 0] и модельный прогноз выдает «Умеренное развитие», то можно констатировать, что все 13 наблюдений были проклассифицированы корректно. В случае, когда *value* = [0, 3, 10] и моделью прогнозируется «Эпифитотийное развитие», то алгоритм ошибся трижды, отнеся три наблюдения с умеренным развитием сетчатой пятнистости к наиболее пессимистичному сценарию. В наших исследованиях (см. рис. 1) такой случай ошибочной классификации выявлен в одной единственной конечной вершине. Доля правильных ответов алгоритма (*accuracy*) на обучающей выборке составила 98,2%.

Естественно, что оценка качества моделирования только по обучающей выборке может быть недостаточно информативной. Это связано с явлением, называемым переобучением (*overfitting*), когда модель слишком подстраивается под обучающие данные, но плохо работает на новых, тестовых наборах.

При детальном рассмотрении матрицы ошибок алгоритма на тестовой выборке (рис. 2а) можно сделать заключение, что обученная модель корректно классифицировала большинство объектов на основе новых данных, совершив ошибку всего на одном наблюдении. Это свидетельствует о её способности обобщать данные, отсутствии переобучения и пригодности для практического применения.

Информация о важности (весах) факторов (рис. 2б), используемых моделью при принятии решений, показывает, насколько каждый признак влияет на прогноз. Самое значимое влияние на развитие сетчатой

пятнистости ячменя оказывает пораженность листьев (74,3%). Доли устойчивости сорта и относительной влажности находились на уровне 10%, а наименее важным признаком оказалась «фаза вегетации» ячменя.

Представленные результаты имеют ряд важных практических и научных приложений:

учитывая способность деревьев решений к масштабированию, при наличии собранных данных по другим культурам и болезням, представленные ИИ-решения могут стать инструментом для принятия управленческих решений, так как предоставляют оперативную и объективную оценку степени их развития;

использование модели способствует более эффективному распределению временных и материальных ресурсов, что в конечном итоге влияет на эффективность производственной деятельности (благодаря сокращению производственных затрат).

Выводы. На основе современных методов машинного обучения разработана ИИ-модель прогнозирования развития сетчатой пятнистости озимого ячменя. В качестве базового алгоритма было выбрано дерево решений. Настроенная по обучающей выборке модель продемонстрировала высокую прогнозную способность на тестовых данных, обеспечив долю правильных ответов 98% на обучающей выборке и 97% на отложенной.

Основными факторами, влияющими на развитие сетчатой пятнистости ячменя, выступают текущая пораженность листьев (вклад 74,3%), средняя относительная влажность воздуха (11,9%), устойчивость сорта к болезни (10,4%) и фаза вегетации, в которую произошло заражение (3,4%).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/121. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В этой работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы этой работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Федеральная служба государственной статистика. *Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство*. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения: 01.10.2023).
2. Указ Президента Российской Федерации от 21.01.2020 г. № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45106> (дата обращения: 01.10.2023).
3. Применение технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве / Е. А. Скворцов, В. И. Набоков, К. В. Некрасов и др. // *Аграрный вестник Урала*. 2019. № 8 (187). С. 91–98. doi: 10.32417/article_5d908ed78f7fc7.89378141.
4. Волкова Г. В., Астанчук И. Л. Распространение *Ryzenophora teres* на посевах ячменя в Северо-Кавказском регионе // *Зерновое хозяйство России*. 2019. № 2 (62). С. 63–68. doi: 10.31367/2079-8725-2019-62-2-63-68.
5. Орловская Е. Н., Астанчук И. Л., Волкова Г. В. Влияние системы обработки почвы на поражаемость озимого ячменя сетчатой пятнистостью // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018. № 4 (44). С. 110–117. doi: 10.18286/1816-4501-2018-4-110-117.
6. Ариничева И. В., Ариничев И. В., Репко Н. В. Автоматизированная диагностика грибных болезней ячменя // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2022. № 95. С. 69–72. doi: 10.21515/1999-1703-95-69-72.
7. Ариничев И. В., Полянских С. В., Ариничева И. В. Семантическая сегментация ржавчин и пятнистостей пшеницы // *Компьютерная оптика*. 2023. Т. 47. № 1. С. 118–125. doi: 10.18287/2412-6179-СО-1130.
8. Билай В. И. *Микроорганизмы – возбудители болезней растений (справочник)*. Киев: Наукова думка, 1988. 549 с.
9. Хасанов Б. А. *Определитель грибов-возбудителей «гельминтоспориозов» растений из родов Bipolaris, Drechslera и Exserohilum*. Ташкент: Фан, 1992. 180 с.
10. Ибрагимов Т. З., Санин С. С. Цифровая защита растений и интеллектуальный анализ фитосанитарной информации // *Защита и карантин растений*. 2019. № 4. С. 15–18.

Поступила в редакцию 10.11.2023

После доработки 19.12.2023

Принята к публикации 09.01.2024

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Редакция помещает не более двух статей одного автора в год. Это правило не распространяется на академиков и членов-корреспондентов РАН и других академий.
2. Объем статьи не менее 12 стр., включая таблицы (не более 4), рисунки (не более 4), библиографию (до 25 названий). Статья, набранная крупным шрифтом через 1,5 интервала, пересылается по E-mail: nsm2308@yandex.ru. В ней должны быть указаны УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, степени, полное название учреждения с адресом, E-mail, реферат (объемом 200–250 слов с указанием цели опытов, объекта исследований, анализа полученных данных), ключевые слова, и все продублировано на английском языке. Таблицы и рисунки в одном файле с текстом. В тексте выделить «Методика» и «Результаты и обсуждение». Повторение одних и тех же данных в тексте, таблицах, графиках недопустимо. В конце статьи указать номер телефона (служебный, домашний, мобильный) каждого соавтора.
3. Рисунки (графический материал) должны быть выполнены четко, представлены на отдельном листе в формате, обеспечивающем ясность передачи всех деталей, и/или на электронном носителе (программы «Adobe PhotoShop», «Adobe Illustrator»).
4. Статья с большим количеством формул (не более 10) представляется на электронном носителе – (программа «MS Equation» или подобная).
5. При описании методики исследования следует ограничиваться оригинальной ее частью, при элементном анализе приводить только усредненные данные.
6. Используемая литература приводится в порядке очередности упоминания, в тексте – цифровые ссылки в квадратных скобках. Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5–2008. Доля ссылок на источники старше 10 лет не должна превышать 30 % списка литературы, доля ссылок на публикации в журналах из ядра РИНЦ за последние 8 лет должна составлять не менее 50 % списка литературы. Желательны ссылки на журналы, входящие в базу данных Scopus и Web of Science. Цитируемость своих работ не более 15 %.
7. При получении статьи редакция рассматривает ее соответствие тематике журнала и посылает на рецензию ведущим специалистам. Возвращение рукописи автору на доработку с копией рецензии не означает, что статья принята к печати. Датой поступления считается день получения редакцией окончательного варианта статьи.
8. Редакция посылает авторам на визу подготовленный к печати экземпляр статьи, который должен быть выслан обратно в течение суток с момента его получения.

Авторам высылается журнал в электронном виде.

С аспирантов плата за публикацию не взимается.

Для получения гонорара за публикацию в англоязычном издании авторы могут обратиться в Российское авторское общество по адресу:

123995, Москва,

ул. Бронная, д. 6, стр. 1,

тел.: +7 (495) 697–33-35;

и на сайте РАО: www.rao.ru (подвести курсор на «Правообладатели», далее на «Авторам научных статей»). Здесь находятся документы для получения авторского гонорара.

Журнал рассылается только по подписке, в розничную продажу не поступает.