



РОССИЙСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ НАУКА

Научно-теоретический журнал



НАУКА

— 1727 —

Я. П. Лобачевский, А. А. Алферов Актуальные исследования ученых отделения сельскохозяйственных наук РАН	3
<i>Земледелие и мелиорация</i>	
В. Н. Багринцева, И. Н. Ивашененко, О. Д. Серова Эффективность некорневой подкормки кукурузы при разных сроках применения	7
<i>Растениеводство, защита и биотехнология растений</i>	
А. А. Гончаренко, А. В. Макаров, Т. В. Семенова, В. Н. Точилин, Н. А. Ключко, Н. В. Цыганкова, М. С. Гончаренко, П. А. Плотников Оценка комбинационной способности инбредных линий озимой ржи по высоте растений	12
Л. И. Лихачева, А. В. Москалев, Н. В. Лихачёва Распределение элементов продуктивности у различных морфотипов гороха посевного	17
А. В. Любимова, Д. И. Еремин Формирование биохимических показателей зерна овса в зависимости от генотипа и погодных условий	24
Ю. А. Иванов, В. И. Пахомов, С. В. Брагинец, Д. В. Рудой, О. Н. Бахчевников Питательная ценность колосьев шарозерной пшеницы в качестве корма	30
М. П. Разгонова, Е. И. Черевач, Е. С. Бутовец, Л. М. Лукьянчук, Е. А. Васина, О. Л. Шепель, К. С. Голохваст Вторичные метаболиты гиперпигментированного сорта сои Локус и их пространственное расположение, представленное методами лазерной микроскопии	34
Е. И. Гультаева, Е. Л. Шайдаюк, В. В. Веселова, М. М. Левитин Генетическое разнообразие перспективных образцов яровой мягкой пшеницы российской и казахстанской селекции по устойчивости к бурой и желтой ржавчинам	43
<i>Агрочоведение и агроэкология</i>	
Н. Е. Завьялова, Д. Г. Шишков, Д. Р. Сафиуллина Фотосинтетическая активность посевов и секвестрация атмосферного углерода клевером луговым и яровой пшеницей в севообороте	49
<i>Зоотехния и ветеринария</i>	
А. В. Дубровин, Н. В. Блохина, А. В. Борисова Оценка генетического сходства новоалтайской породы лошадей с исходными породами по микросателлитным локусам ДНК	54
Г. П. Кононенко, П. Ф. Васильков, А. А. Буркин, Л. В. Мосина Микотоксины в вегетирующих растениях кукурузы с экспериментального монопосева	59
<i>Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация</i>	
Я. П. Лобачевский, В. В. Кирсанов, С. В. Кирсанов Разработка новой технологической схемы доильной платформы Карусель на принципах магнитной левитации	63
<i>Хранение и переработка</i>	
Е. Н. Шаболкина, С. Н. Шевченко, А. А. Бишарев, Н. В. Анисимкина Влияние параметров углеводно-амилазного комплекса и содержания белка в зерне на хлебопекарное качество озимой ржи	68

Contents

Ya. P. Lobachevsky, A. A. Alferov Current research by scientists of the Department for Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences	3
<i>Agriculture and land reclamation</i>	
V. N. Bagrintseva, I. N. Ivashenenko, O. D. Serova Efficiency of foliar additional fertilizing of corn at different periods of application	7
<i>Crop production, plant protection and biotechnology</i>	
A. A. Goncharenko, A. V. Makarov, T. V. Semenova, V. N. Tochilin, N. A. Clochko, M. S. Goncharenko, N. V. Tsygankova, P. A. Plotnikov Assessment of the combinational ability of inbred winter rye lines in plant height	12
L. I. Likhacheva, A. V. Moskalev, N. V. Likhacheva Distribution of productivity elements in different morphotypes of pea plants	17
A. V. Lyubimova, D. I. Eremin Formation of biochemical parameters of oat grain depending on the genotype and weather conditions	24
Yu. A. Ivanov, V. I. Pakhomov, S. V. Braginets, D. V. Rudoy, O. N. Bakhchevnikov Nutritive value of indian dwarf wheat ears as feed	30
M. P. Razgonova, E. I. Cherevach, E. S. Butovets, L. M. Lukyanchuk, E. A. Vasina, O. L. Shepel, K. S. Golokhvast Secondary metabolites of soybean seeds variety Locus and their spatial arrangement, represented by laser microscopy	34
E. I. Gulyaeva, E. L. Shaydayuk, V. V. Veselova, M. M. Levitin Genetic diversity of promising accessions of spring soft wheat of Russian and Kazakh breeding for resistance to leaf and yellow rust	43
<i>Agro-soil science and agroecology</i>	
N. E. Zavyalova, D. G. Shishkov, D. R. Safullina Photosynthetic activity of crops and sequestration of atmospheric carbon by meadow clover and spring wheat in crop rotation	49
<i>Animal science and veterinary medicine</i>	
A. V. Dubrovin, N. V. Blohina, A. V. Borisova Assessment of the genetic similarity between the novoaltayskaya horse breed and the original breeds by microsatellite DNA loci	54
G. P. Kononenko, P. F. Vasilkov, A. A. Burkin, L. V. Mosina Mycotoxins in vegetating corn plants from experimental mono-sowing	59
<i>Mechanization, electrification, automation and digitalization</i>	
Ya. P. Lobachevsky, V. V. Kirsanov, S. V. Kirsanov Development of a new technological scheme of the Carousel milking platform based on the principles of magnetic levitation	63
<i>Storage and processing</i>	
E. N. Shabolkina, S. N. Shevchenko, A. A. Bisharev, N. V. Anisimkina Influence of parameters of the carbohydrate-amylase complex and protein content in grain on the baking quality of winter rye	68

**АКТУАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УЧЕНЫХ ОТДЕЛЕНИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ НАУК РАН****Я. П. Лобачевский**, доктор технических наук, академик РАН,
А. А. Алферов, доктор биологических наук*Российская академия наук,
119991, Москва, Ленинский просп., 32а
E-mail: alferov72@yandex.ru*

Представлены результаты научных исследований, рассмотренных на заседаниях бюро Отделения сельскохозяйственных наук РАН в 2023 г. Основное внимание уделено состоянию и развитию отечественной селекции и семеноводства овощных культур; анализу генетических ресурсов растений Крыма для развития отечественной селекции плодовых, ягодных культур и винограда; лазерным и спектральным технологиям при производстве сельскохозяйственной продукции; инновационным технологиям биологической защиты животных; научному обеспечению предотвращения опустынивания земель; рациональному землепользованию в условиях природно-климатических и социальных вызовов; цифровизации пищевых систем; подготовке новой генерации молодых исследователей в области сельскохозяйственных наук.

**CURRENT RESEARCH BY SCIENTISTS OF THE DEPARTMENT FOR AGRICULTURAL SCIENCES
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES****Ya. P. Lobachevsky, A. A. Alferov***Russian Academy of Sciences,
119991, Moskva, Leninskii prosp., 32a
E-mail: alferov72@yandex.ru*

The results of scientific papers reviewed at the meetings of the Bureau of the Department for Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences in 2023 are presented. The main attention was paid to the state and development of domestic breeding and seed production of vegetable crops; analysis of the genetic resources of Crimean plants for the development of domestic breeding of fruit, berry crops and grapes; laser and spectral technologies in the production of agricultural products; innovative technologies for biological protection of animals; scientific support for the prevention of land desertification; rational land use in the context of natural, climatic and social challenges; digitalization of food systems; training of a new generation of young researchers in the field of agricultural sciences.

Ключевые слова: сельскохозяйственная наука, селекция и семеноводство, генетические ресурсы, спектральные технологии, защита животных, сельскохозяйственные машины и технологии, пищевые системы, искусственный интеллект, подготовка кадров высшей квалификации.

Key words: agricultural science, breeding and seed production, genetic resources, spectral technologies, animal protection, agricultural machines and technologies, food systems, artificial intelligence, training of highly qualified personnel.

Разнообразие эколого-географических и почвенно-климатических условий России потребовало проведения комплексных научных исследований (фундаментальных, поисковых и прикладных), тематика которых соответствовала детализированному плану Программы фундаментальных научных исследований на долгосрочный период (2021–2030 гг.), разработанному с участием ученых Отделения по шести основным направлениям науки [1].

Деятельность исследователей в области сельскохозяйственных наук в 2023 г. осуществлялась в соответствии с Федеральным законом от 27 сентября 2013 г. № 253-ФЗ «О Российской академии наук, реорганизации государственных академий наук и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», уставом Российской академии наук, постановлениями президиума РАН, планами работы бюро Отделения сельскохозяйственных наук РАН и была направлена на выполнение Указа Президента Российской Федерации от 21 июля 2016 г. «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в интересах развития сельского хозяйства» и приоритетных направлений развития сельского хозяйства, определенных Стратегией научно-технологического развития страны, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642.

В 2023 г. проведено 9 заседаний бюро, одно общее собрание членов РАН Отделения и одна научная сессия. На заседаниях бюро Отделения заслушивали научные сообщения: «Состояние и проблемы отечественной селекции и семеноводства овощных культур»; «Генетические ресурсы

растений Крыма для развития отечественной селекции»; «Подготовка новой генерации молодых исследователей в области сельскохозяйственных наук»; «Лазерные и спектральные технологии для экологически чистого сельскохозяйственного производства»; «Новые фундаментальные разработки для создания технологий биологической защиты животных»; «Научное обеспечение и опыт борьбы с опустыниванием земель в России»; «Цифровизация пищевых систем: искусственный интеллект и наукоемкие решения»; «Рациональное землепользование в Российской Федерации в условиях беспрецедентных природно-климатических и социальных вызовов». По каждому сообщению приняты соответствующие решения о дальнейшем развитии научных исследований, даны рекомендации органам исполнительной власти по использованию полученных научных результатов, членам РАН предложено обеспечить пропаганду результатов научных исследований в средствах массовой информации. На заседаниях бюро также обсуждали меры по контролю за выполнением государственного задания РАН, материалы к докладу РАН Президенту и Правительству Российской Федерации – о реализации государственной научно-технической политики и важнейших научных результатах, полученных российскими учеными в 2023 г., аналитические материалы и предложения по приоритетным направлениям развития фундаментальных исследований на период до 2030 г., вопросы организации и проведения работ по экспертизе планов НИР, отчетов программ и проектов, согласования предложений Минобрнауки России о реорганизации научных учреждений, движения земельных

и материальных ресурсов, подготовки и проведения научных конференций, согласования планов НИР и отчетов научных учреждений по их реализации и другие.

В соответствии с постановлением президиума РАН № 130 от 27 июня 2023 г. 11 декабря 2023 г. проведена научная сессия общего собрания членов РАН Отделения сельскохозяйственных наук РАН на тему «Научное обеспечение технологического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации», на которой с докладом по проблеме «Приоритетные технологии развития агропромышленного комплекса Российской Федерации» выступил академик-секретарь ОСХН РАН академик РАН Лобачевский Я. П.

На научной сессии общего собрания членов РАН Отделения сельскохозяйственных наук РАН были представлены содоклады, освещающие достижения отечественной фундаментальной науки, посвященные состоянию и возможностям развития агропромышленного комплекса страны (докладчик академик РАН Алтухов А. И.), проблемам и путям решения технологического развития земледелия (академик РАН Завалин А. А.), вопросам мелиорации (академик РАН Шевченко В. А.), фундаментальным основам развития современной системы селекции и семеноводства сельскохозяйственных культур (академик РАН Беспалова Л. А.), проблемам защиты растений (академик РАН Каракотов С. Д.), состоянию и проблемам развития зоотехнии (академик РАН Зиновьева Н. А.), проблемам и направлениям развития ветеринарной санитарии и гигиены (член-корреспондент РАН Гулюкин А. М.), перспективам научно-технологического суверенитета Российской Федерации и инновационного развития в области цифровизации и роботизации сельскохозяйственного производства (академик РАН Дорохов А. С.), инновациям в науке и технологиях производства продуктов питания (академик РАН Петров А. Н.).

В своих выступлениях на научной сессии члены РАН отметили необходимость ускоренного перехода сельского хозяйства к передовым цифровым технологиям [2], роботизированным системам [3], новым материалам и способам конструирования, созданию систем обработки больших объемов данных, машинному обучению и искусственному интеллекту, которые сегодня относятся к важнейшей части государственной политики в реализации Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации и «Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017–2030 гг.».

Во исполнение постановления Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2018 г. № 1781 РАН ученые Отделения проводили экспертизы научных и научно-технических результатов в рамках планов НИР, проектов и программ, отчетов об их реализации, которые поступали от научных и образовательных организаций, находящихся в ведении Минобрнауки России, Минсельхоза России, Минприроды России, Россельхознадзора, Рослесхоза, Росрыболовства, Росрезерва. В 2023 г. по их результатам Отделением подготовлено и отправлено в Управление научно-методического руководства экспертной деятельности 3010 заключений.

В 2023 г. продолжены комплексные фундаментальные научные исследования с другими отделениями РАН. Заслуживает внимания продолжение совместной работы с учеными Отделения химии и наук о материалах РАН (академик-секретарь Егоров М. П.) по созданию и производству средств защиты растений с действующими веществами отечественного производства. Эта работа проводится на базе АО «Щелково Агрохим», где осуществляется отладка технологий синтеза действующих веществ и размещения их производства на предприятиях химического комплекса Российской Федерации.

Продолжена совместная работа с учеными Отделения энергетики машиностроения механики и процессов управления РАН (академик-секретарь Панченко В. Я.) по вопросам развития энергоэффективных систем энергообеспечения и энергопотребления сельхозпредприятий и бытового сектора, энергоэффективных децентрализованных систем теплообеспечения объектов сельхозпроизводства. Продолжается работа по проблемам цифровых технологий и искусственного интеллекта в сельском хозяйстве [4].

С Отделением физических наук РАН (академик-секретарь Кведер В. В.) ведутся совместные работы по вопросам применения электротехнологий и достижений прикладной физики в сельскохозяйственном производстве, в том числе использования микроволнового излучения для борьбы с саранчой, изучения проблем контроля и управления электрофизическими воздействиями на биологические объекты в технологических процессах сельского хозяйства, использования спектральных и лазерных технологий в сельском хозяйстве [5, 6].

В 2023 г. с Отделением медицинских наук РАН (академик-секретарь Стародубов В. И.) изучены вопросы оптимизации питания, здоровьесбережения и повышения качества жизни населения России. По этой проблеме проведено совместное заседание бюро двух Отделений [7]. По результатам выступлений ученых обоих Отделений принято решение по разработке научно-обоснованных рационов питания с интеграцией в них специализированной и функциональной пищевой продукции для различных групп населения с учетом физиологических потребностей в пищевых веществах и энергии. С участием ученых Отделения медицинских наук РАН в 2023 г. на бюро рассмотрены вопросы кадрового обеспечения.

Бюро Отделения уделяло внимание подготовке высококвалифицированных кадров для их дальнейшей работы в научно-исследовательских учреждениях. С этой целью на одном из заседаний рассматривался вопрос подготовки новой генерации молодых исследователей. Членами РАН Отделения положительно оценен опыт успешной работы с молодежью Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, где с 2017 г. осуществляется образовательная деятельность по программам магистратуры по направлениям 13.04.02 – электроэнергетика и электротехника, 35.04.06 – агроинженерия. Для качественной работы магистратуры в центре создана кафедра «Общенаучные и специальные дисциплины» и разработана Программа развития кадрового потенциала ФНАЦ ВИМ на 2020–2024 гг. Программа предусматривает целостность системы подготовки кадров молодых исследователей и высококвалифицированных специалистов в магистратуре, аспирантуре и докторантуре, а также создание системы профессиональной переподготовки и повышения квалификации кадров с использованием высококачественной учебно-исследовательской инфраструктуры и ориентацией на современное состояние развития науки в агропромышленном комплексе с целью освоения машинных технологий для обеспечения производства конкурентоспособной сельскохозяйственной продукции [8].

В рамках научно-координационной деятельности Отделения сельскохозяйственных наук РАН осуществляло информационное взаимодействие с органами государственной власти Российской Федерации, органами государственной власти субъектов Российской Федерации, министерствами и ведомствами Российской Федерации, иными государственными органами, гражданами и организациями. Ученые Отделения приняли участие в ряде заседаний Комитета по аграрно-продовольственной политике и природопользованию Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации, Комитета по аграрным вопросам

Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации, Минобрнауки России и Минсельхоза России.

В соответствии с Уставом РАН в рамках каждой из шести секций по направлениям исследований в прошедшем году работали научные советы.

На научном совете секции экономики, земельных отношений и социального развития села (руководитель – академик РАН Алтухов А. И.) разрабатывали предложения по нормативно-правовому регулированию комплексного развития сельских территорий в целях реализации конституционных гарантий граждан, возможностей достижения на селе сопоставимого с городом уровня и качества жизни населения, поддержания единого экономического пространства страны; региональных моделей развития мелкотоварного животноводства на сельских территориях в укреплении технологического суверенитета и обеспечении продовольственной безопасности России. Подготовленные предложения представлялись для рассмотрения в профильные Комитеты Совета Федерации и Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации.

Тематикой заседаний научного совета секции земледелия, мелиорации, водного и лесного хозяйства (руководитель – академик РАН Завалин А. А.) были вопросы, связанные с научно-инновационным обеспечением земледелия и землепользования [9]. Членами научного совета отмечена необходимость восстановления работы по координации фундаментальных и поисковых исследований, направленных на реализацию государственной научно-технической политики и выполняемых учреждениями, находящимися под научно-методическим руководством Отделения. На совместном заседании-семинаре научного совета секции и группы экспертов «Глобальный климат и рациональное природопользование: нуль-эмиссия и нуль-деградация почв России (сельское и лесное хозяйство)» рассматривались вопросы водных проблем России, в том числе воздействия изменений глобального климата на гидросферу, отмечены сложности прогнозирования такого влияния на водные ресурсы и недостаточная достоверность подобных прогнозов.

На научном совете секции растениеводства, защиты и биотехнологии растений (руководитель – академик РАН Косолапов В. М.) рассматривались направления решения проблем создания и семеноводства отечественных сортов и гибридов овощных, бахчевых и цветочных культур, зональные технологии их возделывания [10]. Учеными совета отмечено, что несмотря на успехи отечественных селекционеров в России сохраняется высокая зависимость товарного овощеводства от иностранных семян. При этом имеется возможность увеличения производства овощной продукции из семян российской селекции, поскольку отечественными исследователями созданы новые сорта и гибриды (в Госреестре Российской Федерации зарегистрированы 1330 сортов и гибридов селекции ФГБНУ ФНЦО, допущенных к выращиванию во всех регионах страны), не уступающие, а по ряду показателей превосходящие зарубежные аналоги. По результатам обсуждения подготовлены предложения для Минобрнауки России и Минсельхоза России.

В рамках работы научного совета секции зоотехнии и ветеринарии (руководитель – академик РАН Зиновьева Н. А.) анализировались вопросы развития зоотехнической и ветеринарной науки в современных условиях, антибиотикорезистентности в продуктивном животноводстве и птицеводстве, распространения высокопатогенного гриппа птиц на территории Российской Федерации. Учеными совета по вопросу применения антибиотиков в животноводстве отмечено, что в современных условиях микробная антибиотикорезистентность переходит в разряд глобальных проблем, не только угрожающих здоровью и жизни людей, но и создающих серьезные препятствия на пути повышения ветеринарно-

го благополучия и продуктивности сельскохозяйственных животных, а также безопасности производимой продукции [11]. В то же время интенсивное ведение промышленного животноводства, всех видов и направлений продуктивности, практически невозможно без использования антимикробных препаратов. По результатам рассмотрения этих вопросов учеными совета подготовлены предложения по совершенствованию государственной политики в области развития производства лекарственных средств ветеринарного применения, а также возможным мерам поддержки образовательных и научных организаций при формировании и реализации программ подготовки специалистов по дисциплинам «Микробиология», «Эпизоотология», «Фармакология», «Ветеринарно-санитарная экспертиза».

На заседаниях научного совета секции механизации, электрификации и автоматизации (руководитель – академик РАН Дорохов А. С.) были обсуждены проблемы разработки экологически безопасных и энергоэффективных спектральных и лазерных технологий для увеличения продуктивности сельскохозяйственных растений и животных, развития отечественного сельхозмашиностроения, в частности техники для возделывания и уборки лубяных культур, селекции и семеноводства овощных культур, высокотехнологичного оборудования для глубокой переработки и производства комбикормов [12]. Предложения направляли в законодательные органы и различные ФОИВ, в том числе по подготовке подпрограммы ФНТП «Сельскохозяйственная техника и оборудование».

Научное обеспечение развития отечественного производства продуктов питания и вопросы трансформации сельскохозяйственного сырья на основе новых процессивных решений, цифровых, геномных, протеомных, метаболомных технологий с использованием биоинформатики, нейросетевых технологий, структурно-параметрического моделирования для создания пищевых продуктов и функциональных ингредиентов обсуждалось на заседаниях научного совета секции хранения и переработки сельскохозяйственной продукции [13] (руководитель – академик РАН Петров А. Н.).

В целях дальнейшего повышения эффективности работы научных советов всех секций на первом бюро Отделения 2024 г. утверждены их планы работы, в которых особое внимание обращено на вопросы координации исследований, совершенствования методологии и методов и результативность НИР в интересах сельскохозяйственного производства.

Большое внимание в работе Отделения уделялось вопросам сотрудничества с зарубежными институтами и организациями более 30 стран мира. Научные организации, находящиеся под научно-методическим руководством Отделения, осуществляли сотрудничество в научной сфере по различным направлениям исследований с учеными Республики Беларусь, Узбекистана, Армении, Казахстана, Азербайджана, Киргизии, КНР, Вьетнама, Монголии, Италии, Сирийской Арабской Республики, Турции, Греции, стран Южной Америки.

Под постоянным контролем бюро Отделения и секций находился вопрос о премиях имени выдающихся ученых в области сельскохозяйственных наук. В отчетном году президиумом РАН утверждены соискатели по золотым медалям им. В. Р. Вильямса, присуждаемой в области общего земледелия и кормопроизводства, и А. А. Полякова за выдающиеся работы в области ветеринарной медицины, санитарии, гигиены и экологии. Бюро Отделения в 2023 г. утвердило новые составы экспертных комиссий по присуждению этих наград.

Под научно-методическим руководством бюро Отделения издаются журналы «Российская сельскохозяйственная наука» и «Вестник российской сельскохо-

зяйственной науки», которые занимают высокие места в рейтинге научных изданий. Оба журнала включены в базу данных Russian Science Citation Index, что существенно расширяет возможности российских ученых в сфере сельскохозяйственных наук. Переводная версия журнала «Российская сельскохозяйственная наука» служит основой для журнала Russian Agricultural Sciences, который входит в международную базу данных Springer.

На сегодняшний день под научно-методическим руководством Отделения сельскохозяйственных наук РАН находится 60 научных центров, в том числе 42 центра собственно сельскохозяйственного направления и 18 комплексных центров, в состав которых входит ряд разнопрофильных научных учреждений.

В 2023 г. было создано значительное количество важной для сельского хозяйства научно-технической продукции (см. табл.). Это сорта и гибриды растений, породы, типы, кроссы животных, птиц, насекомых и аквакультуры, автоматизированные и роботизированные технические средства, беспилотные летательные аппараты для реализации точных технологий, цифровые технологии в системах земледелия и мелиорации, средства защиты растений, вакцины, диагностикумы, дезинфицирующие и лекарственные средства, функциональные продукты питания, социально-экономические модели развития агропромышленного комплекса и сельских территорий [14].

Научная продукция, полученная учеными ОСХН РАН по результатам исследований в 2023 г.

Показатель	Число
Сорта и гибриды сельскохозяйственных культур	285 ед.
Породы, типы, кроссы животных, птиц, насекомых и аквакультуры	2 ед.
Технологические процессы производства сельскохозяйственной продукции	164 ед.
Технологические способы и приемы производства сельскохозяйственной продукции	109 ед.
Машины, приборы и оборудование	73 ед.
Вакцины, диагностикумы, дезинфицирующие и лекарственные средства	4 ед.
Методы и методики	154 ед.
Патенты и свидетельства на изобретения и селекционные достижения	794 ед.
Книги, монографии, брошюры	242 ед.
Статьи (всего)	15,9 тыс. ед.
В том числе:	
РИНЦ	13,9 тыс. ед.
Web of Science	650 ед.
Scopus	690

Одна из важных задач, которая стоит перед учеными сельскохозяйственной науки, – предоставление предприятиям агропромышленного комплекса готовых к освоению технологий, позволяющих перейти на новый уровень развития и обеспечивающих рост производительности труда, увеличение объемов производства сельскохозяйственной продукции и улучшение ее качественных характеристик [15]. В рамках решения этой задачи ученые Отделения в 2023 г. издали сборник «Технологии XXI века в агропромышленном комплексе России» (4-е издание, дополненное).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института организации. 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 заявляют, что в работе отсутствует конфликт интересов.

Литература.

1. Лачуга Ю. Ф., Гарист А. В. Отчет о работе бюро Отделения сельскохозяйственных наук РАН за 2017–2022 годы // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2022. № 6. С. 4–7.
2. Иванов А. Л. Научно-технологическое развитие земледелия с использованием цифровых технологий // Вестник РАН. 2019. № 5. С. 522–524.
3. Морозов Н. М., Кирсанов В. В., Ценч Ю. С. Историко-аналитическая оценка развития процессов автоматизации и роботизации в молочном животноводстве // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. № 1. С. 11–18.
4. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. № 4. С. 6–10.
5. О синтезе роботизированного сельскохозяйственно-мобильного агрегата / А. Ю. Измайлов, Я. П. Лобачевский, Ю. С. Ценч и др. // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 4. С. 63–68
6. Лобачевский Я. П., Ценч Ю. С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. № 4. С. 4–12.
7. Современные подходы к хранению и эффективной переработке сельскохозяйственной продукции для получения высококачественных пищевых продуктов / А. Г. Галстян, Л. М. Аксёнова, А. Б. Лисицын и др. // Вестник РАН. 2019. № 5. С. 539–542.
8. Ценч Ю. С. Подготовка новой генерации молодых исследователей в научных учреждениях // Российская сельскохозяйственная наука. 2023. № 3. С. 3–8.
9. No-till technology and its role in humus accumulation in typical chernozem / S. A. Yudin, N. R. Ermolaev, V. P. Belobrov, et al. Russian Agricultural Sciences. 2022. Vol. 48. No. 5. P. 365–368.
10. Лукомец В. М., Трунова М. В., Демурин Я. Н. Современные тренды селекционно-генетического улучшения сортов и гибридов подсолнечника во ВНИИМК // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021. № 4. С. 388–393.
11. Поиск однонуклеотидных полиморфизмов, ассоциированных с экстерьерными показателями у ягнят, на основе данных полногеномного секвенирования / Т. Е. Денискова, С. Н. Петров, А. А. Сермягин и др. // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 7. С. 69–76.
12. Инструмент для мониторинга экологического состояния и устойчивого развития сельскохозяйственного производства / А. Ю. Брюханов, Э. В. Васильев, Е. В. Шалавина и др. // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 1 (49). С. 78–84.
13. Antagonistic activity of extremophilic bacteria against phytopathogens in agricultural crops / L. K. Asyakina, Yu. R. Serazetdinova, A. S. Frolova, et al. // Food Processing: Techniques and Technology. 2023. Vol. 53. No. 3. P. 565–575.
14. Алтухов А. И. Агропромышленный комплекс страны: состояние и возможности развития // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2024. № 1 (107). С. 7–24.
15. Технологии XXI века в агропромышленном комплексе России (4-е издание, дополненное) / отв. за выпуск А. А. Алферов, А. В. Гарист. М.: Росинформагротех, 2023. 529 с.

Поступила в редакцию 21.02.2024
 После доработки 15.03.2024
 Принята к публикации 02.04.2024

Земледелие и мелиорация

УДК 633.15:631.8

DOI 10.31857/S2500262724020024 EDN GTZJSD

ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕКОРНЕВОЙ ПОДКОРМКИ КУКУРУЗЫ ПРИ РАЗНЫХ СРОКАХ ПРИМЕНЕНИЯ**В. Н. Багринцева**, доктор сельскохозяйственных наук,
И. Н. Ивашенко, кандидат сельскохозяйственных наук, **О. Д. Серова***Всероссийский научно-исследовательский институт кукурузы,
357528, Пятигорск, ул. Ермолова, 140
E-mail: maize-techno@mail.ru*

Исследования проводили с целью определения влияния сроков некорневой подкормки удобрением Батр Цинк на высоту растений кукурузы, урожайность зеленой массы и зерна, элементы структуры урожая. Работу выполняли на черноземе обыкновенном карбонатном в зоне достаточного увлажнения Ставропольского края в 2021–2023 гг. Эффективность некорневой подкормки удобрением Батр Цинк (1,0 л/га) изучали на гибридах кукурузы Машук 220 МВ и Машук 355 МВ в фазе 5 и 8 листьев. Подкормки проводили на фоне без минеральных удобрений, а также при внесении азотного (N_{30}) и полного минерального ($N_{30}P_{30}K_{30}$) удобрения. Без применения минеральных удобрений некорневые подкормки кукурузы в фазе 5 или 8 листьев удобрением Батр Цинк в дозе 1,0 л/га способствовали увеличению высоты растений гибрида Машук 220 МВ в фазе цветения в среднем за 2021–2023 гг. на 14 и 16 см, Машук 355 МВ – на 17 и 23 см. В среднем за 3 года урожайность зеленой массы гибрида Машук 220 МВ возросла на 5,2 и 6,0 т/га (15,1 и 17,4 %), Машук 355 МВ – на 7,7 и 6,8 т/га (23,2 и 20,5 %), зерна – соответственно на 0,59 и 0,63 т/га (9,2 и 9,9 %), 0,83 и 0,74 т/га (12,9 и 11,5 %). Существенной разницы по урожаю зеленой массы и зерна между сроками подкормки не установлено. На фоне минеральных удобрений некорневые подкормки агрохимикатом Батр Цинк были неэффективны.

EFFICIENCY OF FOLIAR ADDITIONAL FERTILIZING OF CORN AT DIFFERENT PERIODS OF APPLICATION**V. N. Bagrintseva, I. N. Ivashenko, O. D. Serova***All-Russian research scientific institute of corn,
357528, Pyatigorsk, ul. Ermolova, 140
E-mail: maize-techno@mail.ru*

The studies were carried out on ordinary carbonate chernozem in the zone of sufficient moistening in the Stavropol region in 2021–2023. The effectiveness of foliar additional fertilizing with fertilizer Batr Zinc (1.0 l/ha) was studied on corn hybrids Mashuk 220 MV and Mashuk 355 MV in the 5 and 8 leaves phases. Additional fertilizing was carried out on a background without any mineral fertilizing, as well as backgrounds of nitrogen (N_{30}) and complete mineral fertilizing ($N_{30}P_{30}K_{30}$). Data were obtained on the terms influence of foliar additional fertilizing with fertilizer Batr Zinc on the corn plants height, the yield of green mass and grain, and crop structure elements. Foliar additional fertilizing of corn in 5 or 8 leaves phases with fertilizer Batr Zinc at a dose of 1.0 l/ha had a positive effect on plants growth. Without the use of mineral fertilizers in the flowering phase, the plants height of the hybrid Mashuk 220 MV increased on average for 2021–2023 by 14 and 16 cm, hybrid Mashuk 355 MV – by 17 and 23 cm. On average, over 3 years without the use of mineral fertilizers, corn fertilizing in the phases of 5 or 8 leaves with fertilizer Batr Zinc increased the yield of green mass of the hybrid Mashuk 220 MV by 5.2 and 6.0 t/ha (15.1 and 17.4 %), hybrid Mashuk 355 MV – by 7.7 and 6.8 t/ha (23.2 and 20.5 %). Depending on the fertilizing terms, the grain yield of the hybrid Mashuk 220 MV increased by 0.59 and 0.63 t/ha (9.2 and 9.9 %), of the hybrid Mashuk 355 MV – by 0.83 and 0.74 t/ha (12.9 and 11.5 %). There was no significant difference in the yield of green mass and grain between the fertilizing terms. Against the background of mineral fertilizers, foliar additional fertilizing with the agrochemical Batr Zinc was ineffective.

Ключевые слова: кукуруза, удобрения, Батр Цинк, подкормка, урожайность.**Key words:** corn, fertilizers, Batr Zinc, additional fertilizing, productivity.

В технологии возделывания кукурузы наиболее затратная статья расходов – применение минеральных удобрений. Без дополнительного поступления элементов питания в растения при их внесении невозможно повышение урожайности зеленой массы и зерна [1, 2]. В современных системах удобрения кукурузы некорневое применение новейших удобрений, как наиболее прогрессивный и экономичный способ доставки макро-, микроэлементов и других полезных веществ в растительный организм, приобретает все более широкое распространение [3, 4]. Подкормки растений во время вегетации разными агрохимикатами существенно повышают урожайность зеленой массы и зерна кукурузы [5, 6]. Особенно эффективны на кукурузе агрохимикаты, содержащие важные для кукурузы макро- и микроэлементы [7, 8, 9].

Прибавки урожая зерна кукурузы от некорневых подкормок некоторыми агрохимикатами не уступают внесению минеральных удобрений в почву [10, 11, 12]. В связи с малыми дозами и низкой стоимостью используемых средств некорневые подкормки экономически более выгодны, особенно если они могут заменить минеральные удобрения [12].

Цель исследований – изучить влияние разных сроков некорневой подкормки кукурузы удобрением Батр Цинк (1,0 л/га) на фоне различных условий минерального питания растений для обеспечения эффективности его применения.

Методика. Работу выполняли в 2021–2023 гг. на опытном поле Всероссийского НИИ кукурузы, расположенном на высоте 541 м над уровнем моря, 44° с.ш.,

43° в. д. в четвертой зоне (достаточного увлажнения) Ставропольского края. Почва опытного участка – чернозем обыкновенный карбонатный мощный тяжелосуглинистый.

Изучали эффективность некорневой подкормки кукурузы в фазе 5 и 8 листьев удобрением Батр Цинк (1,0 л/га) без внесения удобрений, на фоне азотного (N_{30}) и полного минерального ($N_{30}P_{30}K_{30}$) удобрения. Азотный фон создавали внесением до посева под культивацию аммиачной селитры, фон полного удобрения – внесением нитроаммофоски. Общая площадь делянки составляла 28 м², учётная – 10,5 м², повторность – 4-кратная.

Батр Цинк – жидкое комплексное органоминеральное удобрение для листовых подкормок сельскохозяйственных культур, содержит 5 % азота, а также 6 % цинка и 7 % серы в пересчете на элементы в доступной для растений хелатной форме, а также комплекс активных органических компонентов (янтарная, лимонная, аскорбиновая кислоты). Согласно рекомендациям производителя, нормы применения удобрения составляют 0,5...1,0 л/га (<http://npsagro.ru/catalogue/show/Batr-Zn>). Некорневые подкормки кукурузы в фазе 5 и 8 листьев осуществляли опрыскивателем навесным CLASS 600/12 при расходе рабочего раствора 250 л/га.

Исследования проводили на среднераннем гибриде кукурузы Машук 220 МВ (ФАО 220) и среднеспелом гибриде Машук 355 МВ (ФАО 350) селекции ВНИИ кукурузы. Посев осуществляли после озимой пшеницы в 2021 г. 28 апреля, в 2022 г. 29 апреля, в 2023 г. 20 апреля сеялкой Gaspardo MTR-8. В фазе 2...3 листа на всех делянках формировали оптимальную густоту стояния растений: гибрида Машук 220 МВ – 70 тыс./га, гибрида Машук 355 МВ – 55 тыс./га.

Сорные растения в посеве кукурузы, находящейся в фазе 3 листа, уничтожали гербицидом Аденго (0,5 л/га). Для рыхления почвы в фазе 6...7 листьев кукурузы проводили междурядную культивацию.

Содержание гумуса в слое почвы 0...20 см находилось на уровне 4,0 %. Обеспеченность почвы элементами питания определяли после внесения минеральных удобрений в фазе 5 листьев. В среднем за 2021–2023 гг. в варианте без внесения минеральных удобрений в слое почвы 0...20 см содержание нитратного азота (по Грандваль-Ляжу) составляло 18,0 мг/кг, подвижного фосфора (по Мачигину) – 10,0 мг/кг, подвижного калия (по Мачигину) – 236,3 мг/кг. В варианте с внесением аммиачной селитры (N_{30}) величины этих показателей были равны соответственно 32,9; 9,8 и 244,7 мг/кг, нитроаммофоски ($N_{30}P_{30}K_{30}$) – 32,6; 13,0 и 254,3 мг/кг.

По количеству осадков, выпадавших по месяцам, 2021 г. был типичным для зоны проведения опытов. Сумма осадков за май–сентябрь (период вегетации кукурузы) составила 382,2 мм. В мае выпало 94,3 мм осадков, в июне во время роста растений – 63,9 мм, июле во время цветения – 73,5 мм, августе во время налива зерна – 78,1 мм. В 2022 г. осадков за период вегетации выпало 234,9 мм, в том числе в мае – 80,3 мм, июне – 92,5 мм, июле – 7,4 мм, августе – 1,2 мм. Наблюдался недостаток влаги в июле и августе. В 2023 г. с мая по август осадков выпало 322,3 мм, из них в мае – 95,3 мм, июне – 133,5 мм, июле – 38,5 мм, августе – 5,0 мм.

Результаты и обсуждение. Удобрения оказали положительное влияние на рост вегетативных органов (стеблей) растений кукурузы. В фазе цветения минеральные удобрения и агрохимикат Батр Цинк оказывали существенное влияние на рост кукурузы, по сравнению с контролем без удобрений (табл. 1).

Табл. 1. Влияние некорневой подкормки удобрением Батр Цинк на высоту растений гибридов кукурузы (в среднем за 2021–2023 гг.), см

Вариант	Машук 220 МВ	Машук 355 МВ
Контроль без удобрений	216	238
Батр Цинк (1,0 л/га)		
в фазе 5 листьев	230	255
Батр Цинк (1,0 л/га)		
в фазе 8 листьев	232	261
N_{30}	228	257
N_{30} +Батр Цинк (1,0 л/га)		
в фазе 5 листьев	231	260
N_{30} +Батр Цинк (1,0 л/га)		
в фазе 8 листьев	231	261
$N_{30}P_{30}K_{30}$	233	261
$N_{30}P_{30}K_{30}$ +Батр Цинк (1,0 л/га)		
в фазе 5 листьев	235	262
$N_{30}P_{30}K_{30}$ +Батр Цинк (1,0 л/га)		
в фазе 8 листьев	234	261
НСР	7	12
Ошибки, %	1,0	1,6

Наибольшее влияние на высоту растений гибрида Машук 220 МВ оказало внесение в почву нитроаммофоски, в среднем за три года прирост составил 17 см. Существенно (на 14 и 16 см) увеличивалась высота растений от фолиарного внесения удобрения Батр Цинк в фазе 5 и 8 листьев кукурузы. На фоне азотного минерального питания подкормки удобрением Батр Цинк по отношению к фону увеличивали высоту растений на 3 см независимо от срока их проведения. В сочетании с полным минеральным удобрением ($N_{30}P_{30}K_{30}$) применением Батр Цинка увеличивало высоту растений всего на 1...2 см.

На гибриде Машук 355 МВ некорневая подкормка Батр Цинк в фазе 5 листьев без основного внесения минеральных удобрений увеличила высоту растений на 17 см, в 8 листьев – на 23 см. Прирост в высоту от некорневой подкормки в фазе 8 листьев был равнозначен влиянию нитроаммофоски в дозе $N_{30}P_{30}K_{30}$. На фоне аммиачной селитры подкормки увеличивали высоту растений соответственно на 3 и 4 см. На фоне внесения нитроаммофоски она возростала на 1 см только при проведении подкормки в фазе 5 листьев.

Следует отметить, что высота растений гибрида Машук 355 МВ была больше, чем у Машук 220 МВ, в среднем по вариантам опыта на 53 см, средний прирост от удобрений – на 6 см.

Под воздействием удобрений увеличивалась вегетативная масса растений в фазе молочно-восковой спелости зерна кукурузы (табл. 2). Гибриды кукурузы различались по реакции на улучшение условий минерального питания. Более агрохимически эффективным был гибрид Машук 355 МВ, что обеспечило формирование более высоких прибавок урожая зеленой массы. Несмотря на разную степень отзывчивости на удобрения, характер их влияния на формирование вегетативной массы двух гибридов был идентичным. Наибольшую прибавку урожая зеленой массы обеспечивало сложное комплексное минеральное удобрение нитроаммофоска, для гибрида Машук 220 МВ она составила 18,3 %, Машук 355 МВ – 21,2 %. При некорневых подкормках Батр Цинк на фоне естественного плодородия почвы урожайность зеленой массы повышалась на величины на уровне прибавок, полученных от внесения нитроаммофоски. Так, прибавка урожая зеленой массы гибридов в варианте с применением по листу только Батр Цинк варьировала от 5,2 до 7,7 т/га, на фоне полного минерального удобрения – от 6,3 до 7,0 т/га.

В сочетании с минеральными удобрениями некорневая подкормка обеспечивала тенденцию к повышению урожайности зеленой массы. Например, на фоне

Табл. 2. Влияние некорневой подкормки удобрением Батр Цинк на урожайность зеленой массы гибридов кукурузы (в среднем за 2021–2023 гг.)

Вариант	Машук 220 МВ		Машук 355 МВ	
	урожайность, т/га	прибавка, %	урожайность, т/га	прибавка, %
Контроль без удобрений	34,5	-	33,2	
Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 5 листьев	39,7	15,1	40,9	23,2
Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 8 листьев	40,5	17,4	40,0	20,5
N ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 5 листьев	39,5	14,5	37,3	12,3
N ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 8 листьев	38,7	12,2	40,7	22,6
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 5 листьев	40,3	16,8	39,2	18,1
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 8 листьев	40,8	18,3	40,2	21,1
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 5 листьев	39,9	13,5	40,4	21,7
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 8 листьев	40,0	15,9	40,3	21,4
НСР _{0,05}	2,9		5,7	
Ошибка, %	2,5		4,8	

аммиачной селитры ее рост у гибрида Машук 220 МВ на 0,8 т/га отмечали только от некорневой подкормки Батр Цинком в фазе 8 листьев. На гибриде Машук 355 МВ подкормка в сочетании с аммиачной селитрой повышала урожайность зеленой массы, по отношению к фону, на 1,9...3,4 т/га, с нитроаммофоской – на 0,1...0,2 т/га.

Несмотря на высокорослость и большой прирост вегетативной массы растений среднеспелого гибрида кукурузы Машук 355 МВ, его урожайность зеленой массы находилась на уровне среднераннего гибрида Машук 220 МВ, что связано с большей густотой посевов более раннего гибрида.

Все изучаемые удобрения положительно влияли на структурные показатели початков гибридов кукурузы (табл. 3). Улучшение минерального питания растений способствовало увеличению длины початков, числа

Табл. 3. Влияние некорневой подкормки удобрением Батр Цинк на структуру урожая гибридов кукурузы (в среднем за 2021–2023 гг.)

Вариант	Машук 220 МВ				Машук 355 МВ			
	длина початка, см	зерен в початке, шт.	масса початка, г	масса зерна, г	длина початка, см	зерен в початке, шт.	масса початка, г	масса зерна, г
Контроль без удобрений	16,3	416	124	100	16,2	427	164	133
Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 5 листьев	17,4	457	135	110	17,1	456	179	146
Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 8 листьев	17,2	461	138	112	17,2	461	179	145
N ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 5 листьев	17,2	449	134	110	17,2	465	178	145
N ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 8 листьев	17,3	453	135	110	17,3	471	184	150
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 5 листьев	17,4	432	134	109	17,2	463	178	145
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 8 листьев	17,5	455	136	111	17,6	470	181	147
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 5 листьев	17,7	446	134	111	17,6	461	180	146
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 8 листьев	17,6	460	139	116	17,1	455	182	148
НСР _{0,05}	1,0	36	11	9	1,3	47	15	13

зерен и их массы. Размер початков возрастал, по отношению к контролю, как от минеральных удобрений, так и от подкормки агрохимикатом Батр Цинк независимо от срока внесения удобрения. Подкормка на фоне естественного плодородия почвы увеличивала длину початков гибрида Машук 220 МВ на 0,9...1,1 см, гибрида Машук 355 МВ – на 0,9...1,0 см. В сочетании с внесением селитры рост величины этого показателя от подкормки у гибрида Машук 220 МВ составил 0,1...0,2 см, Машук 355 МВ – 0,2 см. Подкормка на фоне нитроаммофоски сопровождалась увеличением длины початков только у гибрида Машук 220 МВ – на 0,1...0,2 см.

Число зерен в початках гибрида Машук 220 МВ от подкормок Батр Цинк без предварительного внесения минеральных удобрений повышалось на 41...45 шт., гибрида Машук 355 МВ – на 29...34 шт. В сочетании с их применением влияние подкормки на величину этого показателя было несущественным. При улучшении условий только азотного питания у гибрида Машук 220 МВ она увеличивалась от подкормки Батр Цинк в фазе 5 листьев на 4 шт., Машук 355 МВ – на 6 шт. На фоне полного минерального питания рост числа зерен отмечали только в початках гибрида Машук 220 МВ – на 5 шт. от подкормки в фазе 8 листьев.

На массу початков и зерна с початков некорневая подкормка удобрением Батр Цинк также повлияла сильнее на фоне естественного плодородия почвы. В результате опрыскивания агрохимикатом растений гибрида Машук 220 МВ масса початков увеличивалась на 11...14 г, масса зерна – на 10...12 г. Масса початков гибрида Машук 355 МВ возрастала на 15 г, зерна – на 12...13 г. В вариантах с селитрой прибавки массы початков от подкормки варьировали в пределах 1...6 г, с нитроаммофоской – 1...3 г, массы зерна – 5 г и 1...5 г соответственно.

С увеличением структурных показателей повышался урожай зерна кукурузы. Рост урожайности зерна от подкормок агрохимикатом Батр Цинк без применения минеральных удобрений был более значительным (табл. 4). В среднем за 2021–2023 гг. урожайность гибрида Машук 220 МВ повышалась от подкормки удобрением Батр Цинк в фазе 5 листьев на 0,59 т/га, в фазе 8 листьев – на 0,63 т/га, гибрида Машук 355 МВ – на 0,83 и 0,74 т/га. Прибавки урожая зерна от применения только удобрения Батр Цинк в подкормку, по сравнению с прибавками, полученными при внесении в почву аммиачной селитры в дозе N₃₀, а также нитроаммофоски в дозе N₃₀P₃₀K₃₀ были равнозначными и существенными по отношению к контролю.

На фоне аммиачной селитры подкормки удобрением Батр Цинк не повышали сбор зерна гибрида Машук 220 МВ, а урожайность гибрида Машук 355 МВ возрастала на 0,38 т/га только от подкормки в фазе 5 листьев. В сочетании с внесением нитроаммофоски в почву подкормка растений оказалась неэффективной.

Считается, что более поздние гибриды кукурузы отличаются повышенной урожайностью [13, 14]. Однако в наших исследованиях в контроле без удобрения разница между ними была незначительной – 0,15 т/га. При этом наибольшей отзывчивостью на минеральные удобрения и агрохимикат Батр Цинк отличался гибрид Машук 355 МВ, у которого прибавки урожая зерна достигали 0,65...1,09 т/га, тогда как рост урожайности гибрида Машук 220 МВ варьировал от 0,40 до 0,64 т/га.

Высокая эффективность комплексного органоминерального удобрения Батр Цинк на гибридах кукурузы без применения минеральных удобрений может быть связана как с содержанием в составе макро-, мезо- и микроэлемен-

Табл. 4. Влияние некорневой подкормки удобрением Батр Цинк на урожайность зерна гибридов кукурузы (в среднем за 2021–2023 гг.)

Вариант	Машук 220 МВ		Машук 355 МВ	
	урожайность, т/га	прибавка, %	урожайность, т/га	прибавка, %
Контроль без удобрений	6,39	-	6,45	-
N ₃₀	7,03	10,0	7,16	11,0
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	6,79	6,3	7,26	12,6
Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 5 листьев	6,98	9,2	7,28	12,9
Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 8 листьев	7,02	9,9	7,19	11,5
N ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 5 листьев	6,98	9,2	7,54	16,9
N ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 8 листьев	6,79	6,3	7,10	10,1
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 5 листьев	6,89	7,8	7,12	10,4
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ +Батр Цинк (1,0 л/га) в фазе 8 листьев	6,87	7,5	7,27	12,7
НСР _{0,05}	0,22		0,29	
Ошибка, %	1,15		1,42	

тов с комплексом активных органических компонентов, так и с механизмом поступления элементов питания и их усвоения самим растением. Исследователями доказана хозяйственно-биологическая и экономическая эффективность комплексов хелатных препаратов на яровой пшенице и льне масличном, которые положительно влияют не только на урожайность культур, но и на питательную ценность, а также химический состав продукции [15, 16]. Некоторые авторы отмечают, что процесс поглощения элементов питания листьями отличается от корневого питания из-за наличия в листовом аппарате специфических структур (кутикула, устьица, трихомы и др.) [17]. У кукурузы это может быть связано с «доставкой» элементов питания непосредственно в листья, их относительно быстрым всасыванием и вступлением в биохимические процессы в независимости от корневой деятельности и наличия влаги в почве [18]. Вероятно, тех элементов питания, которые содержатся в удобрении Батр Цинк и поступают через листья, достаточно для получения существенной прибавки урожая зеленой массы и зерна без применения минеральных удобрений, поступающих через корни.

Выводы. На черноземе обыкновенном карбонатном в зоне достаточного увлажнения Ставропольского края некорневые подкормки кукурузы в фазе 5 или 8 листьев комплексным органоминеральным удобрением Батр Цинк в дозе 1,0 л/га положительно влияют на рост растений. В фазе цветения высота растений гибрида Машук 220 МВ увеличивается в среднем на 14 и 16 см, гибрида Машук 355 МВ – на 17 и 23 см. При этом урожайность зеленой массы гибрида Машук 220 МВ повышается на 5,2 и 6,0 т/га (15,1 и 17,4 %), гибрида Машук 355 МВ – на 7,7 и 6,8 т/га (23,2 и 20,5 %) и находится на уровне варианта с применением нитроаммофоски в дозе N₃₀P₃₀K₃₀.

Опрыскивания растений кукурузы удобрением Батр Цинк, увеличивает длину и массу початков, число и массу зерен в початках. В результате сбор зерна гибрида Машук 220 МВ с 1 га повышается при подкормке в фазе 5 листьев кукурузы на 0,59 т и 8 листьев – на 0,63 т (9,2 и 9,9 %), гибрида Машук 355 МВ – соответственно на 0,83 и 0,74 т (12,9 и 11,5 %). Рост урожая зерна от применения удобрения Батр Цинк в подкормку равнозначен прибавкам, полученным при внесении в почву аммиачной селитры в дозе N₃₀ или нитроаммофоски в дозе N₃₀P₃₀K₃₀.

Существенных различий в прибавках урожая зеленой массы и зерна в зависимости от сроков некорневых подкормок не установлено. На черноземе обыкновенном в зоне достаточного увлажнения Ставропольского края удобрение Батр Цинк можно применять без внесения в почву минеральных удобрений до посева, так как на их фоне подкормка не обеспечивает более высоких прибавок урожая зеленой массы и зерна.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института. 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. Усанова З. И., Шальнов И. В., Васильев А. С. Влияние расчетных доз удобрений и густоты стояния на продуктивность кукурузы, вынос и хозяйственный баланс основных элементов питания // *Земледелие*. 2016. № 3. С. 23–26.
2. Эффективность фоллиарной обработки посевов кукурузы комплексными и микробиологическими удобрениями / С. И. Коконов, Р. Д. Валиуллина, Т. Н. Рябова и др. // *Кормопроизводство*. 2020. № 5. С. 26–29.
3. Shcatula Y. Evaluation of efficiency of application of growth stimulators and microfertilizers in maize crops // *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021. No. 57. P. 8–14.
4. Васильченко С. А., Метлина Г. В., Лактионов Ю. В. Влияние применения биопрепаратов и микроэлементного удобрения Органомикс на урожайность зерна кукурузы на юге Ростовской области // *Зерновое хозяйство России*. 2021. № 5 (77). С. 81–85.
5. Семина С. А., Гаврюшина И. В. Влияние препаратов с микроэлементами на морфобиометрические показатели и урожайность кукурузы // *Агрохимический вестник*. 2017. № 6. С. 43–46.
6. Васин В. Г., Кошелев И. К. Урожайность и кормовые достоинства гибридов кукурузы при внесении минеральных удобрений и стимуляторов роста // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018. № 2(42). С. 45–53.
7. Palai J. B., Jena J., Lenka S. K. Growth, yield and nutrient of maize as affected by zinc application // *Indian Journal of Pure Applied Biosciences*. 2020. No. 8 (2). P. 332–339.
8. Effect of zinc application strategies on maize grain yield and zinc concentration in mollisols / N. Martinez-Cuesta, W. Carciocchi, H. Sainz-Rozas, et al. // *Journal of Plant Nutrition*. 2021. Vol. 44. No. 4. P. 486–497.
9. Modelling long-term yield and soil organic matter dynamics in a maize cropping system / S. Maseko, M. Van der Laan, D. Marais, et al. // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2022. Vol. 124. No. 3. P. 299–313.
10. Hekmat A. W., Mohammadi N. K., Ghosh G. Effect of NPK, biofertilizer and zinc foliar nutrition on growth and growth attributes of baby corn (*Zea mays L.*) // *International Journal of Chemical Studies*. 2019. No. 7 (4). P. 2432–2436.
11. Багринцева В. Н., Шмалько И. А. Эффективность применения удобрений Вуксал Макромикс для некорневой подкормки кукурузы // *Агрохимия*. 2021. № 7. С. 55–64.

12. Шмалько И. А., Багринцева В. Н. Урожай и окупаемость удобрений при корневом и некорневом питании растений кукурузы // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2022. Т. 52. № 3. С. 17–23.
13. Кривошеев Г. Я., Шевченко Н. А. Влияние гидротермического коэффициента на урожайность зерна гибридов кукурузы различных групп спелости // *Зерновое хозяйство России*. 2020. Т. 68. № 2. С. 8–12.
14. Панфилова О. Н., Чугунова Е. В., Дерунова С. Н. Зависимость урожая зерна кукурузы и уборочной влажности от ГТК в условиях Волгоградской области // *Аграрный научный журнал*. 2023. № 1. С. 34–40.
15. Применение хелатов микроэлементов в технологии возделывания яровой пшеницы / Н. В. Войтович, В. М. Никифоров, М. И. Никифоров и др. // *Земледелие*. 2019. № 6. С. 25–26.
16. Жарких О. А., Дмитриевская И. И., Белопухов С. Л. Применение новых хелатных препаратов на льне масличном // *Известия ТСХА*. 2021. Вып. 4. С. 30–40.
17. Егоров В. С., Держинская А. А. Фолиарное применение удобрений и механизм их поступления в растения // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2015. № 2. С. 51–57.
18. Hu Y., Burcus Z., Schmidhalter U. Effect of foliar fertilization application on the growth and mineral nutrient content of maize seedlings under drought and salinity // *Soil Science Plant Nutrition*. 2008. Vol. 54. P. 133–141.

Поступила в редакцию 29.02.2024

После доработки 25.03.2024

Принята к публикации 09.04.2024

Растениеводство, защита и биотехнология растений

УДК 633.14:575.222.6

DOI 10.31857/S2500262724020036 EDN GTYJNP

ОЦЕНКА КОМБИНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ИНБРЕДНЫХ ЛИНИЙ ОЗИМОЙ РЖИ ПО ВЫСОТЕ РАСТЕНИЙ

А. А. Гончаренко, академик РАН, **А. В. Макаров**, доктор сельскохозяйственных наук, **Т. В. Семенова**, **В. Н. Точилин**, **Н. А. Клочко**, **Н. В. Цыганкова**, **М. С. Гончаренко**, кандидаты сельскохозяйственных наук, **П. А. Плотников**

Федеральный исследовательский центр «Немчиновка»,
143026, Московская обл., Одинцовский р-н, р.п. Новоивановское, ул. Агрохимиков, 6
E-mail: goncharenko05@mail.ru

Исследования проводили с целью оценки общей и специфической комбинационной способности инбредных линий озимой ржи по высоте растений и выявления относительно короткостебельных гибридных комбинаций. Исходным материалом для скрещивания послужили 22 гомозиготные линии озимой ржи, несущие стерильную цитоплазму типа Пампа. В качестве тестеров использовали мужские фертильные гомозиготные линии mf H-1423, mf H-1247, mf H-732 и mf H-842, у которых высота растений составляла соответственно 122 см, 120 см, 102 см и 100 см. Тестовые скрещивания проводили на изолированных участках по схеме топкросса. Всего было получено 88 простых гибридов F1. Их испытание проводили на делянках 8,0 м² в 3-х повторениях. Средняя высота растений у гибридов F1 составила 129 см и варьировала от 114 см до 145 см. Наиболее короткостебельными оказались генотипы с участием тестера mf H-732 и mf H-842, а наиболее высокорослыми – с участием тестера mf H-1423. В дисперсию признака высота растения существенный вклад вносили как общая (ОКС), так и специфическая (СКС) комбинационная способности. Существенно более высокой ОКС, по сравнению с другими линиями, обладали генотипы ms H-422 и ms H-1179, а более низкой – ms H-700 и ms H-1058. Среди тестеров достоверно более высокой, по сравнению с другими линиями-тестерами, ОКС характеризовались высокостебельные линии mf H-1423 и mf H-1247, а более низкой – короткостебельные тестеры mf H-732 и mf H-842. Комбинации с участием короткостебельных тестеров составили группу наиболее короткостебельных гибридов, у которых высота растений варьировала от 114 до 120 см. Для практической селекции большую ценность представляют линии с низкими эффектами не только по ОКС, но и по СКС. Выделена линия ms H-700, которая сочетала в себе оба эти признака.

ASSESSMENT OF THE COMBINATIONAL ABILITY OF INBRED WINTER RYE LINES IN PLANT HEIGHT

A. A. Goncharenko, **A. V. Makarov**, **T. V. Semenova**, **V. N. Tochilin**, **N. A. Clochko**, **M. S. Goncharenko**, **N. V. Tsygankova**, **P. A. Plotnikov**

Federal Research Center «Nemchinovka»,
143026, Moskovskaya obl., Odintsovskii r-n, r.p. Novoivanovskoe, ul. Agrokhimikov, 6
E-mail: goncharenko05@mail.ru

The aim of the research is to evaluate the general and specific combinational ability of inbred winter rye lines in plant height and identify relatively short-stemmed combinations. The starting material for the crossing was 22 homozygous rye lines carrying sterile cytoplasm of the Pampa type. The male fertile homozygous lines mf H-1423, mf H-1247, mf H-732 and mf H-842 were used as testers, in which the plant height was 122 cm, 120 cm, 102 cm and 100 cm, respectively. Test crosses were carried out in isolated plots according to the topcross scheme. A total of 88 simple F1 hybrids were produced. They were tested on plots of 8.0 m² in 3 repetitions. The average height of plants in F1 hybrids was 129 cm and ranged from 114 cm to 145 cm. The hybrids with the participation of the mf H-732 and mf H-842 tester turned out to be the shortest-stemmed, and the tallest ones with the participation of the mf H-1423 tester. Both general (GCA) and specific (SCA) combinational abilities made a significant contribution to the variance of the plant height trait. The genotypes ms H-422 and ms H-1179 had a significantly higher GCA compared to other lines, and ms H-700 and ms H-1058 had a lower one. Among the testers, the high-stemmed mf H-1423 and mf H-1247 lines had a reliably high GCA, and the short-stemmed mf H-732 and mf H-842 testers had a reliably low GCA. Combinations involving short-stemmed testers made up a group of the shortest-stemmed hybrids, in which plant height varied from 114 to 120 cm. It is shown that lines with low effects are of great value for practical breeding not only for GCA, but also for SCA. The ms H-700 line is of interest, which simultaneously combines low grades in GCA and SCA.

Ключевые слова: озимая рожь (*Secale cereale* L.), общая и специфическая комбинационная способность, линия, тестер, гибрид, высота растений.

Key words: winter rye (*Secale cereale* L.), general and specific combination ability, line, tester, hybrid, plant height.

Одно из слабых мест в архитектонике растения озимой ржи – длинностебельность и обусловленная этим недостаточная высокая устойчивость к полеганию [1]. Это снижает ее конкурентоспособность, по сравнению с пшеницей и тритикале, поскольку сдерживает применение интенсивных технологий возделывания. Вредность полегания заключается не только в усложнении механизированной уборки и высоких потерях урожая (до 50 %), но и в снижении общего биологического урожая [2, 3]. В связи с ростом культуры земледелия заметно возросла потребность в неполегающих сортах

ржи. В известной мере такая ситуация обусловлена тем, что межлинейные гибриды проявляют гетерозис не только по урожаю зерна, но и по высоте растений, что снижает их устойчивость к полеганию. По этой причине селекция короткостебельных гибридов озимой ржи оказалась более проблемной, чем у популяционных сортов. Оптимально селекционируемые гибриды F1 должны сочетать высокий гетерозис по урожайности с минимально низким гетерозисом по высоте растений, величина которого у ржи довольно значительная. При межлинейных скрещиваниях она может достигать 31 %

[4]. Сходные результаты получены и в наших исследованиях [5]: средний гипотетический гетерозис по высоте растений составил 34,4 % с колебаниями по гибридам от 21,4 до 47,0 %. При этом частота появления низкогетерозисных гибридов была невысокой – 3 из 10.

Высота растений ржи – по своей природе количественный признак, который находится под полигенным контролем и фенотипически проявляется как сумма эффектов многих генов, скорректированная влиянием взаимодействия генотипа со средой [6]. По другим данным [7], высота растений ржи имеет сложную генетическую архитектуру и контролируется множеством локусов, разбросанных по всему геному. Важный этап селекции гетерозисных гибридов ржи – проведение тестовых скрещиваний и последующее испытание гибридов в различных почвенно-климатических условиях. Основная задача такого исследования – оценить родительские формы по комбинационной способности. Это необходимо для того, чтобы добиться максимального проявления эффекта гетерозиса в гибридном потомстве [8, 9, 10]. По существу, селекция на гетерозис – это селекция на комбинационную способность, которую в этой связи можно считать генетически обусловленным признаком.

Комбинационную способность подразделяют на общую (ОКС) и специфическую (СКС). Такое разделение впервые обосновали Sprague G. F. и Tatum L. G. на кукурузе [11]. Они определили, что оценка по ОКС отражает среднюю ценность родительской формы в гибридных комбинациях с ее участием, а по СКС позволяет выявить те пары линий, которые при скрещивании образуют наиболее гетерозисный гибрид. Генетическая основа обоих этих феноменов базируется на предположении, что ОКС – результат аддитивного взаимодействия генов, детерминирующих признак, а потенциал СКС зависит от степени доминирования в локусах и эпистатического взаимодействия генов.

В научной литературе относительно мало работ по теме комбинационной способности у озимой ржи. Обусловлено это тем, что сама история гибридной селекции ржи началась недавно, всего 50 лет назад [8]. Следует отметить, что оценка линий по ОКС важнее при оценке гибридов, полученных от скрещивания родителей из разных генопулов. Наоборот, оценка по СКС играет более значимую роль при оценке гибридов от скрещивания родителей из одного генопула [12]. Экспериментально показано, что эффекты ОКС и к СКС проявляются по широкому спектру признаков. Miedaner T. et al [13] сообщают, что инбредные линии ржи, созданные на базе диких источников из Аргентины и Ирана, имели существенно высокую ОКС и СКС по ряду хозяйственно ценных признаков, включая пыльцеобразование и восстановление мужской фертильности. Интрогрессия ценных признаков от этих экзотических источников в культурные линии позволила получить гибриды ржи с высоким (55...90 %) и экологически стабильным уровнем пыльцеобразования, что имеет существенное значение при использовании ЦМС типа Пампа.

Особый интерес представляет вклад ОКС и СКС родительских форм в генетическую детерминацию отдельных количественных признаков. В литературе нет однозначного представления о доле их влияния на гетерозисный потенциал гибридов. Польские исследователи Kolasinska I. et al. [14] сообщали о результатах изучения комбинационной способности у 29 инбредных линий ржи по 8 признакам: урожайность, масса 1000 зерен, высота растений, дата колошения, пыльцеобразующая способность, степень полегания, поражение бурой ржавчиной и мучнистой росой. Авторы отмечали преоблада-

ние аддитивного взаимодействия генов в детерминации большинства изученных признаков. Однако в наследовании признака урожайности и некоторых ее структурных элементов важную роль играют доминирование и эпистаз. Отмечено также более высокое варьирование ОКС материнских и отцовских компонентов по большинству признаков. Константы СКС значимо варьировали только по трем признакам: высота растений, пыльцеобразующая способность и масса 1000 зерен.

Результаты наших исследований [15, 16] свидетельствуют о высокой достоверности эффектов ОКС и СКС по высоте растений. Однако долевое соотношение этих видов генных взаимодействий неравнозначно. Доля генотипической вариации, приходящаяся на ОКС, составила 74,9...79,2 %, а на долю СКС приходилось 20,1...23,8 % от всей изменчивости. Это указывает, что значительная часть вариации ОКС обусловлена аддитивными эффектами генов, которые связаны с гетерозисом. Установлена также достоверная связь эффектов ОКС по урожайности с высотой растений инбредных линий: коэффициент корреляции был высокодостоверным ($r=0,90\pm 0,10$), что указывает на возможность раннего прогнозирования комбинационной ценности родительских линий по этому признаку.

В контексте обсуждаемого вопроса сходные результаты получены и на других перекрестноопыляемых культурах [17, 18, 19]. Некоторые исследователи отмечают высокую вариабельность общей и специфической комбинационной способности под влиянием погодных, агротехнических и других условий окружающей среды. Установлено, что СКС более изменчива, чем ОКС, и в большей степени варьирует в зависимости от места и года испытания, то есть ее потенциал в значительной степени определяется взаимодействием генотип – среда. Поэтому при изучении комбинационной способности важно выявить такие комбинации, которые обладают стабильно высокими показателями по селективируемому признаку [14, 20].

Цель исследований – оценить общую и специфическую комбинационную способность инбредных линий озимой ржи по высоте растений и выявить среди них относительно короткостебельные генотипы для целей гибридной селекции.

Методика. Исследования проводили в 2021–2022 гг. на полях экспериментальной базы ФИЦ «Немчиновка» (Московская обл.). Почва опытного участка дерново-подзолистая, суглинистая, с содержанием гумуса 2,1 %, рН солевой вытяжки в слое почвы 0...20 см составляет 6,6, содержание подвижных форм калия и фосфора – соответственно 81...120 мг/кг и 101...150 мг/кг.

Исходным материалом для исследований послужили 88 простых межлинейных гибридов F1, которые получали от скрещивания по схеме топкросса 22 мужски стерильных линий с 4 мужски фертильными линиями (тестерами): mf Н-1423, mf Н-1247, mf Н-732, mf Н-842. Линии-тестеры существенно различались по высоте растений: mf Н-1423 и mf Н-1247 были сравнительно высокорослыми (соответственно 122 и 120 см), mf Н-732 и mf Н-842 – низкорослыми (102 и 100 см). Все материнские линии скрещивали с общим тестером, в качестве которого использовали фертильные линии. Это повышает результативность работы, так как улучшается точность отбора линий с высокой или низкой СКС. Немаловажно и то, что по мере увеличения числа тестеров, используемых в скрещивании, возрастает их генетическое разнообразие и, следовательно, точность оценки по ОКС. Инбредные линии получали методом многократного инцухта растений из гибридных по-

пуляций от скрещивания доноров самофертильности с сортами-популяциями, относящимся к трем различным генопулам: немчиновскому, саратовскому и вятскому. Стерильные аналоги инбредных линий создавали методом насыщающих скрещиваний, которые проводили зимой в теплице. В качестве источника стерильной цитоплазмы типа Пампа использовали стерильную линию ms H-1185. Тестовые скрещивания проводили на пространственно изолированных участках. Каждую стерильную линию высевали на делянке 5 м², которая опылялась окружающим ее фертильным тестером. В итоге получили 88 простых межлинейных гибридов F1, полевые испытания которых проводили на делянках 8,0 м² в 3-х кратной повторности при норме высева 500 зерен на 1 м². Высоту растений измеряли в фазе восковой спелости в трех местах делянки и вычисляли среднюю. Эффекты ОКС и константы СКС определяли на основе математической модели, предложенной В. Г. Вольф и у П. У. Литун [21]. Стандартные ошибки и достоверность различий оценивали при уровне вероятности P = 0,95.

Метеоусловия в годы исследований были различными. В 2021 г. май был прохладным и влажным (осадков выпало 163 % от нормы), июнь и июль – сухим и жарким (осадков выпало 51 % от нормы). Относительно благоприятные условия сложились в 2022 г., когда в период налива и созревания зерна стояла умеренно теплая и влажная погода, а полегание посевов было незначительным.

Результаты и обсуждение. Средняя высота растений изучаемых гибридов составила 129 см и варьировала от 114 до 145 см (табл. 1). В зависимости от генотипа линии-тестера размах варьирования высоты растений гибридов составлял от 122 до 136 см и был выше, чем у гибридов с участием материнских линий (от 126 до 133 см). Наиболее короткостебельными оказались гибриды с участием тестера mfH-732 (122 см) и mfH-842 (123 см), а самыми высокорослыми – с участием тестера mf H-1423 (136 см) и mf H-1247 (135 см). Важно отметить, что, хотя сила влияния материнских линий была менее выраженной, она также имела место: лучшими по короткостебельности были гибриды с участием линий ms H-700 (126 см) и ms H-1058 (126 см), а худшими

Табл. 1. Высота растений у простых межлинейных гибридов F1 озимой ржи, см

Стерильная линия	Фертильная линия (тестер)				Среднее (Xi)
	mf H-1423	mf H-1247	mf H-732	mf H-842	
ms H-139	133	132	126	123	128±2,4
ms H-283	135	140	126	126	132±3,5
ms H-325	135	138	120	124	129±4,3
ms H-422	140	138	124	127	132±4,0
ms H-463	143	132	123	122	130±4,9
ms H-577	132	127	124	124	127±1,9
ms H-649	137	132	123	127	130±3,0
ms H-699	135	135	123	124	129±3,3
ms H-700	132	130	122	119	126±3,1
ms H-732	132	127	123	126	127±1,9
ms H-1051	145	133	119	124	130±5,7
ms H-1054	125	138	123	125	128±3,4
ms H-1058	125	135	120	124	126±3,2
ms H-1074	138	138	121	121	129±4,9
ms H-1078	133	140	125	124	131±3,7
ms H-1099	133	132	124	120	127±3,1
ms H-1179	140	142	124	125	133±4,8
ms H-1185	137	135	120	120	128±4,6
ms H-1238	145	130	118	124	129±5,8
ms H-1276	138	135	121	129	131±3,7
ms H-1309	138	137	119	114	127±6,1
ms H-1370	138	142	125	120	131±5,2
Среднее (Xj)	136±1,1	135±0,9	122±0,5	123±0,7	129±0,4
HCP ₀₅ чр.	4,7				

с линией ms H-1179 (133 см). На их фоне наиболее короткостебельными (114...119 см) отмечено 5 гибридов: ms H-1309 × mfH-842, ms H-1238 × mfH-732, ms H-1309 × mfH-732, ms H-1051 × mfH-732, ms H-700 × mfH-842.

Дисперсионный анализ исходных данных показал наличие достоверных различий между гибридами по высоте растений ($F_{\text{факт.}} = 20,1 > F_{05} = 1,5$). Это открывает возможности для определения эффектов ОКС и СКС, которые служат основной причиной варьирования гибридов по рассматриваемому признаку (табл. 2). Известно [22], что по отношению средних квадратов оценок ОКС и СКС можно судить о характере генетического контроля того или иного количественного признака. В наших опытах на долю эффектов ОКС приходилось 89,6 % изменчивости высоты растений изучаемых гибридов, на долю СКС – 10,4 %. Из этого следует, что основным компонентом генотипического варьирования изучаемого признака было аддитивное действие генов. Такое заключение подтверждает относительно широкое соотношение средних квадратов для ОКС и СКС, которое для материнских линий было равно 1,2, для отцовских линий-тестеров – 7,4. Это указывает на высокую генетическую дивергенцию изучаемых линий. Однако и величину средних квадратов СКС не следует сбрасывать со счетов. Она свидетельствует о существенном вкладе в генетическую вариацию признака неаддитивных эффектов генов. Поэтому при выборе лучших инбредных линий для скрещивания важно оценивать уровень обеих рассматриваемых характеристик.

Табл. 2. Дисперсионный анализ комбинационной способности инбредных линий по высоте растений

Источник дисперсии	SS	df	ms ²	F _{факт.}	F ₀₅
ОКС ms линий	397	21	18,9	9,0	1,8
ОКС mf тестеров	348	3	116,0	55,2	2,6
СКС	992	63	15,7	7,5	1,4
Остаточная	365	174	2,1		

Сравнительная оценка эффектов ОКС стерильных (g_i) и фертильных (g_j) линий показала, что изучаемые линии значительно различались по общей комбинационной способности (табл. 3). Для выявления линий с высокой и низкой ОКС, необходимо оценить существенность различий между ними на основе ошибки разности Ed_{gi} . Но так как средняя ОКС для стерильных линий и тестеров была равна 0, то фактическое значение эффектов ОКС по каждой линии представляло собой разницу, которую надо сопоставлять с HCP_{05} . Для стерильных линий величина ошибки Ed_{gi} была равна 1,41, $HCP_{05} = -2,82$, а для фертильных тестеров – соответственно 0,53 и 1,06. по результатам сравнения оказалось, что достоверно высокой ОКС, по сравнению с другими линиями, обладали линии ms H-422 и ms H-1179, а низкой – ms H-700 и ms H-1058. Комбинации с их участием контрастно различались по высоте растений. Гибриды, где в качестве одной из родительских форм выступали линии ms H-422 и ms H-1179, отличались относительной высокостебельностью (соответственно 132 см и 133 см), линии ms H-700 и ms H-1058 – относительной короткостебельностью (у обеих комбинаций 126 см).

Среди тестеров существенно выше была ОКС у линий mfH-1423 и mfH-1247, а достоверно ниже – у линий mfH-732 и mfH-842. Следовательно, используя низкие эффекты ОКС в качестве критерия для отбора, можно селекционировать линии, дающие относительно короткостебельные гибриды (на уровне 126 см), тогда как отбор линий по высоким оценкам ОКС приведет к синтезу высокорослых гибридов (на уровне 132...133 см).

Для выявления относительно короткостебельных комбинаций вычисляли константы СКС по высо-

Табл. 3. Оценка эффектов ОКС стерильных линий (g_i) и фертильных линий-тестеров (g_j)

Линия	Эффект ОКС	Линия	Эффект ОКС
Стерильные:		Стерильные:	
ms H-139	-0,59	ms H-1099	-1,80
ms H-283	1,78	ms H-1179	3,52*
ms H-325	0,14	ms H-1185	-1,08
ms H-422	3,04*	ms H-1238	-0,13
ms H-463	0,86	ms H-1276	1,58
ms H-577	-2,30	ms H-1309	-2,00
ms H-649	0,62	ms H-1370	2,07
ms H-699	0,13	Σ=	0
ms H-700	-3,26**	Тестеры:	
ms H-732	-2,05	ms H-1423	6,53*
ms H-1051	1,10	ms H-1247	5,61*
ms H-1054	-1,32	ms H-732	-6,49**
ms H-1058	-3,00**	ms H-842	-5,65**
ms H-1074	0,37	Σ=	0
ms H-1078	1,34		

$НСР_{05}$ для сравнения ОКС материнских ms линий со средней – 2,82; для сравнения ОКС отцовских mf тестеров со средней – 1,06

*линия с достоверно высокой ОКС; **линия с достоверно низкой ОКС.

те растений и определяли линии со специфическим взаимодействием по этому признаку. Оценку различий по СКС между стерильными линиями и фертильными тестерами выполняли с использованием средней вариации для каждой категории генотипов. В наших исследованиях средняя дисперсия эффектов СКС по 22 стерильным линиям ($\sigma^2_{s_i}$) была равна 13,7, по 4 тестерам ($\sigma^2_{s_j}$) – 9,8 (табл. 4). Результаты сравнения фактических дисперсий по каждой линии с этими величинами свидетельствуют, что в отдельных комбинациях скрещивания существенно более высокие оценки СКС продемонстрировали 9 стерильных линий (ms H-463, ms H-577, ms H-732, ms H-1051, ms H-1054, ms H-1058, ms H-1238, ms H-1309, ms H-1370) и 2 фертильных тестера (mf H-1423 и mf H-1247). Гибриды с их участием сформировали группу, у которой высота растений достигала 142 ...145 см. Самыми высоко-

Табл. 4. Оценка констант СКС у материнских ms линий и отцовских mf тестеров

Стерильная линия	Фертильная линия-тестер				ΣS^2_{ij}	Дисперсия СКС ($\sigma^2_{s_i}$)
	mf H-1423	mf H-1247	mf H-732	mf H-842		
ms H-139	-2,2	-2,3	4,2	0,3	27,86	7,9**
ms H-283	-3,5	2,5	1,0	0,1	19,51	5,1**
ms H-325	-1,0	3,0	-2,5	0,6	16,61	4,1**
ms H-422	1,0	0	-1,6	0,6	3,61	0,1**
ms H-463	6,2	-3,8	-0,3	-2,1	57,38	17,7*
ms H-577	-1,5	-5,5	4,0	3,1	58,11	18,0*
ms H-649	0,5	-3,5	0	3,1	22,11	6,0**
ms H-699	-1,1	0	0,5	0,6	1,61	0,8**
ms H-700	-0,5	-1,5	3,0	-0,9	12,31	2,7**
ms H-732	-1,8	-5,8	2,7	4,8	67,21	21,0*
ms H-1051	8,0	-3,0	-4,5	-0,4	93,41	29,7*
ms H-1054	-9,5	4,5	2,0	3,1	124,11	39,9*
ms H-1058	-7,8	3,2	0,7	3,8	86,01	27,3*
ms H-1074	1,7	2,7	-1,8	-2,7	20,71	5,5**
ms H-1078	-4,2	3,7	1,2	-0,6	33,13	9,6
ms H-1099	-1,0	-1,0	3,5	-1,4	16,21	4,0**
ms H-1179	0,5	3,5	-2,0	-1,9	20,11	5,3**
ms H-1185	2,2	1,2	-1,3	-2,2	12,81	2,9**
ms H-1238	9,0	-5,0	-4,5	0,6	126,61	40,8*
ms H-1276	0,5	-1,5	-3,0	4,1	28,31	8,0**
ms H-1309	4,2	4,2	-1,3	-7,2	88,81	28,2*
ms H-1370	0	5,0	0,5	-5,4	54,41	16,7*
ΣS^2_{ij}	405,1	258,4	138,3	189,1	-	-
$\sigma^2_{s_j}$	17,3*	10,3*	4,6**	7,0**	-	-

Средняя дисперсия СКС по ms линиям $\sigma^2_{s_i} = 13,7$; по mf тестерам $\sigma^2_{s_j} = 9,8$

*линии с достоверно высокой СКС; **линии с достоверно низкой СКС.

рослыми оказались гибриды ms H-1238 × mf H-1423, ms H-1051 × mf H-1423, ms H-463 × mf H-1423, ms H-1370 × mf H-1247, ms H-1179 × mf H-1247.

Достоверно низкие константы СКС отмечены у 12 стерильных линий. Среди фертильных линий-тестеров достоверно низкую СКС показали mf H-732 и mf H-842. Особый интерес представляют гибриды, у которых одна или обе родительские формы обладали низкой специфической комбинационной способностью по высоте растений, а потому могли отличаться короткостебельностью. В наших исследованиях такими оказались гибриды ms H-325 × mf H-732, ms H-700 × mf H-842, ms H-1051 × mf H-732, ms H-1058 × mf H-732, ms H-1099 × mf H-842, ms H-1185 × mf H-732, ms H-1185 × mf H-842, ms H-1238 × mf H-732, ms H-1309 × mf H-732, ms H-1309 × mf H-842, ms H-1370 × mf H-842. Высота растений перечисленных гибридов была наименьшей в опыте и варьировала в пределах 114...120 см. Это представляет интерес для практической селекции, так как дает возможность синтезировать относительно низкорослые комбинации. Особого внимания заслуживает стерильная линия ms H-700, которая сочетала в себе низкие оценки как по ОКС, так и по СКС.

Селекционный интерес представляют также линии с альтернативными оценками по ОКС и СКС. В наших исследованиях такими были ms H-422 (высокая ОКС и низкая СКС), ms H-1058 и ms H-1309 (низкая ОКС и высокая СКС). Теоретически можно ожидать, что с участием первой линии могут быть получены гибриды с примерно одинаковой высотой растений, а с участием двух других – гибриды с разным уровнем выраженности этого признака [22].

Комбинационная способность, как отмечалось ранее, – генетически обусловленный признак, который трудно поддается измерению. В этой связи практический интерес представляет поиск признаков, тесно коррелирующих с эффектами ОКС. В литературе имеются данные [23], что потенциал ОКС по урожайности относительно тесно ($r_g > 0,7$) коррелирует с такими признаками как высота растения, масса 1000 зерен, натура зерна, число падения и содержание крахмала. В наших исследованиях [15, 16] также была установлена положительная корреляция между оценками ОКС линий по урожайности и высотой растений ($r=0,85\pm 0,10$), а также массой 1000 зерен ($r=0,80\pm 0,13$). Это указывает на необходимость добиваться сочетаемости признаков продуктивности и короткостебельности в процессе гибридной селекции ржи.

Выводы. Таким образом, ведущую роль в генетической изменчивости признака высота растения играет общая комбинационная способность скрещиваемых линий, специфическая комбинационная способность влияет на нее в меньшей степени. Анализ эффектов общей и специфической комбинационной способности 22 материнских стерильных линий и 4 фертильных отцовских линий-тестеров позволил выделить среди них две относительно контрастные группы. Существенно большей ОКС по высоте растений обладали материнские линии ms H-422 и ms H-1179, тестеры mf H-1423 и mf H-1247, а достоверно меньшей ОКС – материнские линии ms H-700 и ms H-1058, тестеры mf H-732 и mf H-842. Комбинации с участием короткостебельных тестеров сформировали группу наиболее короткостебельных гибридов.

Для практической селекции большую ценность представляют комбинации с низкими константами СКС родительских форм. В нашем исследовании это были гибриды ms H-325 × mf H-732, ms H-700 × mf H-842,

ms H-1051 × mf H-732, ms H-1058 × mf H-732, ms H-1099 × mf H-842, ms H-1185 × mf H-732, msH-1185×mfH-842,H-1238×mfH-732,msH-1309×mfH-732, ms H-1309 × mf H-842, ms H-1370 × mf H-842, у которых высота растений была самой низкой в опыте и варьировала на уровне 114...120 см. Особого внимания заслуживает стерильная линия ms H-700, которая сочетала в себе низкие оценки как по ОКС, так и по СКС.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального исследовательского центра «Немчиновка». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным 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. Чайкин В. В., Тороп А. А., Тороп Е. А. Изменение архитектуры растения как направление в селекции озимой ржи // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2021. № 3. С. 24–33. doi: 10.24412/2309-348X-2021-3-23-33.
2. Практическое использование в селекции озимой ржи способов, позволяющих сочетать в сорте урожайность и устойчивость к неблагоприятным условиям / А. А. Тороп, В. В. Чайкин, Е. А. Тороп и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 3. С. 32–35. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10306.
3. Кобылянский В. Д., Солодухина О. В. Использование доноров ценных признаков растений в селекции новых сортов озимой ржи // *Достижения науки и техники АПК*. 2015. № 7. С. 7–12.
4. Geiger H., Miedaner T. Rye (*Secale cereale* L.) // *Cereals. Handbook of Plant Breeding* / eds. M. Carena. New York: Springer, 2009. Vol. 3. P. 157–181. doi: 10.1007/978-0-387-72297-9_4.
5. Гончаренко А. А. Актуальные вопросы селекции озимой ржи. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. 369 с.
6. Geiger H. H. Strategies of Hybrid Rye Breeding // *Vortr. Pflanzenzucht*. 2007. Vol. 41. P. 1–5.
7. Genetic architecture of plant height in winter rye introgression libraries / T. Miedaner, B. U. Muller, H.-P. Piepho, et al. // *Plant breeding*. 2010. Vol. 130 (2). P. 209–216.
8. 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.
9. Урбан Э. П., Гордей С. И. Селекция и проблемы возделывания гетерозисных гибридов F1 озимой ржи в Республике Беларусь // *Вес. Нац. Акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук*. 2018. Т. 56. № 4. С. 448–455.
10. Wilde P., Miedaner T. Hybrid Rye Breeding // *The Rye Genome. Compendium of Plant Genomes* / M. T. Rabanus-Wallase, N. Stein. Cham: Springer, 2021. P. 13–41. doi: 10.1007/978-3-030-83383-1_2.
11. Sprague G. F., Tatum L. G. General and specific combining ability in single crosses of corn // *J. Amer. Soc. Agron.* 1942. Vol. 34. P. 923–932. doi: 10.2134/agronj1942.00021962003400100008x.
12. Melchinger A. E., Frish M. Genomic prediction in hybrid breeding: II. Reciprocal recurrent genomic selection with full-sib and half-sib families // *Theor. and Appl. Genetic*. 2023. Vol. 136. P. 203. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00122-023-04446-3> (дата обращения: 18.01.2024). doi: 10.1007/s00122-023-04446-3.
13. Miedaner T., Wilde P., Wortmann H. Combining ability of non-adapted sources for male-fertility restoration in Pampa CMS of hybrid rye // *Plant Breeding*. 2008. Vol. 124 (1). P. 39–43. doi: 10.1111/j.1439-0523.2004.01038.x
14. Wartosciowe komponenty rodzicielskie dla hodowli mieszańców zryta / J. Kolasinska, J. Jagodzinski, W. Brukwinski, et al. // *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatizacji Roslin*. 2015. No. 278. P. 27–38. doi: 10.37317/biul-2015-0003.
15. Селекция инбредных линий озимой ржи на общую и специфическую комбинационную способность и ее связь с селекционными признаками / А. А. Гончаренко, С. А. Ермаков, А. В. Макаров и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2019. Т. 54. № 1. С. 88–92. doi: 10.15389/agrobiology.2019.1.
16. Изучение комбинационной способности инбредных линий озимой ржи по методу топкросса / А. А. Гончаренко, С. А. Ермаков, А. В. Макаров и др. // *Зерновое хозяйство России*. 2017. № 5. С. 5–12.
17. Лепешко Е. С., Костылева Л. М., Усатенко Т. В. Оценка комбинационной способности линий подсолнечника // *Зерновое хозяйство России*. 2020. № 4. С. 40–43. doi: 10.31367/2079-8725-2020-70-4-40-43.
18. Оценка комбинационной способности линий кукурузы в диаллельных скрещиваниях по высоте початка / В. И. Жужужин, С. А. Зайцев, Д. П. Волков и др. // *Успехи современного естествознания*. 2018. № 10. С. 50–55.
19. Оценка комбинационной способности белозерных линий кукурузы для создания белозерных гибридов в условиях предгорного района Ставропольского края / Ю. В. Сотченко, Л. А. Галговская, О. В. Теркина и др. // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2022. № 6 (110). С. 217–224. doi: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-217-224.
20. Кривошеев Г. Я., Игнатев А. С., Шевченко Н. А. Анализ комбинационной способности новых линий кукурузы различного происхождения в тестерных скрещиваниях // *Научный журнал Кубанского аграрного университета*. 2015. № 114. С. 1–11.
21. Вольф В. Г., Литун П. П. Методические рекомендации по применению математических методов для анализа экспериментальных данных по изучению комбинационной способности. Харьков: УНИИРСиГ им. В. Я. Юрьева, 1980. 75 с.
22. Laude T. P., Carena M. J. Diallel analysis among 16 maize populations adapted to the northern U. S. Corn Belt for grain yield and grain quality traits // *Euphytica*. 2014. Vol. 200 (1). P. 29–44.
23. Association between line per se and testcross performance for eight agronomic and quality traits in winter rye / T. Miedaner, D. D. Schwegler, P. Wilde, et al. // *Theoretical and Applied Genetics*. 2014. Vol. 127 (1). P. 33–41.

Поступила в редакцию 17.02.2024
После доработки 12.03.2024
Принята к публикации 02.04.2024

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОДУКТИВНОСТИ У РАЗЛИЧНЫХ МОРФОТИПОВ ГОРОХА ПОСЕВНОГО

Л. И. Лихачева, А. В. Москалев, Н. В. Лихачёва

Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр УрО РАН,
620142, Свердловская обл., Екатеринбург, ул. Белинского, 112а
E-mail: uralniishoz@mail.ru

Исследования проводили в 2021–2023 гг. с целью выявить закономерности формирования количественных показателей основных элементов продуктивности у гороха посевного различных морфотипов для повышения эффективности селекции. Эксперименты выполняли в зоне лесостепи на юго-западе Свердловской области на серых лесных почвах. Материалом для исследования служили по 24 сортообразца усатого и листочкового морфотипов, а также «хамелеоны», стандартами выступали Красноуфимский 11, Марафон и Спартак соответственно. В изучаемых группах сортов наибольшая продуктивность отмечена у усатых форм гороха, благодаря таким сортам, как Юбиляр (282,2 г/м²), Рыжик (277,2 г/м²), КМ 11 БК 22 (262,3 г/м²) и Томас (261,3 г/м²). Наибольшее число бобов на растении зафиксировано у листочковых форм (3,7...5,3 шт.) – Халик, Красноуфимский 70; у 54 % сортообразцов (13 шт.) величина этого показателя достигала 2,7...3,3 шт. По наибольшему количеству семян в бобе лидирующее положение занимали сортообразцы усатого морфотипа и «хамелеоны» (по 14 сортов – 3,4...4,3 шт.). У листочковых только 8 сортообразцов характеризовались максимальным количеством семян в бобе на уровне 3,6...3,9 шт. Среди усатых сортообразцов по величине этого показателя отмечали более равномерное распределение. Масса 1000 семян у изучаемых сортообразцов усатого морфотипа и «хамелеонов» (220...250 г) была ниже, чем у листочковых (250...300 г). Семена средней крупности (171...220 г) выявлены у 71 % усатых, 67 % листочковых и 33 % «хамелеонов». Наибольшая масса семян с одного растения листочкового морфотипа отмечена у Тюменского кормового (3,0 г). Продуктивность растения у 58 % сортообразцов «хамелеонов» (14 шт.) составляла 2,0...2,5 г. Для эффективной селекции необходимо в скрещиваниях использовать сорта различных морфотипов с лучшими биометрическими показателями и делать упор на отбор потомства на морфотип «усатого» гороха с лучшей технологичностью возделывания в регионе.

DISTRIBUTION OF PRODUCTIVITY ELEMENTS IN DIFFERENT MORPHOTYPES OF PEA PLANTS

L. I. Likhacheva, A. V. Moskaev, N. V. Likhacheva

Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
620142, Sverdlovskaya obl., Ekaterinburg, ul. Belinskogo 112 A
E-mail: uralniishoz@mail.ru

The research was carried out in 2021–2023 in order to identify patterns in the formation of quantitative indicators of the main elements of productivity in seeded peas of various morphotypes to increase the efficiency of breeding. The experiments were carried out in the forest-steppe zone in the south–west of the Sverdlovsk region on gray forest soils according to the predecessor – wheat in a ten-field crop rotation. The material for the study was 24 varieties of baleen, leafy morphotype and «chameleons». The standard in the group of whiskered was Krasnoufimskiy 11, leafy – Marafon, chameleons – Spartak. The repetition is threefold. As a result of studying the pea collection, it was found that the studied groups of varieties had the highest productivity in whiskered forms of peas, thanks to such varieties as Ybilyar (282.2 g/m²), Ryzhik (277.2 g/m²), KM 11 BK 22 (262.3 g/m²) and Tomas (261.3 g/m²). The largest number of beans on the plant were leafy forms of peas: Holik – 5.3 pcs.; Krasnoufimskiy 70 – 3.7 pcs.; 54 % of cultivars (13 pcs.) have the number of beans on the plant 2.7–3.3 pcs. According to the largest number of seeds in a bean, the leading position is occupied by cultivars of the whiskered morphotype and «chameleons» (14 varieties each – 3.4–4.3 pcs.). The leafy varieties have only 8 varieties with the maximum number of seeds in a bean (3.6–3.9 pcs.). There is a more uniform spread in this indicator among the whiskered cultivars. The weight of 1000 seeds in the studied cultivars of the whiskered morphotype and «chameleons» (220–250 g) was lower than in leafy varieties (250–300 g). Seeds of medium size (171–220 g) were found in 17 whiskered (71 %), 16 leafy (67 %) and 8 «chameleons» (33 %). The largest mass of seeds from one plant in the leafy morphotype is in the Tyumenskij kormovoj variety (3.0 g). In Chameleons, 58 % of cultivars (14 pcs.) have a plant productivity of 2.0 to 2.5 g. For effective breeding, it is necessary to use varieties of various morphotypes with the best biometric indicators in crosses and to focus on the selection of offspring for the morphotype of «mustachioed» peas with the best technological cultivation in the region.

Ключевые слова: горох посевной (*Pisum sativum*), морфотип, масса 1000 семян, продуктивность, масса семян, количество семян.

Key words: seed peas (*Pisum sativum*), morphotype, mass of 1000 seeds, productivity, seed mass, number of seeds.

Горох посевной как основную зернобобовую культуру широко возделывают в нашей стране в регионах с различными почвенно-климатическими условиями. Его продукция обладает набором важных качеств при использовании на продовольственные цели, а посевы культуры вносят вклад в азотный баланс наземных экосистем и агроценозов. В связи с этим площади, занимаемые горохом посевным в России, в 2023 г. достигли 1899,6 тыс. га (1,7 % от всех посевных площадей). За год они увеличились на 17,6 % (на 283,7 тыс. га), за десять лет – на 95,3 % (на 643,1 тыс. га) [1].

Изначально в селекции гороха преобладали листочковые геноитпы, но в современных условиях происходит переориентация на сорта таких морфотипов, как «усатые» (безлисточковые) с сильно развитыми усами, образующими при сцеплении крепкий стеблестой, что создает условия для решения проблем полеглости и осыпаемости (технологичности возделывания), и «хамелеоны», имеющие на стебле как усы, так и листочки [2, 3, 4]. Это носит разнообразие в источники генетического материала для селекции и требует сравнительного изучения этих морфотипов

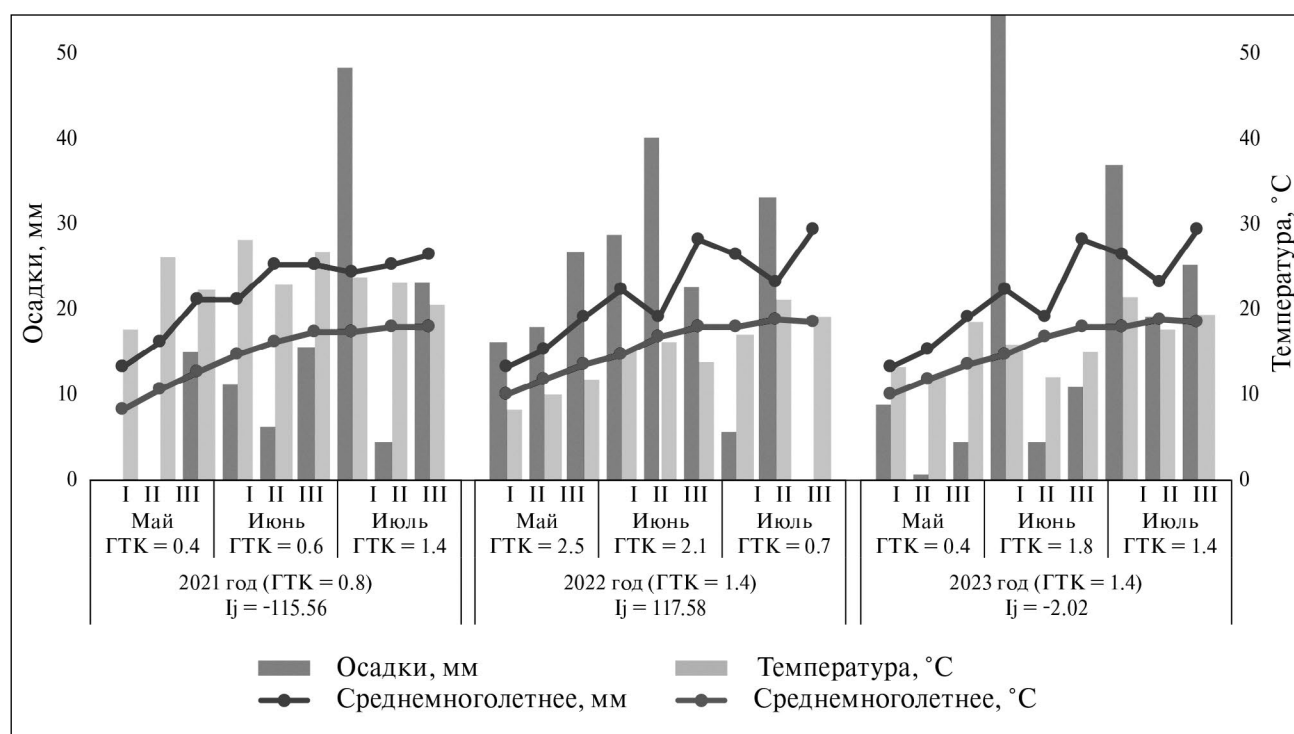


Рис. 1. Метеоданные за период вегетации гороха.

по продуктивности и её наиболее важным элементам. Поэтому для эффективного ведения и получения высоких результатов селекционной работы необходимо не только правильно подбирать исходный материал (чем он разнообразнее, тем быстрее можно достичь результата), но и иметь его подробную характеристику по продолжительности вегетационного периода, продуктивности, элементам структуры урожая, особенностям развития вегетативных и генеративных органов [5, 6]. На семенную продуктивность гороха влияют различные признаки, среди которых можно назвать число продуктивных узлов, число бобов и семян на растении, масса семян с растения. При этом их проявление зависит от морфотипа и условий года, что усложняет выявление ценных генотипов [3, 5].

Цель исследования – выявить закономерности в количественных показателях основных элементов продуктивности гороха посевного различного морфотипа для повышения эффективности селекции.

Методика. Работу проводили в 2021–2023 гг. в Красноуфимском селекционном центре Уральского федерального аграрного научно-исследовательского центра УрО РАН (юго-запад Свердловской области в зоне лесостепи). Посевы гороха размещали в десятипольном севообороте на делянках коллекционного питомника. Предшественник – пшеница. Почва – серая лесная со следующими агрохимическими показателями: рН_{KCl} (ГОСТ 26483-85) – 5,36 ед.; гидролитическая кислотность (ГОСТ 26212-2021) – 3,83 мг-экв./100г почвы, содержание гумуса (ГОСТ 26213-2021) – 4,4%, легкогидролизуемого азота (по Корнфилду) – 140,1 мг/кг почвы, подвижного калия и фосфора (ГОСТ 54650-2011) – 131,5 и 162,5 мг/кг почвы соответственно.

Посев проводили сеялкой ССФК-7, учетная площадь делянки 3 м², повторность – трехкратная, норма высева – 130 шт. всхожих семян на 1 м². Уборку осуществляли комбайном «Nege-125». Учет урожая выполняли путем взвешивания семян со всей делянки. Для снопового анализа отбирали по 25 растений с каждой делянки.

В качестве материала для исследований были выбраны по 24 сортообразца различных морфотипов – усатые, листочковые, «хамелеоны». Изучаемая выборка на 27,8% состояла из генотипов зарубежной селекции и 72,2% российской селекции, из них 9,7% сортов собственной селекции. Стандартом в группе усатых сортов

Табл. 1. Результаты биометрического анализа изучаемых сортообразцов коллекции гороха усатого морфотипа (среднее за 2021–2023 гг.)

Сортообразец	Общая высота, см	Число бобов на растении, шт.	Число семян в бобе, шт.	Число семян на растении, шт.	Масса семян с 1 растения, г	Масса 1000 семян, г	Продуктивность, г/м ²
Красноуфимский 11, st.	45,4	3,1	3,1	9,8	1,9	195,1	239,8
09-383	77,7	2,8	3,5	9,8	2,0	212,7	235,4
10-90	40,6	3,6	3,8	13,7	2,4	171,0	234,4
225ф/95	49,9	3,1	3,4	11,1	2,1	203,9	236,3
Agiane	48,9	3,1	3,8	11,6	2,4	214,5	235,9
Аксацкий усатый 55	50,8	2,8	4,1	11,6	2,1	195,3	237,4
Альянс	60,1	3,0	3,8	11,0	2,0	201,0	245,7
Багу	47,2	3,1	4,0	12,2	2,5	206,0	234,9
Батрак	57,7	2,8	3,7	10,3	2,3	231,7	236,7
Бельмондо	45,3	3,1	3,2	9,8	2,2	236,1	257,3
КМ 11 БК 22	39,6	2,5	3,8	9,3	2,1	234,6	262,3
Кумир	41,5	2,8	3,1	8,9	1,9	253,0	237,0
Лумп	44,5	2,9	3,8	11,0	2,2	207,3	237,7
Немчиновский 46	43,9	2,4	3,3	8,1	1,9	231,3	242,0
Омский 9	57,6	2,5	3,7	9,6	2,0	214,7	243,0
Оптимус	46,1	2,5	3,7	9,1	1,8	209,1	249,9
Остинато	38,1	2,7	3,9	10,3	2,1	205,0	246,3
Петра	45,9	2,4	3,6	8,5	1,8	213,1	234,4
Рыжик	39,9	2,6	3,3	8,6	2,0	228,3	277,2
Томас	44,5	2,8	3,4	9,6	2,0	231,9	261,3
Тренди	45,2	2,7	4,2	11,3	2,4	217,6	248,0
Триумф Сибири	39,6	2,8	3,5	9,7	1,7	192,3	236,6
Шрек	76,5	3,2	4,2	12,9	2,0	198,6	254,8
Юбиляр	56,6	3,3	4,2	13,9	2,5	174,5	282,2
НСР ₀₅	8,6	0,9	0,5	3,5	18,2	0,8	72,2

Табл. 2. Результаты биометрического анализа изучаемых сортообразцов коллекции гороха листочкового морфотипа (среднее за 2021–2023 гг.)

Сортообразец	Общая высота, см	Число бобов на растении, шт.	Число семян в бобе, шт.	Число семян на растении, шт.	Масса семян с 1 растения, г	Масса 1000 семян, г	Продуктивность, г/м ²
Марафон, st.	56,8	2,7	3,5	9,6	1,8	191,0	230,9
13-24	51,1	3,1	3,9	11,9	2,5	210,9	270,6
Alam	35,5	2,0	3,1	6,7	1,7	304,1	209,1
Erbi	34,3	2,9	3,2	9,3	1,9	210,7	212,7
Lasma	58,4	2,9	3,4	10,1	2,3	215,5	225,8
Mellort AC	33,6	2,8	3,8	10,6	2,1	194,0	211,9
Zaiga	56,1	3,2	3,4	11,1	2,1	198,3	250,0
Аванс	56,5	3,2	3,4	11,2	2,0	184,5	219,0
АМЗК-99	63,7	3,6	3,7	13,0	2,5	195,3	219,6
Благодатный	47,9	2,3	3,6	8,6	2,1	243,0	218,3
Венец	58,5	2,8	3,3	9,4	1,7	191,7	231,0
Веселик	36,4	3,0	3,0	9,3	2,2	232,7	209,9
Винэць-3	50,2	2,1	3,5	7,4	1,7	264,4	224,1
Красноградский 9	62,8	2,3	3,8	7,0	2,3	259,7	224,1
Красноуфимский 70	69,3	3,7	3,8	13,5	1,9	184,4	216,7
Надёжный Нарымский	59,2	2,3	3,4	7,8	2,0	252,9	215,8
14	61,3	2,9	3,5	10,0	2,0	203,9	248,8
Титан	63,5	3,2	3,6	11,9	2,2	194,7	262,6
Тюменский кормовой	69,8	3,5	3,9	13,9	3,0	233,1	236,8
Харьковский 85	57,1	3,5	3,8	13,5	2,5	188,3	227,6
Холик	64,0	5,3	2,6	13,1	2,1	191,3	246,6
Черноземец Чиниминский	58,1	3,0	3,3	9,8	2,0	209,3	216,9
229	63,0	3,4	3,2	10,9	2,4	238,7	238,3
Эдем	39,0	3,0	3,9	11,5	1,9	171,3	222,4
НСР ₀₅	10,8	0,9	0,7	3,8	26,4	0,8	69,9

выступал Красноуфимский 11, листочковых – Марафон, «хамелеонов» – Спартак.

Измерения проводили согласно методике изучения коллекции [7]. Математическую обработку данных осуществляли с использованием программы Excel и надстройки AgStat методом дисперсионного анализа по Б. А. Доспехову [8]. Индекс среды (I_j) определяли по S. A. Eberhart и W. A. Russell [9].

Погодные условия за период изучения коллекции гороха варьировали от засушливых (2021, 2023 гг.) до оптимальных (2022 г.). В 2021 г. отмечали критическую недостачу влаги, ГТК варьировал от 0,4 до 1,4 (рис. 1), что негативно отразилось на общей продуктивности гороха (I_j = -115,56). В 2022 г. начало вегетации характеризовалось избытком влаги и теплой погодой в период цветение–созревание, что вызвало увеличение продолжительности периода вегетации, но позволило растениям сформировать хороший урожай (I_j = +117,58). В 2023 г. в начале вегетации гороха наблюдали засуху, осадки выпали в период цветение–созревание и растения смогли сформировать урожай (I_j = -2,02).

Результаты и обсуждение. Продуктивность растений гороха складывается из нескольких показателей. К основным ее элементам относят массу 1000 семян, количество бобов на растении, количество семян в бобе и на растении. Немаловажное значение имеет такой сортовой и технологический показатель, как высота растения. Эти элементы могут значительно различаться в зависимости, как от сорта, так и от условий среды [10].

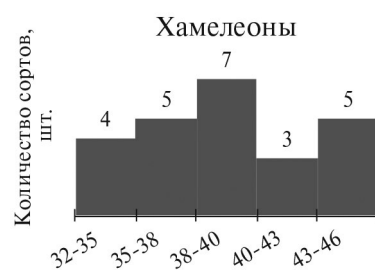
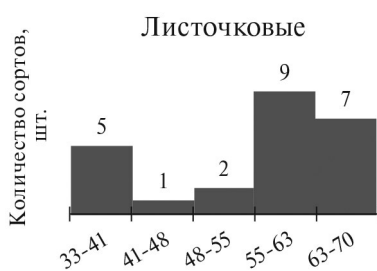
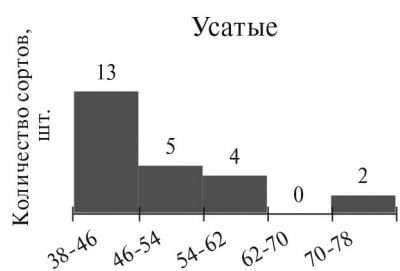
Высота растений «усатого» морфотипа в наших исследованиях (табл. 1) варьировала в пределах 38,1...77,7 см (V=31%), у наибольшего числа сортов (13 шт.) она составляла 38...46 см (рис. 2а). Самый

длинный стебель отмечен у сорта Шрек (76,5 см) и линии 09–383 (77,7 см). Высота растений гороха листочкового морфотипа варьировала от 33,6 см до 69,8 см (V=38%), больше всего было сортов (16 шт.) высотой 55,3...69,8 см (табл. 2). Максимальная в опыте высота растений этой группы отмечена у сортов Тюменский кормовой (69,8 см), Красноуфимский 70 (69,3 см) и Холик (64,0 см). Все «хамелеоны» (табл. 3) представлены сортообразцами с высотой растений в пределах 32,0...46,1 см (V=31%). Корреляционная зависимость между высотой и продуктивностью растения у «усатых» и «хамелеонов» была несущественной (r = 0,044 и 0,113 соответственно). У листочковых сортов наблюдали среднее влияние (r = 0,428) длины стебля на продуктивность растения (табл. 4). Согласно результатам дисперсионного анализа, доля влияния факторов среды на высоту растения гороха «усатого» морфотипа составляет 57,7%, листочкового – 65,4%, «хамелеонов» – 82,0% (табл. 5). Наибольшую зависимость высоты растения от сортовых особенностей гороха наблюдали у «усатых» (36,2%) и листочковых (27,9%) сортов, наименьшей она была у «хамелеонов» – 9,6%.

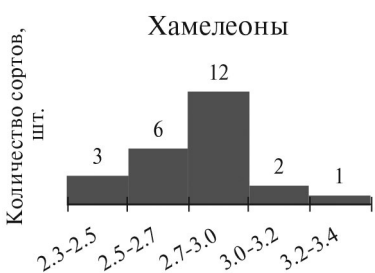
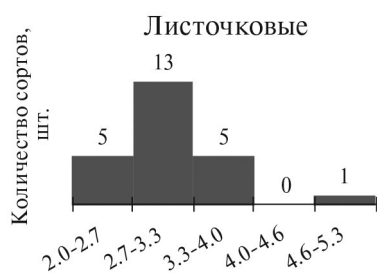
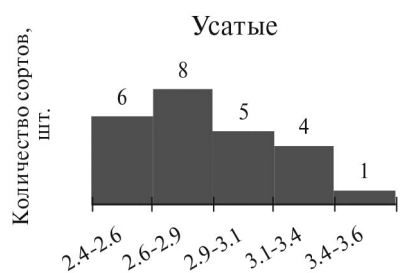
Число бобов на растении усатого морфотипа в нашем опыте варьировало от 2,4 шт. (Немчиновский 46, Петра) до 3,6 шт. (линия 10–90), при величине этого показателя у стандарта – 3,1 шт. У 8 сортообразцов (третья часть от количества исследуемых) число бобов на растении было ниже среднего (2,6...2,9 шт.) (см. рис. 2б). В группе листочковых сортообразцов величина этого показателя варьировала от 2,0 шт. (Alam) до 5,3 шт. (Холик), при числе бобов на растении у стандарта – 2,7 шт. У 13 сортообразцов (54%) оно было ниже среднего (2,7...3,3 шт.). В группе «хамелеонов» наименьшее число бобов на растении отмечено у сортообразца Меценат (2,3 шт.), наибольшее (3,4 шт.) – у стандарта Спартак. У 12 сортообразцов (50%) величина этого показателя была средней (2,7...3,0 шт.). Корреляция признака число бобов на растении с продуктивностью растения у «усатого» гороха составила r=0,572, у листочковых

Табл. 3. Результаты биометрического анализа изучаемых сортообразцов коллекции гороха морфотипа «хамелеон» (среднее за 2021–2023 гг.)

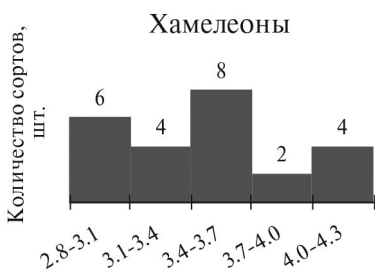
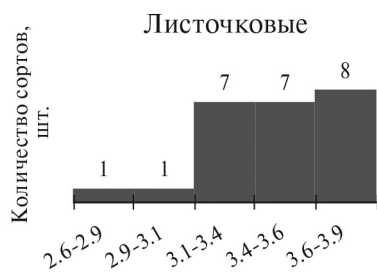
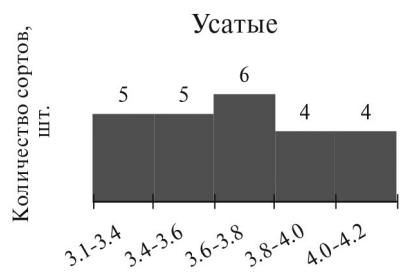
Сортообразец	Общая высота, см	Число бобов на растении, шт.	Число семян в бобе, шт.	Число семян на растении, шт.	Масса семян с 1 растения, г	Масса 1000 семян, г	Продуктивность, г/м ²
Спартак, st.	40,7	3,4	3,4	11,6	2,5	225,6	228,6
Аз-1061	36,6	2,8	3,0	8,5	1,9	233,6	219,2
Аз-129	39,1	2,9	3,2	9,3	1,8	205,3	174,4
Аз-130	35,6	2,8	3,2	8,9	1,9	228,3	179,3
Аз-131	40,4	2,9	3,1	9,0	1,9	201,7	209,7
Аз-136	39,3	3,1	3,8	11,7	2,5	232,0	243,9
Аз-1397	35,3	2,8	3,6	10,1	2,4	250,6	225,7
Аз-318	39,4	2,8	3,0	8,3	1,8	228,3	214,2
Аз-331	44,2	2,9	3,4	10,1	2,0	204,0	223,8
Аз-35	38,9	2,7	3,4	9,3	2,0	227,8	210,7
Аз-93-1347	43,5	3,2	4,1	12,9	1,8	176,0	212,1
Аз-93-1964	39,7	2,7	4,0	10,9	2,5	230,3	203,6
Аз-93-1995	46,1	2,4	4,3	10,2	2,1	226,7	240,4
Аз-95-464	36,4	2,9	3,1	8,9	2,0	237,1	193,8
Аз-95-614	44,1	2,4	4,1	9,7	1,8	197,7	197,8
Аз-95-645	41,1	3,0	3,4	10,0	1,9	200,3	145,4
Аз-96-610	40,5	2,6	4,0	10,6	2,1	209,7	221,8
Аз-96-637	32,0	2,5	2,8	7,1	1,7	231,0	179,4
Аз-96-718	43,5	2,8	3,1	9,0	2,2	244,0	172,7
Аз-97-775	35,3	2,6	3,7	9,7	2,2	240,3	212,8
Аз-99-4т	34,4	2,8	3,4	9,6	2,2	243,7	234,1
Камелот	40,3	3,0	3,5	10,5	1,8	236,0	221,9
Меценат	34,7	2,3	3,5	8,0	1,5	194,6	113,2
Орёл	33,4	2,6	3,2	8,2	1,9	246,2	204,8
НСР ₀₅	7,1	0,7	0,5	3,2	15,5	0,8	60,3



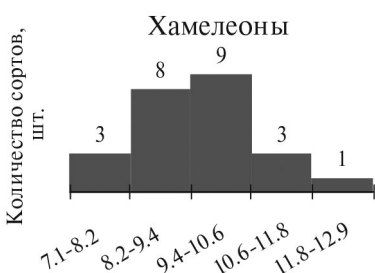
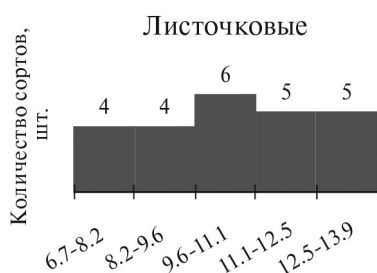
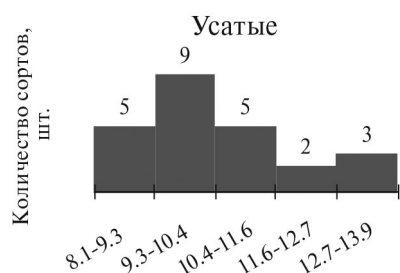
а) высота растений, см



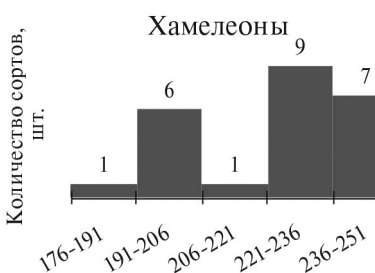
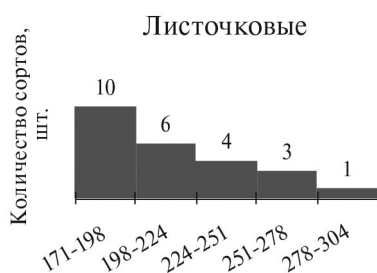
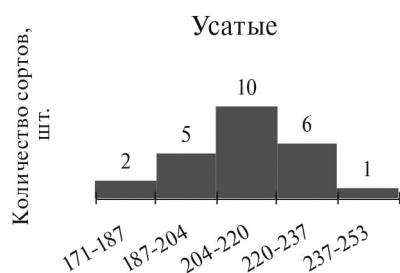
б) количество бобов на растении, шт.



в) количество семян в бобе, шт.



г) количество семян на растении, шт.



д) масса 1000 семян, г

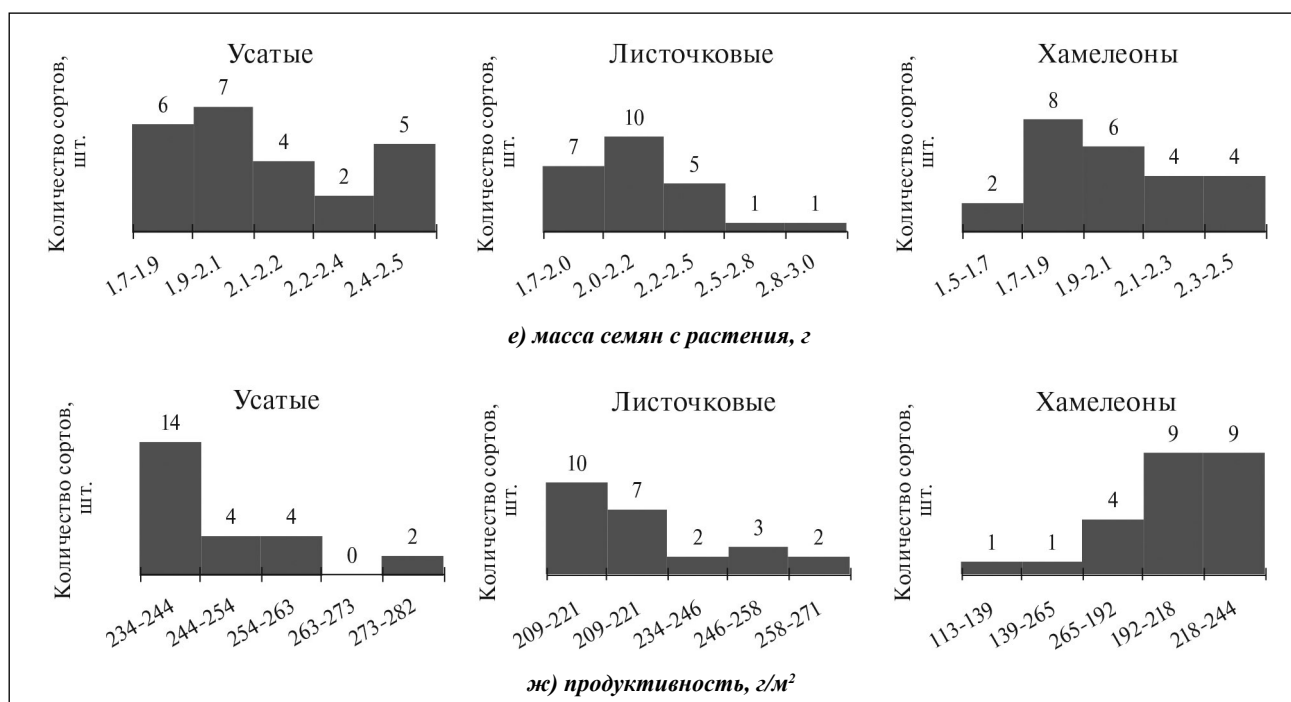


Рис. 2. Распределение количества сортов по степени проявления изучаемых признаков элементов продуктивности гороха от минимального к максимальному (с шагом 20 %).

форм и «хамелеонов» она была несущественной – соответственно $r=0,374$ и $r=0,381$ (см. табл. 4). На число бобов на растении большое воздействие оказывают факторы среды: у «усатых» сортов – 52,6%, листочковых – 52,5%, «хамелеонов» – 42,9%. На долю сортовых особенностей приходится соответственно 15,6%, 15,3% и 21,1% (см. табл. 5).

Число семян в бобе или выполненность, озерненность боба – наиболее стабильный признак, который мало изменяется по годам [3]. Самая низкая озерненность среди сортообразцов усатого морфотипа отмечена у стандарта Красноуфимский 11 и сорта Кумир (3,1 шт.), наибольшая (4,2 шт.) – у сортообразцов Тренди, Шрек, Юбилар; у 6 сортообразцов (25%) отмечено среднее количество семян в бобе (3,6...3,8 шт.) (см. рис. 2в). Среди образцов листочкового морфотипа самая низкая величина этого показателя (2,6 шт.) зафиксирована у сорта Холик, высокая (3,9 шт.) – у сортов Тюменский кормовой, Эдем и селекционной линии 13–24 (у стандарта – 3,5 шт.); 33% сортообразцов формировали небольшое число семян в бобе (3,6...3,9 шт.). У растений морфотипа «хамелеон» самой низкой была величина этого показателя у Аз-96–637 (2,8 шт.); максимальной в опыте – у сортообразца Аз-93–1995 (4,3 шт.), при числе семян в бобе у стандарта – 3,4 шт.; средняя величина этого показателя (3,4...3,7 шт.) отмечена у 8 сортообразцов. Корреляция рассматриваемого признака с продуктивностью растения у «усатого» гороха составила $r=0,534$, у листочковых и «хамелеонов» она была несущественной – соответственно $r=0,336$ и $r=0,302$ (см. табл. 4). Наибольшая степень влияния среды на число семян в бобе составила 26,2% у листочковых сортов, у «усатых» и «хамелеонов» его доля находилась на уровне 16,5 и 14,1% соответственно. У «хамелеонов» и «усатых» сортов число семян в бобе в большей степени зависит от сортовых особенностей (61,2 и 50,7% соответственно), у листочковых на их долю приходится 31,4% (см. табл. 5).

Наибольшим количеством семян в бобе среди «усатых» сортов (по 4,2 шт.) характеризовались Юбилар (СамНЦ РАН), Шрек (ТюмНЦ СО РАН), Тренди (Чехия); листочковых (по 3,9 шт.) – 13–24 (Уральский НИИСХ), Тюменский кормовой (ТюмНЦ СО РАН), Эдем (Уральский НИИСХ); «хамелеонов» (4,3 шт.) – Аз-93–1995 (ФНЦ ЗБК).

Наименьшее количество семян с растения в наших исследованиях в группе сортов усатого морфотипа их (8,1 шт.) формировал Немчиновский 46, самое большое (13,9 шт.) – Томас, при величине этого показателя у стандарта – 9,8 шт.; у 38% сортообразцов она была ниже среднего (9,3...10,4 шт.) (см. рис. 2г). Среди сортообразцов листочкового морфотипа количество семян с растения варьировало от 6,7 шт. у сорта Alam до 13,9 шт.

Табл. 4. Корреляционные связи между биометрическими показателями морфотипов и продуктивностью одного растения

Статистический критерий	Высота растений	Число бобов на растении	Число семян в бобе	Число семян на растении	Масса 1000 семян
Усатый морфотип					
Коэффициент корреляции (r)	0,044	0,572	0,534	0,758	-0,270
Ошибка r	0,213	0,175	0,180	0,139	0,205
t _{факт.}	0,205	3,269	2,960	5,456	-1,314
t _{табл.}	2,100	2,100	2,100	2,100	2,100
Листочковый морфотип					
Коэффициент корреляции (r)	0,428	0,374	0,336	0,568	-0,025
Ошибка r	0,193	0,198	0,201	0,175	0,213
t _{факт.}	2,222	1,893	1,675	3,237	-0,117
t _{табл.}	2,100	2,100	2,100	2,100	2,100
Морфотип «хамелеон»					
Коэффициент корреляции (r)	0,113	0,381	0,302	0,545	0,494
Ошибка r	0,212	0,197	0,203	0,179	0,185
t _{факт.}	0,534	1,933	1,488	3,046	2,664
t _{табл.}	2,100	2,100	2,100	2,100	2,100

Табл. 5. Влияние факторов генотипа и среды на основные элементы продуктивности (2021–2023 гг.), %

Фактор	Высота растений	Число бобов на растении	Число семян в бобе	Число семян на растении	Масса 1000 семян	Масса семян на растении	Продуктивность
Усатый морфотип							
Среда, %	57,8*	52,6	16,4*	46,5	29,4*	60,3	86,6
Сорт, %	36,2*	15,6	50,7*	24,1	57,9*	10,5	1,6
Взаимодействие генотип×сорт, %	6,0	31,8	32,9	29,4	12,7	29,2	11,9
F _{факт.}	12,0	1,0	3,1	1,6	9,1	0,7	0,3
F _{табл.05}	1,8	1,9	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9
Точность опыта	6,2	10,8	5,2	11,7	3,1	13,2	10,4
Листочковый морфотип							
Среда, %	65,4*	52,5*	26,2	52,1*	16,1*	66,0	87,6
Сорт, %	27,9*	32,2*	31,4	26,1*	71,7*	13,4	2,3
Взаимодействие генотип×сорт, %	6,7	15,3	42,4	21,8	12,2	20,6	10,1
F _{факт.}	8,3	4,2	1,5	2,4	11,7	1,3	0,5
F _{табл.05}	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9
Точность опыта	7,1	10,6	7,4	13,0	4,4	12,6	10,9
Морфотип «хамелеон»							
Среда, %	82,0*	42,9	14,1*	27,9	54,4*	44,8	81,8*
Сорт, %	9,6*	21,1	61,2*	29,3	39,3*	18,2	9,2*
Взаимодействие генотип×сорт, %	8,4	36,0	24,7	42,8	6,3	37,0	9,0
F _{факт.}	2,3	1,2	5,0	1,4	12,5	1,0	2,0
F _{табл.05}	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,8
Точность опыта	6,4	8,4	5,3	11,6	2,5	13,8	10,5

* – влияние достоверно.

у Тюменского кормового при величине этого показателя у стандарта – 9,6 шт.; у 6 сортов образцов отмечали среднее число семян с растения (9,6...11,1 шт.). У «хамелеонов» наименьшая величина этого показателя (7,1 шт.) зафиксирована у сортаобразца Аз-96–637, самая высокая (12,9 шт.) – у Аз-93–1347 (у стандарта – 11,6 шт.). Среднее количество семян с растения (9,4...10,6 шт.) отмечено у 9 сортов образцов (38%). Корреляция между этим признаком и продуктивностью у растений усатого морфотипа составляла $r=0,758$, листочкового – $0,568$, «хамелеон» – $0,545$ соответственно (см. табл. 4). Показатель «число семян на растении» у листочковых и «усатых» сортов зависел от факторов среды соответственно на 52,1% и 46,4%, у «хамелеонов» – на 27,9%. На долю влияния особенностей сорта у растений всех морфотипов приходилось 24,1...29,3% (см. табл. 5).

Самая низкая масса 1000 семян у гороха усатого морфотипа отмечена у сортаобразца 10–90 (171,0 г), высокая (253,0 г) – у сорта Кумир, при величине этого показателя у стандарта – 195,1 г; 10 сортов образцов (42%) формировали среднюю массу 1000 семян (204...220 г) (см. рис. 2д). У растений листочкового морфотипа она варьировала от 171,3 г у сорта Эдем до 304,1 г у сорта Alam (у стандарта – 191,0 г); 10 сортов образцов характеризовались низкой крупностью (171...198 г). У гороха морфотипа «хамелеон» наибольшая масса 1000 семян достигала 250,6 г у Аз1397, что больше стандарта на 25 г; у 9 сортов образцов она была выше средней (221...236 г). Корреляция этого признака с продуктивностью растений усатого морфотипа составила $r=-0,270$, листочкового – $r=-0,025$, «хамелеон» – $r=0,494$ (см. табл. 4). От условий года масса

1000 семян зависела у «хамелеонов» на 54,4%, у «усатых» и листочковых – на 29,3% и 16,1% соответственно. У растений листочкового морфотипа крупнозерность была во многом обусловлена сортовыми особенностями (71,7%), у «усатых» и «хамелеонов» на их влияние приходилось 58,0% и 39,3% соответственно (см. табл. 5).

Самую высокую массу семян с одного растения усатого морфотипа (2,5 г) отмечали у сортов Юбилар и Багу, при величине этого показателя у стандарта 1,9 г; у 54% она была минимальной и ниже средней (1,7...2,1 г) (см. рис. 2е). У листочкового морфотипа наименьшая масса семян с растения (1,7 г) зафиксирована у сорта Винець-3, наибольшая (3,0 г) – у сорта Тюменский кормовой, при величине этого показателя у стандарта – 1,8 г; у 10 сортов образцов масса семян с растения была ниже средней (2,0...2,2 г). У гороха морфотипа «хамелеон» лучшими оказались сортаобразцы Аз-136, Аз-93–1964, Спартак (2,5 г); у 58% сортов образцов величина этого показателя на уровне среднего и ниже среднего (1,7...2,1 г). Корреляция массы семян с растения с урожайностью с 1 м² составила $r=0,079$, $0,405$, $0,302$ соответственно (см. табл. 4). Наибольшую зависимость величины этого показателя от условий среды наблюдали у гороха листочкового и «усатого» морфотипов (66,0 и 60,3% соответственно), у «хамелеонов» она составляла 44,7% (см. табл. 5). Влияние сортовых особенностей на этот признак было невысоким у всех морфотипов (10,5...18,2%).

Анализ результатов исследований свидетельствует, что 7 сортов образцов коллекции усатого морфотипа достоверно превосходили стандарт Красноуфимский 11 по продуктивности на 8,2...42,4 г/м². Наибольшую величину этого показателя (282,2 г/м²) отмечали у сорта Юбилар (см. табл. 1). Средняя урожайность сортов гороха «усатого» морфотипа составила 246,3 г/м² (234,4...282,2 г/м², V=42%), преобладали сортаобразцы с величиной этого показателя ниже среднего (234,4...253,6 г/м²) (см. рис. 2ж). В группе листочковых форм достоверное превосходство над стандартом Марафон по продуктивности отмечено у 6 сортов образцов (238,3...270,6 г/м²), наибольшей она была у селекционного номера 13–24 (см. табл. 2). Средняя урожайность сортов образцов гороха листочкового морфотипа составила 228,7 г/м² (209,1...270,6 г/м², V=47%), преобладали генотипы с величинами этого показателя ниже среднего (17 шт.). У «хамелеонов» достоверно превысили стандарт Спартак по продуктивности только два сортаобразца: Аз393–1995 – на 11,8 г/м² и Аз136 – на 15,3 г/м² (см. табл. 3). У сортов образцов морфотипа «хамелеон» средняя урожайность составила 203,5 г/м² (113,2...243,9 г/м², V=48%). Наибольшее число сортов образцов обеспечили урожайность выше средней.

Основное влияние на урожайность сортов всех морфотипов оказали факторы среды (81,8...87,6%), доля сортовых особенностей была незначительной (1,65...9,17%). В целом сорта «усатого» морфотипа характеризовались в среднем большей урожайностью (246,1 г/м²) и большим потенциалом продуктивности (282,2 г/м²), чем остальные. Наименьшая средняя продуктивность отмечена у сортов в группе «хамелеоны». Наиболее продуктивными среди «усатых» были сорта Юбилар (282,2 г/м²) и Рыжик (277,2 г/м²), листочковых – 13–24 (270,6 г/м²) и Титан (262,6 г/м²), «хамелеонов» – Аз-136 (243,9 г/м²) и Аз-93–1995 (240,4 г/м²).

Выводы. Самой высокой продуктивностью в изученных группах, благодаря таким сортам, как Юбилар (282,2 г/м²), Рыжик (277,2 г/м²), КМ 11 БК 22 (262,3 г/м²) и Томас (261,3 г/м²), характеризовались усатые формы гороха. Наибольшее число бобов на растении имели

листочковые формы гороха: Холик – 5,3 шт.; Красноуфимский 70–3,7 шт.

По количеству семян в бобе лидирующее положение занимали генотипы усатого морфотипа и «хамелеоны» (по 14 сортов – 3,4...4,3 шт.). У 8 сортообразцов листочковых форм отмечали наибольшее количество семян в бобе (3,6...3,9 шт.). Масса 1000 семян у изучаемых сортообразцов усатого морфотипа и «хамелеонов» (220...250 г) была ниже, чем у листочковых сортов (250...300 г). Семена средней крупности (171...220 г) выявлены у 17 усатых (71%), 16 листочковых (67%) и 8 «хамелеонов» (33%).

Для эффективной селекции необходимо использовать сорта различных морфотипов с лучшими биометрическими показателями и делать упор на отбор потомства на морфотип «усатого» гороха, имеющего лучшую технологичность для возделывания условиях Среднего Урала.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Исследования проводили в рамках научно-исследовательской работы «Фундаментальные основы управления селекционным процессом создания новых генотипов растений с высокими хозяйственно-ценными признаками продуктивности, устойчивости к био- и абиострессорам (150)» по теме «Создать новый селекционный материал гороха, сочетающий высокую потенциальную продуктивность, устойчивость к основным болезням и технологичность при уборке» (№ 0772–2014–0011). 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. Сайт Федеральной службы государственной статистики: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277> (дата обращения: 02.10.23).
2. Катюк А. И. Формирование семенной продуктивности у коллекции гороха разных морфотипов в условиях Среднего Поволжья // *Зерновое хозяйство России*. 2020. № 5(71). С. 32–38. DOI 10.31367/2079-8725-2020-71-5-32-38.
3. Лихачева Л. И., Москалев А. В. Взаимосвязь элементов продуктивности у гороха с усатым и листочковым морфотипом // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 6. С. 15–19. doi: 10.24411/0235-2451-2021-10603.
4. Соболева Г. В., Соболев А. Н. Скрининг различных морфотипов гороха по устойчивости к осмотическому стрессу в селективных системах *in vitro* // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2019. № 3(31). С. 22–27. doi: 10.24411/2309-348X-2019-11109.
5. Изучение генетического потенциала сортообразцов гороха разных морфотипов в условиях Ростовской области / А. Р. Ашиев, К. Н. Хабибуллин, П. И. Костылев и др. // *Зерновое хозяйство России*. 2018. № 1(55). С. 47–52.
6. Катюк А. И. Формирование семенной продуктивности у коллекции гороха разных морфотипов в условиях Среднего Поволжья // *Зерновое хозяйство России*. 2020. № 5(71). С. 32–38. doi: 10.31367/2079-8725-2020-71-5-32-38.
7. Коллекция мировых генетических ресурсов зерновых бобовых ВИР: пополнение, сохранение и изучение: методические указания / М. А. Вишнякова, И. В. Сеферова, Т. В. Буравцева, и др.; под науч. ред. М. А. Вишняковой – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: ВИР, 2018. – 143 с.
8. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. Изд. 6-е, доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. С. 35.
9. Пакудин В. З., Лопатина Л. М. Оценка экологической пластичности и стабильности сортов сельскохозяйственных культур // *Сельскохозяйственная биология*. 1984. № 4. С. 109–113.
10. Кожухова Е. В., Орешникова О. П., Новиков В. В. Анализ элементов продуктивности коллекционных образцов гороха // *Земледелие*. 2021. № 7. С. 44–48. doi: 10.24412/0044-3913-2021-7-44-48.

Поступила в редакцию 12.12.2023

После доработки 12.01.2024

Принята к публикации 12.03.2024

ФОРМИРОВАНИЕ БИОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗЕРНА ОВСА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕНОТИПА И ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ

А. В. Любимова, кандидат биологических наук, Д. И. Еремин, доктор биологических наук

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья –
филиал Федерального исследовательского центра Тюменский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук,
625501, Тюменская обл., пос. Московский, ул. Бурлаки, 2
E-mail: ostapenkoav88@yandex.ru

Исследования проводили с целью оценки зависимости биохимических показателей зерна овса (сырой протеин, крахмал, масло и β -глюканы) от генотипа и погодных условий, а также выявления перспективных образцов для использования в селекционном процессе. В лесостепи Зауралья в 2021–2023 гг. оценивали 21 образец голозерного и 64 образца плёчатого овса, которые наиболее активно используют в селекции Западной Сибири. В качестве стандарта для голозерных сортов выбран Тюменский голозерный, для плёчатых – Отрада. На накопление сырого протеина и β -глюканов в зерне овса наибольшее влияние оказывал генотип (78...80 %); меньшее – погодные условия – 12...15 %, при минимальном взаимодействии этих факторов – 4...7 % ($F_{\text{факт.}} > F_{\text{теор.}}$). Содержание масла и крахмала на 85...86 % определяли сортовые особенности, на условия года приходилось – 3...6 % при ($F_{\text{факт.}} > F_{\text{теор.}}$). Влияние взаимодействия генотипа и погодных условий на содержание масла достигало 11 %. Установлена тесная положительная корреляция между содержанием протеина и масла в голозерном овсе ($r=0,96$; $p=0,05$), в плёчатых образцах она была средней ($r=0,25$; $p=0,05$). Содержание β -глюканов имело обратную среднюю корреляцию с протеином в зерне плёчатых генотипов ($r=-0,38$), у голозерных она отсутствовала. Между содержанием β -глюканов и масла наблюдали отрицательную корреляцию ($r=-0,32$; $p=0,05$) в плёчатых образцах. Для введения в селекционный процесс с целью повышения содержания крахмала (60,1...62,3 %) можно рекомендовать сорта Вятский (14960), MF 9521–281 (15096), MF9714–32 (15227), Прогресс (15339), Королёк (15461); β -глюканов (6,1...6,3 %) – Ровесник (14365), Аргамак (14648), Неклан (14936), Конкур (15068); Озон (15473); протеина (16,1...17,5 %) – Ровесник (14365), Першерон (15275), Помор (15117), Тайдон (15183); масла (6,1...7,4 %) – Сапсан (15444), Пегас (15114), Петрович (15691).

FORMATION OF BIOCHEMICAL PARAMETERS OF OAT GRAIN DEPENDING ON THE GENOTYPE AND WEATHER CONDITIONS

A. V. Lyubimova, D. I. Eremin

Research Agricultural Institute of the Northern Trans-Urals,
branch of the Federal Research Center of Tyumen Scientific Center,
Siberian branch, Russian Academy of Sciences,
625501, Tyumenskaya obl., pos. Moskovskii, ul. Burlaki, 2
E-mail: ostapenkoav88@yandex.ru

The studies were conducted to assess the dependence of the biochemical parameters of oat grains (crude protein, starch, oil and β -glucans) on the genotype and weather conditions to determine the prospects for their use in the breeding process. In the forest-steppe of the Trans-Urals in 2021–2023, 21 samples of naked and 64 samples of covered oats were studied, which are most actively used in breeding in Western Siberia. Tyumen nudibranch was taken as the standard for naked cultivars, and for covered cultivars it was Otrada. It was found that the genotype played a significant role in the content of crude protein and β -glucans in oat grain (78...80 %); weather conditions – 12...15 %, with minimal interaction of these factors – 4 and 7 % ($F_{\text{fact.}} > F_{\text{theor.}}$) respectively. Retention of oil and seaweed at 85...86 % exceeds the permissible values, and now to a minimum extent – 3 and 6 %, respectively ($F_{\text{fact.}} > F_{\text{theor.}}$). The effect of the genotype and the subsequent level on the oil content is 11 %. A close relationship between content and consumption has been established. Protein and oil in naked oats ($r=0.96$; $p=5\%$), in frequent cases it was the average ($r=0.25$; $p=5\%$). The content of β -glucans had an inverse average correlation with protein in the grain of filmy genotypes ($P=-0.38$), it was absent in nudibranchs. A negative correlation was established between the content of β -glucans and oil ($r=-0.32$; $p=5\%$) in covered samples. The analysis of variance and correlation showed the possibility of targeted selection in terms of protein and oil content. It is recommended to introduce the following genotypes into the breeding process to increase the content: starch (60.1...62.3 %) – Vyatsky (14960), MF 9521–281 (15096), MF9714–32 (15227), Progress (15339), Korolek (15461); β -glucans (6.1...6.3 %) – Rovesnik (14365), Argamak (14648), Neklan (14936), Konkur (15068); Ozone (15473); protein (16.1...17.5 %) – Rovesnik (14365), Percheron (15275), Pomor (15117), Taidon (15183); oils (6.1...7.4 %) – Sapsan (15444), Pegasus (15114), Petrovich (15691).

Ключевые слова: направленная селекция, протеин, крахмал, β -глюканы, масло, голозерный и плёчатый овёс, генотип.

Key words: directed selection, protein, starch, β -glucans, oil, naked and covered oats, genotype.

Создание новых сортов овса для пищевого или кормового использования в России традиционно не имеет каких-то принципиальных отличий. Многие годы овёс считали зернофуражной культурой, поэтому, главным образом, все внимание селекционеров было сосредоточено на продуктивности сорта и питательности его продукции [1]. Только в последние годы начал возрас-

тать интерес к овсу как к продовольственной культуре. Однако, как показала практика, зернофуражные сорта не подходят для перерабатывающей промышленности, в частности крупяной, по комплексу биохимических показателей. При этом часть необходимых показателей все-таки соответствует требованиям, предъявляемым к зерну пищевого направления, например, крупность,

низкая плёнчатость, содержание сырого протеина. Однако по таким показателям, как содержание и состав углеводов, жирно-кислотный состав, соотношение аминокислот и антиоксидантов, витаминов и микроэлементов, информации крайне мало или она вообще отсутствует. Еще меньше сведений о характере наследования биохимических показателей при селекции овса. Поэтому возникает необходимость изучения генетических коллекций и выявления характера передачи таких свойств новым сортам. Необходимо признать, что современная селекция зерновых культур, в том числе овса, должна учитывать принципы функционального питания и четко разделяться на сорта продовольственного и кормового направления [2, 3].

Помимо общепринятых биохимических показателей, к которым относится содержание протеина, крахмала и масла, в продукции овса достаточно много ценных веществ, которые учитывают при селекции зерновых культур для функционального питания. К числу таких веществ принадлежат β-глюканы, которые входят в группу сложных полисахаридов [4]. Они оказывают влияние на функционирование организма человека, предотвращая нарушение обмена веществ [5]. Результаты последних зоотехнических и ветеринарных исследований показали актуальность регулярного поступления β-глюканов в организмы сельскохозяйственных животных и птицы [6]. По этой причине ведущие селекционеры зернофуражных культур стали уделять повышенное внимание содержанию этих полисахаридов при создании современных сортов. Анализ современных литературных источников показал, что поиск путей решения этой проблемы уже ведется. Появились исследования по определению содержания β-глюканов, аминокислотного и жирно-кислотного состава [7]. Установлено, что помимо влияния генотипа, на качественные показатели зерна существенное воздействие оказывают почвенно-климатические условия и агротехника [8]. Поэтому крайне важен анализ коллекций овса в региональных селекционных центрах и введение выделившихся сортов в селекционный процесс.

Цель исследования – определение зависимости биохимических показателей зерна овса (сырой протеин, крахмал, масло и β-глюканы) от генотипа и погодных условий, а также выявление перспективных образцов для использования в селекционном процессе.

Методика. Работу проводили в 2021–2023 гг. на опытном поле Научно-исследовательского института сельского хозяйства Северного Зауралья, которое расположено в северной лесостепи Тюменской области, вблизи пос. Московский Тюменского района. Почва опытного участка – темно-серая лесная оподзоленная (по классификации WRB от 2022 г. – Luvic Retic Greyzemic Phaeozems) [9]. Она характеризовалась тяжелосушливистым, иловато-пылеватым гранулометрическим составом и следующей агрохимической характеристикой: обеспеченность нитратным азотом (ГОСТ Р 53219–2008) – очень низкая (до 5,0 мг/кг); подвижными формами фосфора и калия (ГОСТ 26204–91) – соответственно средняя (51...100 мг/кг) и повышенная (81...120 мг/кг). Содержание органического углерода (ГОСТ 23740–2016) – 4,35%, что соответствовало 7,5% гумуса. Соотношение углерода к азоту 10...12 ед.

Для изучения биохимического состава зерна отобрали 85 генотипов, которые были разделены по типу зерна (плёнчатые – 64 шт.; голозерные – 21 шт.), а также по стране происхождения (табл. 1). В качестве стандарта для группы голозерных образцов выбран местный сорт Тюменский голозерный (к-14784 – номер каталога,

Табл. 1. Перечень сортов плёнчатого и голозерного овса в изучаемой коллекции

Тип зерна	Страна происхождения, № сорта по каталогу ВИР*
Голозерные	Россия – 14784, 14960, 15063, 15067, 15117, 15183, 15275, 15339, 15439, 15553, 15757; США – 7774, 14440, 15090, 15096, 15227; Австралия – 14851; Белоруссия – 15461; Германия – 14809; Канада – 2299; Чехия – 14935.
Плёнчатые	Россия – 11717, 13780, 13924, 14029, 14033, 14043, 14231, 14365, 14373, 14422, 14505, 14506, 14570, 14648, 14778, 14779, 14780, 14783, 14785, 14788, 14857, 14859, 15008, 15013, 15065, 15068, 15113, 15114, 15176, 15181, 15187, 15213, 15277, 15239, 15335, 15340, 15451, 15380, 15443, 15444, 15494, 15497, 15498, 15617, 15691, 15695, 15760, 15818; Чехия – 14292, 14400, 14931, 14932, 14936; Австралия – 15413; Белоруссия – 15462; Бразилия – 15033; Германия – 11840, 15473; Греция – 14836; Канада – 14915; США – 14732, 14801; Швеция – 11907; Япония – 14877.

*названия сортов отмечены в каталоге ВИР [10].

присвоенный ФИЦ Всероссийским институтом генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова), включенный в Госреестр и используемый в ГСИ и производстве. Остальные (64 шт.) были представлены плёнчатыми образцами, в том числе 48 из России с максимально возможным охватом территории нашей страны, 5 из Чехии, 2 из США, 2 из Германии. При оценке плёнчатых генотипов в качестве стандарта использовали сорт Отрада (к-15380) тюменской селекции, который также включен в Госреестр.

Метеоусловия 2021 и 2023 гг. характеризовались аномально жаркой и сухой погодой. В период кущения и цветения запасы продуктивной влаги в метровом слое составляли 80...100 мм при среднемноголетних значениях 186 мм. Отмечали почвенную и атмосферную засухи.

Табл. 2. Погодные условия в межфазные периоды развития овса

Критерий	Посев-всходы	Всходы-кущение	Кущение-выход в трубку	Выход в трубку-выметывание	Выметывание-молочная спелость	Молочная спелость-полная спелость
Среднемноголетнее						
Температура воздуха, °C	12	16	18	19	17	15
Сумма осадков, мм	15	31	45	64	37	17
ГТК	1,13	1,11	1,09	1,58	1,24	1,64
2021 г.						
Температура воздуха, °C	20	20	21	26	21	20
Сумма осадков, мм	1	14	33	26	13	7
ГТК	0,06	0,09	0,7	0,84	0,3	0,56
2022 г.						
Температура воздуха, °C	13	16	16	21	18	19
Сумма осадков, мм	20	43	25	56	54	2
ГТК	5,21	1,23	1,76	1,78	1,22	0,76
2023 г.						
Температура воздуха, °C	15	22	14	24	12	12
Сумма осадков, мм	2	3	56	0	16	6
ГТК	0,07	0,13	4,1	0	1,27	0,5

В период прорастания овса сумма осадков не превышала 2 мм, а гидротермический коэффициент составил 0,06...0,07 ед. при среднемноголетнем значении 1,13. В 2021 г. на протяжении вегетации овса ГТК Селянинова не поднимался выше 0,84 ед., что соответствовало засушливой погоде. В 2023 г. обильные осадки выпали в периоды кушение–выход в трубку (56 мм) и выметывание–молочная спелость (16 мм), гидротермический коэффициент составил соответственно 4,10 и 1,27 ед. Это предотвратило гибель посевов от засухи. В 2022 г. метеоусловия вегетационного периода были оптимальны для развития зерновых культур. В период от посева до кушения выпало 63 мм осадков, при норме 46 мм, что обеспечило дружные всходы и пополнило запасы продуктивной влаги в почве. Во время созревания овса установилась жаркая и сухая погода – среднесуточная температура составляла 19 °С, сумма осадков – 2 мм, что положительно повлияло на дозревание зерна и уборочные работы. Год характеризовался как теплый и умеренно влажный.

Каждый образец высевали вручную на глубину 6...7 см на 1 м² (5 рядков с междурядьем 20 см). Между образцами оставляли расстояние 30 см. В течение вегетации проводили полевые наблюдения согласно действующим методикам [11, 12]. Уборку урожая осуществляли вручную с обмолотом снопа со всей делянки. Содержание в зерне сырого протеина определяли методом мокрого озольения с последующим фотометрированием по реактиву Неслера (ГОСТ 13496.4-2019); крахмала – по ГОСТ 10845-98; масла (жира) – по ГОСТ 29033-91, β-глюканов – гравиметрическим методом, предложенным В. С. Поповым [13]. Вклад факторов в проявление признаков оценивали методом дисперсионного анализа в Microsoft Excel. Для оценки достоверности результатов исследований использовали критерий Фишера при 5%-ном уровне значимости. Каждый изучаемый показатель подвергали ранжированию с последующей квартильной группировкой для выявления групп с максимальным, средним и минимальным проявлением признака [14].

Результаты и обсуждение. Между содержанием протеина и масла в зерне голозерного овса существует очень тесная положительная корреляция ($r=0,96$; $p=0,05$). У плёнчатых сортов для этой пары признаков была характерна средняя (по шкале Чеддока) положительная связь ($r=0,25$; $p=0,05$). Аналогичную закономерность наблюдали и другие исследователи [15, 16, 17].

В зерне плёнчатых сортов отмечена средняя отрицательная корреляция между содержанием β-глюканов и протеина ($r=-0,38$; $p=0,05$), тогда как у голозерных генотипов какая-либо связь отсутствовала. Возможно, это объясняется незначительной выборкой голозерных сортов, взятых для исследований. Их количество было в 3 раза меньше, чем плёнчатых. Анализ научных публикаций по этой теме не дал однозначных ответов [18, 19, 20]. У голозерных сортов отмеченная зависимость сохраняла направленность, но сопряженность была менее выражена.

Кроме того, у плёнчатых сортов установлена отрицательная корреляция между содержанием β-глюканов и масла в зерне ($r=-0,32$; $p=0,05$), у голозерных такая связь отсутствовала.

Содержание сырого протеина в зерне голозерных сортов овса было значительно больше, чем у плёнчатых, в среднем по группе разница составляла 3,5%. В среднем за три года содержание протеина в продукции голозерных сортов варьировало от 13,2±1,5 (Гаврош, 15439) до 17,7±1,2% (Тюменский голозерный, 14784). У трех

сортообразцов этой группы из разных стран – Гаврош (15439, Россия), Jzau (14935, Чехия) и Large hullless × Red rustproof (7774, США) – содержание протеина составляло от 12,1 до 14,0%. К высокобелковым (>16%) относились сорта Голец (15067), Королек (15461), Першерон (15275), Помор (15117), Прогресс (15339), Самсон 57 (15757), Сибирский голозерный (15063), Тайдон (15183) и Тюменский голозерный (14784). Высокое содержание сырого протеина в их продукции отмечали и другие исследователи [21].

Среди 64 плёнчатых генотипов выявлены 3 сорта, содержание протеина в зерне которых превышало 16%: Ровесник (14365, Россия) – 16,1±0,1%; Palini (14836, Греция) – 16,2±0,6% и Bortus (11840, Германия) – 17,1±0,4%. Необходимо отметить, что минимальная в опыте вариабельность содержания протеина по годам отмечена только у отечественного сорта Ровесник – $CV=3\%$, у иностранных Palini и Bortus она достигала 12 и 9% соответственно. В группе с содержанием сырого протеина от 14,1 до 16,0% также было 3 сорта – Факир (14373), Hondai 8473 (14877) и PJ 244467 (1503). Основная часть коллекции плёнчатых сортов (58% от общего количества) разделилась на две группы: 10,1...12,0% и 12,1...14,0% – в первой были отечественные сорта. Иностранные генотипы отнесены к группе с повышенным содержанием сырого протеина в зерне (12,1...14,0%).

Сорт Отрада, который был взят за стандарт среди голозерных, выделялся низким содержанием протеина в зерне – 9,9±0,2%. Кроме того, в группу с низкой величиной этого показателя вошли Эклипс (15187), СИГ (15335), Тулунский 19, Талисман (14785), Фома (15451), Стайер (15181), Уралец (15498) и единственный иностранный образец – Effektiv (15413) австрийской селекции. При этом известно, что столь низкое содержание сырого протеина можно изменить путем оптимизации минерального питания [22].

Зерно овса по биохимическим свойствам существенно отличается от продукции пшеницы или ячменя прежде всего наличием большого количества масла. Как отмечают исследователи, его содержание варьирует в диапазоне – от 4,6 до 6,7% [23]. В ходе трехлетнего изучения в условиях лесостепи Зауралья содержание масла в зерне овса варьировало от 2,9 (Маршал, 15695) до 10,4% (Тайдон, 15183). Необходимо отметить, что у сорта Тайдон оно варьировало в широком диапазоне – от 6,6 (2023 г.) до 10,1% (2021 г.), что указывает на определенную связь между содержанием масла и погодными условиями.

Для голозерного овса характерно высокое содержание масла [24], что подтверждают результаты наших исследований. В изучаемой коллекции величина этого показателя у всех сортов превышала 4,0%. Среди плёнчатых содержание масла до 4,0% отмечали у 12 сортов, в том числе 2 иностранных происхождения – Effektiv (15413) и R0 ABDH (14400). К этой же группе отнесен местный сорт – Фома (15451), в зерне которого содержание масла в среднем за три года находилось на уровне 3,5% при коэффициенте вариабельности 8%.

Группу генотипов с содержанием масла в зерне от 4,1 до 5,0% составляли 13 сортов, в том числе – Талисман (14785). В группе с аналогичным содержанием масла оказались 7 голозерных сортов, в том числе отечественные Сибирский голозерный (14935) и Помор (15096), которые характеризовались максимальной вариабельностью величины этого показателя по годам – от 3,9 до 5,6% ($CV=12\%$). Такая же реакция на изменение погоды отмечена у американского генотипа Large hullless × Red rustproof (15439). К генотипам с содержанием масла

Табл. 3. Группировка образцов овса в зависимости от содержания сырого протеина и масла в зерне (среднее за 2021–2023 гг.), %

Диапазон проявления признака, %	Голозерные	Плеччатые
Содержание сырого протеина		
<10,0	-	14783, 14785, 15181, 15187, 15335, 15380, 15413, 15451, 15498
10,1...12,0	-	13780, 14033, 14422, 14506, 14778, 14779, 14780, 14859, 15013, 15065, 15213, 15277, 15340, 15443, 15462, 15497, 15617, 15695, 15760, 15818
12,1...14,0	7774, 14935, 15439	11717, 13924, 14029, 14043, 14231, 14292, 14400, 14505, 14570, 14648, 14732, 14788, 14801, 14857, 14915, 14931, 14932, 14936, 15008, 15113, 15114, 15176, 15239, 15473, 15068, 11907, 15444, 15494, 15691
14,1...16,0	2299, 14440, 14809, 14851, 14960, 15090, 15096, 15227, 15553	14373, 14877, 15033
>16,0	14784, 15063, 15067, 15117, 15183, 15275, 15339, 15461, 15757	11840, 14365, 14836
Содержание масла		
<4,0	-	14400, 14505, 14778, 14783, 14859, 15181, 15187, 15239, 15413, 15451, 15498, 15695
4,1...5,0	15439, 14935, 7774, 15090, 15096, 15227, 14851	11840, 13780, 14043, 14365, 14780, 14785, 14931, 14932, 15065, 15213, 15340, 15462, 15497
5,1...6,0	2299, 14440, 14809, 15553	11717, 11907, 13924, 14029, 14033, 14292, 14373, 14422, 14506, 14570, 14648, 14732, 14779, 14788, 14801, 14836, 14857, 14877, 14936, 15008, 15013, 15033, 15068, 15113, 15176, 15277, 15335, 15380, 15443, 15473, 15494, 15617, 15760, 15818
>6,0	14784, 14960, 15063, 15067, 15117, 15183, 15275, 15339, 15461, 15757	14231, 14915, 15114, 15444, 15691

4,1...6,0% были отнесены 75 % сортов плёчатого овса.

В ходе исследований были выделены генотипы с содержанием масла в зерне более 6%. В нее вошли отечественные сорта Сапсан (15444); Пегас (15114) и Петрович (15691). В среднем за три года величина этого показателя у сорта Сапсан составляла 6,1% с варьированием от 4,5 (2023 г.) до 7,1% (2022 г.). Варибельность признака была очень высокой и зависела от погодных условий вегетационного периода – CV=20%.

В зерне сорта Пегас среднее содержание масла было достоверно выше, чем у сорта Сапсан ($F_{\text{факт.}} > F_{\text{теор.}}$ при $p=0,05$) – 7,1%, что в 1,5 раза выше среднего у плеччатых сортов. В 2021 и 2022 гг. величина этого показателя у Пегаса достигала 7,9±0,3%, но в 2023 г. она уменьшилась до 5,8%. Коэффициент варибельности признака у сорта Пегас составил 12%, что соответствует среднему уровню изменчивости. Этот факт указывает на меньшую степень влияния погодных условий на содержание масла в зерне сорта Пегас.

Наибольшее содержание масла в группе плёчатых генотипов в среднем за три года исследований зафиксировано у сортов Петрович (15691) – 7,4±0,3%. В отличие от Сапсана и Пегаса, он характеризовался стабильно высокой величиной этого показателя. Варибельность признака была очень низкой (CV=2%), что делает его наиболее перспективным для направленного селекционного процесса. Такого мнения придерживаются и другие ученые, исследующие масличность овса [25].

Содержание крахмала – один из главных показателей качества зерна. Для овса он не менее важен, чем для пшеницы, поскольку зерно этой культуры активно используют и в мукомольной промышленности, и как источник легкоусвояемых углеводов в кормах для животных и птиц [26, 27].

Среди голозерных форм овса не оказалось ни одного генотипа, в зерне которого было менее 45% крахмала (табл. 3). Основная часть сортов отнесена к группе с содержанием крахмала 55,1...60,0%. Было выделено 5 генотипов голозерного овса, в зерне которых оно превышало 60%, в том числе по 2 сорта из России и США и 1 – из Белоруссии.

Голозерные и плёчатые формы овса характеризуются разным содержанием β-глюканов. К группе с диапазоном до 4,0% отнесены 5 генотипов голозерного овса: Азиль (15553), Вятский (14960), Large hullless × Red rustproof (7774), Голец (15067) и Polard (2299). В эту же группу вошли 37 плёчатых сортов. Содержание β-глюканов в диапазоне 4,1...5,0% отмечено у 7 голозерных и 18 плёчатых сортов.

Кроме того, выделены генотипы, в зерна которых содержание β-глюканов превышало 6,0%. В этой группе было 8 голозерных сортов, из которых только 2 были российской селекции: Помор (15117) и Тюменский голозерный (14784). Содержание β-глюкана в их зерне составляло 6,9±0,1% при коэффициенте вариации по годам менее 10%. У 4 сортов из США величина этого показателя варьировала от 6,2 до 6,9% при меньшей варибельности по годам (CV=4...6%).

В группе плёчатых сортов овса с содержанием β-глюканов более 6,0% выделены 3 генотипа из России – Ровесник (14365), Аргамак (14648), Конкур (15068), также иностранные – Ozon (15473) и Neklan (14936). Средняя величина рассматриваемого признака варьировала от 6,1 до 6,3%.

Результаты дисперсионного анализа свидетельствуют о достоверности ($F_{\text{факт.}} > F_{\text{теор.}}$ при $p=0,05$) влияния генотипа и погодных условий на биохимические показатели зерна (табл. 4). Содержание протеина в зерне овса на 80% зависело от генотипа и на 15% – от погодных условий. Еще более высокой сортовой специфичностью характеризовались содержание масла (85%) и крахмала (86%), что сопоставимо с данными других исследователей [6]. Влияние погодных условий на варибельность содержания масла и крахмала минимальна – 3 и 6% ($F_{\text{факт.}} > F_{\text{теор.}}$ при $p=0,05$). Исследования, проведенные ранее на фоне различных условий минерального питания на 3 сортах тюменской селекции, выявили, что роль генотипа уменьшается только в отношении содержания протеина в зерне, а по крахмалу и маслу она остается неизменно высокой по годам [21].

В отношении влияния генотипа и погодных условий на содержание β-глюканов мнения отечественных и зарубежных исследователей неоднозначны [28, 29]. В условиях Северного Зауралья было установлено, что их доля в формировании варибельности содержания

Табл. 4. Результаты дисперсионного анализа, определяющие степень влияния факторов варибельности на биохимические показатели овса (2020–2023 гг.), %

Источник варьирования признака	Протеин	Масло	Крахмал	β-глюканы
Фактор А (генотип)	80*	85*	86*	78*
Фактор В (погода)	15*	3*	6*	12*
Взаимодействие А×В	4*	11*	5*	7*
НСР ₀₅	0,5	0,2	1,8	1,4

* $F_{\text{факт.}} > F_{\text{теор.}}$

β-глюканов составляет 78 и 12% соответственно, при этом на взаимодействие факторов приходится 7%.

Выводы. Исследование 85 генотипов овса отечественной и зарубежной селекции в условиях лесостепной зоны Зауралья показало сортовые особенности по содержанию протеина, крахмала, масла и β-глюканов в зерне голозерного и плёчатого овса. Выделены наиболее перспективные для селекции генотипы с высоким содержанием протеина (> 13%) – к-15439, Гаврош; к-14935, Jzau; к-7774, Large hullless × Red rustproof; к-15063, Сибирский голозерный; к-15183, Тайдон; к-14784, Тюменский голозерный. Также выделены плёчатые сорта, в зерне которых содержание протеина составляло не менее 16% – к-14365, Ровесник; к-14836, Palini; к-11840, Borrus.

Между содержанием протеина и масла в зерне голозерного овса отмечена очень высокая положительная связь ($r=0,96$; $p=0,05$); у плёчатых – она значительно меньше ($r=0,25$; $p=0,05$). Это позволяет вести направленную селекцию на одновременное повышение протеина и масла. Выявлена средняя отрицательная связь между содержанием протеина и β-глюканов у плёчатых сортов ($r=-0,38$; $p=0,05$), у голозерных она не установлена. Стабильно высокое содержание β-глюканов (более 6,0%) отмечали у 8 сортов голозерного овса (к-14935, Jzau; к-15461, Королёк; к-15090, MF 9224–164; к-15096, MF 9521–281; к-14440, RA 8098–9033; к-15117, Помор; к-15227, MF9714–32; к-14784, Тюменский голозерный), а также у 5 плёчатых сортов (к-14365, Ровесник; к-14648, Аргамак; к-15473, Ozon; к-15068, Конкур; к-14936, Neklan). Для селекции овса целевого назначения были выделены плёчатые генотипы с минимальным содержанием масла $3,3\pm 0,3 \dots 3,6\pm 0,4\%$ (к-15695, Маршал; к-15451, Фома; к-15239, Премьер; к-15187, Эклипс), а также с максимальной величиной этого показателя (более 8,0%) – голозерные сорта (к-15063, Азиль; к-15183, Тайдон; к-14784, Вятский). В группе плёчатых сортов были выделены генотипы (к-15444, Сапсан; к-15114, Пегас; к-15691, Петрович) с содержанием масла в зерне от 6,1 до 7,4%.

Весь выделенный по биохимическим показателям материал рекомендуется использовать в селекционных программах по созданию сортов овса целевого назначения в Западной Сибири.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет государственного задания FWRZ-2024–0004 и при поддержке Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня. 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. Любимова А. В., Еремина Д. В. Наследование ценных признаков продуктивности гибридных комбинаций местных и иностранных сортов овса в условиях Зауралья // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2023. Т. 53. № 11. С. 32–45. doi: 10.26898/0370-8799-2023-11-4.
2. Остапенко А. В., Тоболова Г. В. Применение метода электрофореза проламинов овса для определения

гибридной природы зёрен F1 // *Вестник КрасГА У*. 2017. № 2 (125). С. 14–21.

3. Изменение урожайности и качества зерна овса с повышением адаптивности сортов / О. А. Юсова, П. Н. Николаев, И. В. Сафонова и др. // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020. Т. 181. № 2. С. 42–49. doi: 10.30901/2227-8834-2020-2-42-49.
4. Singh R.P., Bhardwaj A. β-glucans: a potential source for maintaining gut microbiota and the immune system // *Front. Nutr.* 2023. Vol. 10. Article 1143682. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnut.2023.1143682/full> (дата обращения: 12.01.2024). doi: 10.3389/fnut.2023.1143682.
5. Karunaratne N., Classen H. Beta-glucans and beta-glucanase in animal nutrition, do we understand their full effects? // *The value of fibre Engaging the second brain for animal nutrition*. 2019. Chapter 10. URL: https://www.wageningenacademic.com/doi/10.3920/978-90-8686-893-3_10 (дата обращения: 12.01.2024). doi: 10.3920/978-90-8686-893-3_10.
6. Мудрых Н. М., Бессонова Л. В., Вяткина Р. И. Оценка качества зерна плёчатых и голозерных сортов овса // *Пермский аграрный вестник*. 2020. № 2 (30). С. 56–62. doi: 10.24411/2307-2873-2020-10028.
7. Orr W., Molnar S. J. Development of PCR-based SCAR and CAPS markers linked to β-glucan and protein content QTL regions in oat // *Genome*. 2008. No 6. P. 8–26. doi: 10.1139/G08-026.
8. Lyubimova A. V., Moiseeva M. N. Genetic resistance of oat of West Siberian breeding to contrasting weather conditions and mineral nutrition level // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Scientific and Practical Conference «Environmental Problems of Food Security»*. Voronezh: IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2022. Article 012026. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1043/1/012026> (дата обращения: 12.01.2024). doi: 10.1088/1755-1315/1043/1/012026.
9. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. 2022 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS). Vienna, Austria. 236 p. URL: https://www.isric.org/sites/default/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf (дата обращения: 12.01.2024).
10. Паспортная база данных генетических ресурсов растений. URL: <http://db.vir.nw.ru/virdb/maindb> (дата обращения: 11.01.2024).
11. Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса. / сост. И. Г. Лоскутов, О. Н. Ковалева, Е. В. Блинова. СПб.: Гос. науч. учреждение Всероссийский науч.-исслед. ин-т растениеводства им. Н. И. Вавилова, 2012. 63 с.
12. Международные классификаторы СЭВ рода *Avena L.* / Науч.-техн. совет стран-членов СЭВ по коллекциям диких и культ. видов растений и др. Л.: ВИР, 1983. 41 с.
13. Попов В. С., Перчук И. Н., Хорева В. И. Гравиметрический метод количественного определения растворимых β-глюканов в зерне овса // *Биотехнология и селекция растений*. 2021. № 4 (1). С. 5–12. doi: 10.30901/2658-6266-2021-1-01.
14. Попов А. М. Квантили, квартили, децили и центили в статистических расчетах // *Передача, приём, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах*. Сочи: Издательский Дом «Академия Жуковского», 2023. С. 429–43.
15. Изучение сортов овса (*Avena sativa L.*) различного географического происхождения по качеству зер-

- на и продуктивности / В. И. Полонский, Н. А. Сурин, С. А. Герасимов и др. // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2019. № 23 (6). С. 683–690. doi: 10.18699/VJ19.541.
16. Mut Z., Erbaş K., Özge A. Grain Yield and Some Quality Traits of Different Oat (*Avena sativa* L.) Genotypes // *International Journal of Environmental & Agriculture Research (IJOEAR)*. 2016. No. 2. P. 83–88.
 17. Estimation of genetic variability, heritability and genetic advance for seed yield and its components in Oat (*Avena sativa* L.) / M. Jaiswal, Shweta, R. Kumar et al. // *The Pharma Innovation Journal*. 2022. No. 11 (9). P. 1192–1196. URL: <https://www.thepharmajournal.com/archives/2022/vol11issue9/PartN/11-8-281-901.pdf> (дата обращения: 12.01.2024).
 18. Nutritional and yield potential of oat (*Avena sativa* L.) genotypes in dual-purpose crop system / K. Harmanpreet, G. Meenakshi, K. Aanchaldeep, et al. // *Cereal Research Communications*. 2023. No. 51. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42976-022-00348-0> (дата обращения: 12.01.2024). doi: 10.1007/s42976-022-00348-0.
 19. Абуғалиева А. И., Савин Т. В. Содержание β-глюкана в зерне овса // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2013. № 4 (233). С. 76–83.
 20. Изучение голозерного овса из коллекции ВИР на качественные показатели в условиях Казахстана / А. И. Абуғалиева, И. Г. Лоскутов, Т. В. Савин и др. // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021. Т. 182. № 1. С. 9–21. doi: 10.30901/2227-8834-2021-1-9-21.
 21. Еремин Д. И., Моисеева М. Н., Еремينا Д. В. Урожай и качество зерна овса при различном уровне минерального питания // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 9. С. 48–54. doi: 10.53859/02352451_2022_36_9_48.
 22. Breeding of naked oats having high-quality grain / G. A. Batalova, S. N. Shevchenko, M. V. Tulyakova, et al. // *Russian Agricultural Sciences*. 2016. Vol. 42. No. 5. P. 407–410. doi: 10.3103/S1068367416060045.
 23. Кузнецова Т. Е., Левитанов С. А., Серкин Н. В. Селекция овса на Кубани // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2017. Т. 178. № 1. С. 41–47. doi: 10.30901/2227-8834-2017-1-41-47.
 24. Адаптивный потенциал образцов овса по химическим и физическим характеристикам зерна / В. И. Полонский, С. А. Герасимов, А. В. Сумина и др. // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022. Т. 183. № 1. С. 57–75. doi: 10.30901/2227-8834-2022-1-57-75.
 25. Кардашина В. Е., Николаева Л. С. Агроэкологическая оценка сортов и перспективных линий овса универсального использования // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 5. С. 56–60. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10511.
 26. Шаболкина Е. Н., Шевченко С. Н. Результаты изучения реологических и хлебопекарных показателей теста, полученного из смесей пшеничной муки и продуктов переработки зерна овса голозерного // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2020. № 4 (36). С. 148–155. doi: 10.24411/2309-348X-2020-11218.
 27. Bioactive components in oat and barley grain as a promising breeding trend for functional food production / N. A. Shvachko, I. G. Loskutov, T. V. Semilet, et al. // *Molecules*. 2021. Vol. 26. No. 8. Article 2260. URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/8/2260> (дата обращения: 12.01.2024). doi: 10.3390/molecules26082260.
 28. Лоскутов И. Г., Полонский В. И. Селекция на содержание β-глюканов в зерне овса как перспективное направление для получения продуктов здорового питания, сырья и фуража (обзор) // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. № 4. С. 646–657. doi: 10.15389/agrobiol.2017.4.646rus.
 29. Thro A-M., Robertson L. Dedication: Kenneth J. Frey: Oat Breeder, Educator, and Champion of Plant Breeding // *Plant Breeding Reviews New Jersey*, 2011. Vol. 34. 36 p. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470880579.ch1> (дата обращения: 12.01.2024). doi: 10.1002/9780470880579.ch1.

Поступила в редакцию 16.01.2024
 После доработки 27.02.2024
 Принята к публикации 19.03.2024

ПИТАТЕЛЬНАЯ ЦЕННОСТЬ КОЛОСЬЕВ ШАРОЗЕРНОЙ ПШЕНИЦЫ В КАЧЕСТВЕ КОРМА

Ю. А. Иванов¹, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук, В. И. Пахомов^{2,3}, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, С. В. Брагинец^{2,3}, Д. В. Рудой³, доктора технических наук, О. Н. Бахчевников², кандидат технических наук

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
филиал Института механизации животноводства,
108823, Москва, поселение Рязановское, пос. Знамя Октября, 31
E-mail: ros-plem@mail.ru

²Аграрный научный центр «Донской»,
347740, Ростовская обл., Зерноград, Научный городок, 3
E-mail: oleg-b@list.ru

³Донской государственный технический университет,
344003, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
E-mail: spu-38@donstu.ru

*В последние годы увеличился интерес к выращиванию нетрадиционных зерновых колосовых культур и изучению возможности их использования в качестве сырья для приготовления корма. Одна из таких перспективных культур – шарозерная пшеница (*Triticum sphaerococcum* Percival). Цель исследования – определение питательной ценности колосьев шарозерной пшеницы в разные фазы спелости для использования в качестве сырья при производстве кормов в сравнении с мягкой пшеницей, и установление рациональных сроков их уборки на кормовые цели. Уборку проводили путем очеса без обмолота и разделения в разные фазы созревания. Корм готовили из зернового вороха. Химический анализ проб осуществляли по стандартным методикам. Наилучший срок уборки шарозерной пшеницы для приготовления корма из ее колосьев – фаза середины восковой спелости, когда они содержат максимальное количество незаменимых аминокислот и минимальное количество клетчатки. Корм, приготовленный из колосьев шарозерной пшеницы, характеризуется лучшим качеством, чем корм из мягкой пшеницы, в частности он отличается повышенным содержанием суммы незаменимых аминокислот (на 1,06...2,23 %) и отдельных аминокислот (на 1...5 %). Это открывает возможности для использования культуры при приготовлении кормов с целью улучшения качества белка. Недостаток корма из шарозерной пшеницы заключается в повышенном (на 4...10 %), по сравнению с мягкой пшеницей, содержании клетчатки. Зерновой ворох (колосья) шарозерной пшеницы, убранный очесом без обмолота в фазе начала и середины восковой спелости, может быть источником сырья, обеспечивающего повышение питательной ценности кормов.*

NUTRITIVE VALUE OF INDIAN DWARF WHEAT EARS AS FEED

Yu. A. Ivanov¹, V. I. Pakhomov^{2,3}, S. V. Braginetz^{2,3}, D. V. Rudoy³, O. N. Bakhchevnikov²

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
Branch Institute of Mechanisation of Animal Husbandry,
108823, Moskva, poselenie Ryazanovskoe, pos. Znamya Oktyabrya, 31
E-mail: ros-plem@mail.ru

²Agricultural Research Centre Donskoy,
347740, Rostovskaya obl., Zernograd, Nauchnyi gorodok, 3
E-mail: oleg-b@list.ru

³Don State Technical University,
344003, Rostov-na-Donu, pl. Gagarina, 1
E-mail: spu-38@donstu.ru

*Interest in growing ancient wheat species and studying the possibility of their use as raw material for feed preparation has increased recently. Indian dwarf wheat (*Triticum sphaerococcum* Percival) is one of the promising grain crops. The aim of the study was to determine the nutritive value of ears of Indian dwarf wheat in different phases of ripeness for use as raw material in the production of feed in comparison with soft wheat and to determine the rational time frame of their harvesting for feed preparation. Harvesting was carried out by combing without threshing and separation of grain heap in different phases of maturity. The feed was prepared from the grain heap. Chemical analyses of feed samples were performed according to standard methods. The mid-wax ripeness phase is the optimum harvesting time of Indian dwarf wheat for preparation of feed from its ears. Its ears in this phase contain maximum essential amino acids and minimum cellulose. Feed prepared from ears of Indian dwarf wheat has a better quality than feed from soft wheat, as it contains 1.06–2.23 % more of the sum of essential amino acids and 1–5 % more of individual amino acids. This allows the crop to be used in feed preparation to improve protein quality. But its 4–10 % more higher cellulose content than feed from soft wheat is a disadvantage. Grain heap (ears) of Indian dwarf wheat, harvested without threshing in the phase of early wax and mid-wax ripeness, can be a source of increasing the nutritive value of feeds, as it contains more essential amino acids than soft wheat.*

Ключевые слова: шарозерная пшеница, колос, зерновой ворох, ранние фазы спелости, протеин, незаменимые аминокислоты, корм.

Key words: Indian dwarf wheat, ear, grain heap, early stages of ripeness, protein, essential amino acids, feed.

Одна из проблем сельского хозяйства в России – низкое содержание протеина, в том числе незаменимых аминокислот, в продукции таких традиционных зерновых культурах, как мягкая пшеница и ячмень [1]. Поэтому увеличился интерес к изучению мало распространенных зерновых колосовых культур и определению возможности их использования в качестве сырья для приготовления кормов для сельскохозяйственных животных и рыб [2].

Среди нетрадиционных зерновых культур выделяется группа таких редких пшениц, как персидская

(*Triticum persicum* Vavilov), шарозерная (индийская) (*Triticum sphaerococcum* Percival), двузернянка (*Triticum dicoccum* Schrank) и др. [3]. Эти виды были распространены в древности, но на сегодняшний день вытеснены из культуры более урожайной мягкой пшеницей (*Triticum aestivum* L.) [4]. В то же время, несмотря на меньшую урожайность, они имеют ряд таких полезных свойств, как устойчивость к болезням и полеганию, а также большее содержание белка [5].

По мнению селекционеров, из перечисленных видов пшеницы наиболее приспособлена к интенсивной технологии воз-

дельвания шарозерная, которая при меньшей урожайности, отличается устойчивостью к полеганию и скороспелостью [6]. В нашей стране ее селекцией занимается «Национальный центр зерна им. П. П. Лукьяненко», где созданы сорта озимой шарозерной пшеницы, пригодные для возделывания на юге России [7].

Так как шарозерная пшеница сравнительно новая культура для современного сельского хозяйства, известны единичные результаты исследований ее питательной ценности и усвояемости в качестве корма для сельскохозяйственных животных и рыб [8], что вызывает необходимость дополнительного изучения ее кормовой ценности, причем не только при полном созревании, но и в ранние фазы спелости, когда возможно и целесообразно использовать не только зерно, но и незерновую часть колоса для увеличения питательной ценности.

Цель исследования – изучение питательной ценности колосьев шарозерной пшеницы в разные фазы спелости для определения возможности их использования в качестве сырья при производстве кормов, в сравнении с мягкой пшеницей, и установления рациональных сроков уборки на кормовые цели.

Методика. Работу проводили в 2022–2023 гг. на юге Ростовской области. Выращивали озимую мягкую пшеницу (*Triticum aestivum* L.) сорта Амбар и озимую шарозерную пшеницу (*Triticum sphaerococcum* Percival) сорта Еремеевна. Обе культуры высевали на одном поле и выращивали по одинаковой технологии с внесением равного количества минеральных удобрений. Полевой опыт двухфакторный (фактор А – культура, фактор В – фаза созревания зерна при уборке), повторность – 3-кратная. Площадь опытной делянки – 60 м², учетной делянки – 20 м².

Предшественник – черный пар. Почва – чернозем обыкновенный карбонатный тяжелосуглинистый, pH – 7,0, содержание гумуса (по Тюрину) – 3,2 %, общего азота (по ГОСТ Р 58596–2019) – 28,6 мг/кг, подвижного фосфора (по Кирсанову) – 20...25 мг/кг, обменного калия (по Мачигину) – 300...350 мг/кг. В период вегетации 2022–2023 гг. наблюдали небольшое превышение количества осадков (на 3 %) и средней температуры воздуха (на 2 °С) над средне-многолетней нормой.

Посев осуществляли сеялкой СС-11 «Альфа». Норма высева семян – 230 кг/га (5,2 млн всхожих семян на 1 га). Одновременно с посевом вносили аммофос в дозе 100 кг/га. Далее были проведены две подкормки минеральными удобрениями (аммиачная селитра в дозе 70 кг/га) в фазы весеннего кущения и выхода в трубку.

Уборку пшеницы проводили путем очеса без обмолота и разделения зернового вороха (зерно и незерновая часть колоса) [9] очесывающей жаткой в различные сроки, соответствующие конкретным фазам созревания зерна: 1 – молочная спелость, 2 – тестообразная спелость, 3 – начало восковой спелости, 4 – середина восковой спелости, 5 – конец восковой спелости, 6 – полная спелость.

Из убранного зернового вороха готовили корм для двухлетнего карпа по новой технологии, включающей операции экспандирования при температуре 35...40 °С, сушки до влажности 14...18 %, измельчения в дробилке и гранулирования в грануляторе с горизонтальной плоской матрицей (рис. 1) [10].

Пробы произведенного корма отбирали по ГОСТ ISO 6497–2014 и готовили к анализу по ГОСТ ISO 6498–2014. Химический анализ проб проводили по стандартным методикам с определением содержания протеина, жиров, β-каротина, клетчатки и золы. Содержание в корме незаменимых аминокислот определяли на приборе «Капель-104Т» методом капиллярного электрофореза по ГОСТ Р 55569–2013, содержание β-каротина – методом

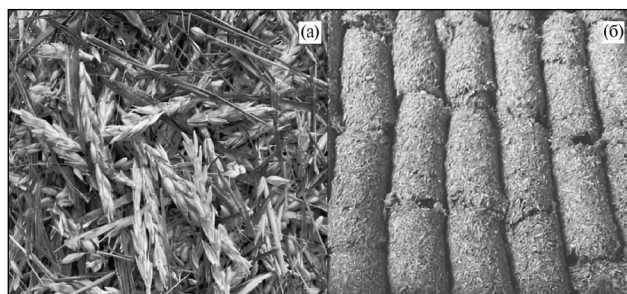


Рис. 1. Зерновой ворох (а) и корм (б) из колосьев мягкой пшеницы, убранных в фазе начала восковой спелости.

HPLC (хроматографии в тонком слое сорбента) [11].

Статистическую достоверность обработки результатов эксперимента определяли методом дисперсионного анализа с использованием критерия Стьюдента при 5 %-ном уровне значимости (Доспехов Б. А. *Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований)*. Изд. 6-е. М.: Альянс, 2011. 350 с.).

Установленные в результате анализа величины показателей питательной ценности корма из колосьев шарозерной пшеницы, убранной в разные фазы спелости, сравнивали между собой и с аналогичными показателями корма из мягкой пшеницы, которая служила контролем.

Кроме того, был рассчитан аминокислотный скор по лимитирующим аминокислотам для кормов из колосьев, убранных во все фазы спелости [12]. При этом содержание незаменимых аминокислот в корме сравнивали с их долей в «идеальном» корме для двухлетнего карпа [13].

Результаты и обсуждение. Изменение содержания протеина в колосьях изучаемых зерновых культур по мере созревания происходило различным образом (рис. 2). В колосьях мягкой пшеницы содержание протеина с начала созревания (12,91 %) постепенно достоверно возрастает на 1,95 %, достигая максимума 14,86 % в фазе середины восковой спелости, а затем резко снижается на 2,2 % до минимального уровня 12,66 % при полной спелости. Напротив, в корме из колосьев шарозерной пшеницы максимальное содержание протеина 15,66 % наблюдали в фазе тестообразной спелости, после чего оно достоверно снижается на 2,65 % до минимума 13,01 % при полной спелости. Величина этого показателя в корме из колосьев обеих культур, убранных в начале и середине восковой спелости, находится примерно на одном уровне.

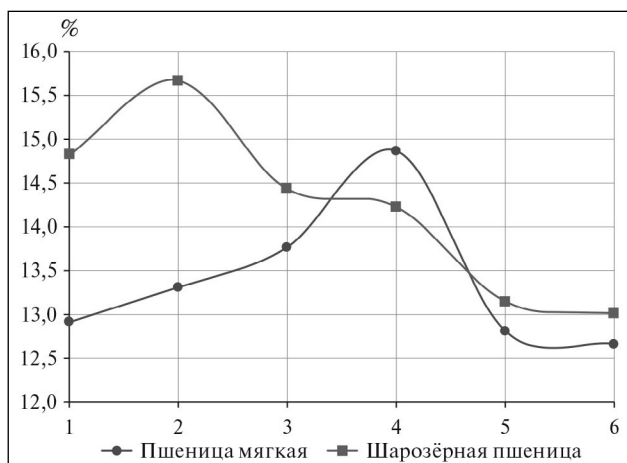


Рис. 2. Изменение содержания протеина в корме из колосьев пшениц разных видов в процессе созревания (НСР₀₅ по фактору культура – 0,83 %, фаза созревания – 0,75 %): 1–6 – фазы созревания зерна.

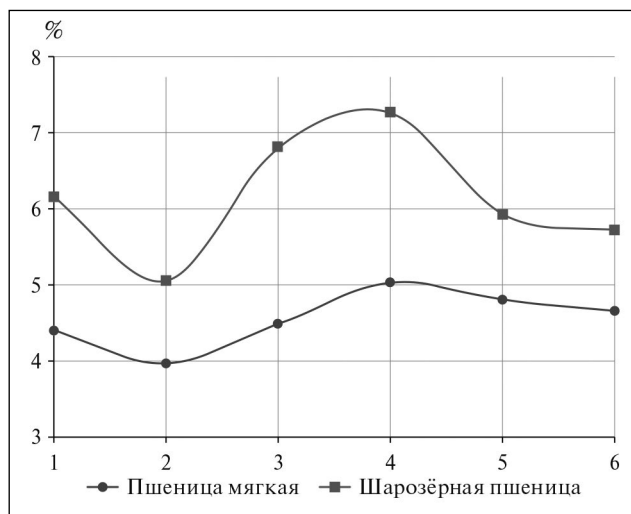


Рис. 3. Изменение суммарного содержания незаменимых аминокислот в корме из колосьев пшениц разных видов в процессе созревания (НСР₀₅ по фактору культура – 1,6 %, фаза созревания – 1,35 %): 1–6 – фазы созревания зерна

Содержание протеина в корме из колосьев шарозерной пшеницы в фазы молочной и тестообразной спелости, было выше, чем в корме из мягкой пшеницы, на 1,91...2,35 %, в фазы восковой и полной спелости величины этого показателя различались незначительно.

В результате химического анализа в кормах из колосьев пшениц было определено суммарное содержание в них незаменимых аминокислот (рис. 3). В отличие от содержания протеина, суммарное количество незаменимых аминокислот у изучаемых культур по мере созревания изменялось сходным образом. Наименьшим оно было в фазе тестообразной спелости: мягкая пшеница – 3,96 %, шарозерная – 5,05 %. После этого величина этого показателя достоверно возрастала соответственно на 1,07 % и 2,21 %, достигая максимума (5,03 % и 7,26 %) в середине восковой спелости, затем достоверно снижалось на 0,38 % и 1,55 % к концу созревания (до 4,65 и 5,71 %).

При этом содержание незаменимых аминокислот в корме из колосьев шарозерной пшеницы превосходит величину этого показателя в продукте из колосьев мягкой пшеницы во все фазы созревания на 1,06...2,23 % (при НСР₀₅ по фактору культура – 1,6 %). Изменение содержания в корме из колосьев изучаемых культур отдельных незаменимых аминокислот в основном подчинялось тем же закономерностям, что и их суммарное количество (табл. 1). При этом в корме из колосьев обоих видов пшеницы величины этих показателей, особенно для лизина и суммы аминокислот, были ниже требуемых во все фазы созревания соответственно на 1,3...1,6 % и 5...8 %. Тем не менее, продукт из шарозерной пшеницы

достоверно отличался повышенным содержанием большинства незаменимых аминокислот и их суммы, по сравнению с кормом из мягкой пшеницы, на 1...2 %.

Для полноценного питания рыб имеет значение не только уровень содержания незаменимых аминокислот в корме, но и их соотношение, то есть сбалансированность, по сравнению с «идеальным» кормом, выражаемая аминокислотным скором. Был вычислен аминокислотный скор для корма из колосьев всех фаз созревания (табл. 2).

Корм из колосьев шарозерной пшеницы обладает более сбалансированным аминокислотным составом с лучшими значениями сора по всем аминокислотам, кроме аргинина, чем у мягкой пшеницы. Наилучшие значения аминокислотного сора имеет корм из колосьев шарозерной пшеницы, убранной в середине восковой спелости. Тем не менее по большинству незаменимых аминокислот его величины были недостаточными, за исключением удовлетворительного сора по треонину и триптофану. Лимитирующие незаменимые аминокислоты для корма из колосьев шарозерной пшеницы – аргинин и лизин.

Результаты химического анализа корма из колосьев по остальным питательным веществам (табл. 3) свидетельствуют, что продукт из шарозерной пшеницы характеризуется значительно более высоким содержанием клетчатки, чем корм из мягкой пшеницы, на 4...10 %. Причем, в отличие от последнего, оно минимально (17,35...18,65 %) при уборке колосьев в фазы начала и середины восковой спелости, после чего постепенно возрастает на 3,43 % до 20,78 % в фазе полной спелости. Так как клетчатка плохо переваривается организмом рыб, это отрицательный фактор, который можно минимизировать путем уборки колосьев шарозерной пшеницы в начале и середине восковой спелости.

По содержанию жиров в корме из колосьев изучаемых культур достоверных различий не установлено. Содержание минеральных веществ (зола) в продукте из колосьев шарозерной пшеницы было выше, чем в корме из мягкой, во все фазы созревания на 0,29...0,59 %.

Содержание β-каротина в корме из колосьев всех изученных культур с начала формирования зерна возрастало, достигая максимума 0,98...1,02 мг/кг к концу восковой спелости, после чего снижалось при достижении полной спелости до 0,61...0,65 %. Достоверных различий между величинами этих показателей в зависимости от вида пшеницы во все фазы спелости не наблюдали.

Выводы. Корм для карпа из колосьев шарозерной пшеницы по содержанию протеина, незаменимых аминокислот, жира, золы, клетчатки и β-каротина не уступает традиционному корму из мягкой пшеницы. При этом содержание жиров и β-каротина в корме из колосьев мягкой и шарозерной пшеницы, убранных во все фазы спелости, достоверно не различается.

Рациональные сроки уборки колосьев шарозерной пшеницы на кормовые цели – начало и середина восковой спелости,

Табл. 1. Содержание незаменимых аминокислот в корме из колосьев мягкой и шарозерной пшеницы разных фаз созревания, % сухого вещества

Аминокислота	Фаза созревания зерна												НСР ₀₅ **	«Идеальный»корм
	1		2		3		4		5		6			
	М*	Ш	М	Ш	М	Ш	М	Ш	М	Ш	М	Ш		
Аргинин	0,70	0,71	0,67	0,55	0,76	0,66	0,77	0,58	0,80	0,57	0,70	0,56	0,13	1,90
Валин	0,48	0,80	0,43	0,59	0,47	0,58	0,53	0,76	0,52	0,66	0,48	0,66	0,12	1,48
Гистидин	0,35	0,28	0,25	0,29	0,30	0,39	0,31	0,44	0,26	0,40	0,35	0,40	0,06	0,72
Лизин	0,45	0,62	0,38	0,48	0,48	0,57	0,51	0,62	0,47	0,44	0,45	0,40	0,07	2,00
Лейцин														
+изолейцин	0,99	1,50	0,89	1,40	0,98	1,99	1,18	1,94	1,13	1,70	0,99	1,59	0,66	3,00
Метионин	0,22	0,43	0,24	0,24	0,26	0,33	0,30	0,34	0,25	0,26	0,22	0,23	0,06	0,70
Треонин	0,69	0,91	0,65	0,68	0,72	1,15	0,87	1,40	0,84	0,81	0,69	0,79	0,21	1,20
Триптофан	0,11	0,40	0,10	0,38	0,12	0,48	0,14	0,50	0,12	0,44	0,11	0,43	0,32	0,60
Фенилаланин	0,41	0,50	0,35	0,44	0,40	0,66	0,42	0,68	0,41	0,65	0,41	0,65	0,20	1,40
Всего	4,40	6,15	3,96	5,05	4,49	6,81	5,03	7,26	4,80	5,93	4,40	5,71	1,60	13,00

*М – корм из мягкой пшеницы, Ш – корм из шарозерной пшеницы;
**по фактору культура.

Табл. 2. Аминокислотный скор корма из колосьев пшениц разных видов, убранных в различные фазы созревания зерна

Аминокислота	Фаза созревания зерна											
	1		2		3		4		5		6	
	М*	Ш	М	Ш	М	Ш	М	Ш	М	Ш	М	Ш
Аргинин	0,37	0,37	0,35	0,29	0,40	0,35	0,41	0,31	0,42	0,30	0,37	0,29
Валин	0,24	0,40	0,22	0,30	0,24	0,29	0,36	0,51	0,26	0,33	0,24	0,33
Гистидин	0,25	0,20	0,18	0,21	0,21	0,28	0,43	0,61	0,19	0,29	0,25	0,29
Лизин	0,63	0,86	0,53	0,67	0,67	0,79	0,26	0,31	0,65	0,61	0,63	0,56
Лейцин+												
изолейцин	0,33	0,50	0,30	0,47	0,33	0,66	0,39	0,65	0,38	0,57	0,33	0,53
Метионин	0,31	0,61	0,34	0,34	0,37	0,47	0,43	0,49	0,36	0,37	0,31	0,33
Треонин	0,47	0,61	0,44	0,46	0,49	0,78	0,73	1,17	0,57	0,55	0,47	0,53
Триптофан	0,09	0,33	0,08	0,32	0,10	0,40	0,23	0,83	0,10	0,37	0,09	0,36
Фенилаланин	0,68	0,83	0,58	0,73	0,67	1,10	0,30	0,49	0,68	1,08	0,68	1,08
Всего	0,34	0,47	0,30	0,39	0,35	0,52	0,41	0,31	0,37	0,46	0,34	0,44

*М – корм из мягкой пшеницы, Ш – корм из шарозерной пшеницы.

когда содержание протеина в изготовленном из них корме удовлетворительное, незаменимых аминокислот – максимальное, а клетчатки – наименьшее. Корм, приготовленный из колосьев шарозерной пшеницы, убранных в рациональные сроки, отличается лучшим аминокислотным профилем и на 1,06...2,23 % большим содержанием незаменимых аминокислот, чем корм из мягкой пшеницы, а значит, и лучшей питательной ценностью. Это позволяет использовать сырье нетрадиционной культуры при приготовлении кормов для улучшения качества белка. Недостаток корма из колосьев шарозерной пшеницы – на 4...10 % большее, чем у продукта из мягкой пшеницы, содержание клетчатки.

Табл. 3. Результаты химического анализа корма из колосьев пшениц разных видов, убранных различные фазы созревания

Фаза созревания зерна	Жир, %		Зола, %		Клетчатка, %		β-каротин, мг/кг	
	мягкая	шарозерная	мягкая	шарозерная	мягкая	шарозерная	мягкая	шарозерная
Молочная	2,09	2,15	3,96	6,29	13,01	23,53	0,60	0,59
Тестообразная	2,29	2,81	4,02	6,40	13,31	20,50	0,62	0,62
Начало восковой	2,51	2,11	4,03	6,40	13,52	17,35	0,63	0,64
Середина восковой	2,23	2,17	4,25	6,06	11,88	18,65	0,78	0,81
Конец восковой	2,03	1,93	4,08	5,84	11,54	20,05	0,98	1,02
Полная	2,02	1,89	4,07	5,81	11,50	20,78	0,61	0,65
НСР ₀₅ по фактору А	0,02		2,07		7,68		0,02	
НСР ₀₅ по фактору В	0,06		1,74		3,83		0,01	

Зерновой ворох (колосья) шарозерной пшеницы, убранный очесом без обмолота в начале и середине восковой спелости, может стать источником сырья, обеспечивающего повышение питательной ценности корма, так как содержит больше незаменимых аминокислот, чем продукция из колосьев мягкой пшеницы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета «Аграрный научный центр «Донской» в рамках Государственного задания (тема № 0505–2022–0007).

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. Питательная ценность кормов растительного происхождения / Т. В. Жарёхина, Л. Н. Шаяхметова, Э. Р. Гайнутдинова и др. // *Нива Татарстана*. 2019. № 1–2. С. 61–64.
2. Сухова О. В. Использование новых видов зерновых культур как важнейшая задача современного аграрного сектора Нижегородской области (на примере зерна тритикале) // *Вестник НГИЭИ*. 2012. № 2. С. 118–129.
3. Arzani A., Ashraf M. Cultivated ancient wheats (*Triticum spp.*): A potential source of health-beneficial food products // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2017. Vol. 16. No. 3. P. 477–488. doi: 10.1111/1541-4337.12262.
4. Shewry P. R., Hey S. Do «ancient» wheat species differ from modern bread wheat in their contents of bioactive components? // *Journal of Cereal Science*. 2015. Vol. 65. P. 236–243. doi: 10.1016/j.jcs.2015.07.014.
5. Low molecular phytochemicals of Indian dwarf (*Triticum sphaerococcum* Percival) and Persian wheat (*T. carthlicum* Nevski) grain / M. Skrajda-Brdak, I. Konopka, M. Tańska, et al. // *Journal of Cereal Science*. 2020. Vol. 91. P. 102887. URL: <https://sciencedirect.com/science/article/pii/S0733521019307593?via%3Dihub> (дата обращения: 20.12.2023). doi: 10.1016/j.jcs.2019.102887.
6. Ancient wheat species (*Triticum sphaerococcum* Perc. and *T. persicum* Vav.) in organic farming: Influence of sowing density on agronomic traits, pests and diseases occurrence, and weed infestation / M. Szczepanek, G. Lemańczyk, R. Lamparski et al. // *Agriculture*. 2020. Vol. 10. No. 11. P. 556. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/11/556> (дата обращения: 20.12.2023). doi: 10.3390/agriculture10110556.
7. Этапы и результаты селекции шарозерной пшеницы (*T. sphaerococcum* Perc.) в Краснодарском НИИСХ им. П. П. Лукьяненко (Часть 1) / Л. А. Беспалова, А. Н. Боровик, Ф. А. Колесников и др. // *Зерновое хозяйство России*. 2015. № 2. С. 40–44.
8. Оценка экзотических форм пшеницы и тритикале при кормлении цыплят / В. Г. Рядчиков, Л. А. Беспалова, А. Н. Боровик и др. // *Птицеводство*. 2018. № 11–12. С. 13–19.
9. Buryanov A., Chervyakov I. Using combines for cleaning grain crops by non-traditional technologies // *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 58. No 3. P. 27–32. doi: 10.35633/INMATEH-59-03.
10. Технология производства гранулированного корма из необмолоченного зернового вороха / Д. В. Рудой, С. В. Брагинцев, В. И. Пахомов и др. // *Техника и технологии в животноводстве*. 2022. № 3. С. 48–52. doi: 10.51794/27132064-2022-3-48.
11. Application of a UV-vis detection-HPLC method for a rapid determination of lycopene and β-carotene in vegetables / A. O. Barba, M. C. Hurtado, M. S. Mata et al. // *Food Chemistry*. 2006. Vol. 95. No. 2. P. 328–336. doi: 10.1016/j.foodchem.2005.02.028.
12. Количественный и качественный аминокислотный анализ альтернативных источников протеина в комбикормах / Р. В. Урсу, Ю. А. Гусева, С. Ю. Пигина и др. // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2022. № 4. С. 362–369. doi: 10.32786/2071-9485-2022-04-44.
13. Способы нормирования кормления искусственными кормами при выращивании двухлетнего карпа до товарной массы в прудах / Ю. А. Желтов, А. И. Дворецкий, В. В. Микитюк и др. // *Рибне господарство України*. 2013. № 3. С. 32–39.

Поступила в редакцию 23.01.2024

После доработки 26.02.2024

Принята к публикации 02.04.2024

ВТОРИЧНЫЕ МЕТАБОЛИТЫ ГИПЕРПИГМЕНТИРОВАННОГО СОРТА СОИ ЛОКУС И ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ, ПРЕДСТАВЛЕННОЕ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ МИКРОСКОПИИ

М. П. Разгонова^{1,2}, кандидат технических наук, **Е. И. Черевач²**, доктор технических наук, **Е. С. Бутовец³**, кандидат сельскохозяйственных наук, **Л. М. Лукьянчук³**, **Е. А. Васина³**, **О. Л. Шепель⁴**, **К. С. Голохваст^{1,5}**, доктор биологических наук

¹Федеральный исследовательский центр
Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР),
190031, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42

²Дальневосточный федеральный университет,
Передовая инженерная школа «Институт биотехнологий, биоинженерии и пищевых систем»,
690922, Владивосток, остров Русский, Аякс, 10

³Федеральный научный центр агробιοтехнологий Дальнего Востока им. А. К. Чайки,
692539, Приморский край, Уссурийск, п. Тимирязевский, ул. Воложенина, 30

⁴Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН
обособленное подразделение «Дальневосточного научно-исследовательского института сельского хозяйства»,
680521, Хабаровский край, Хабаровский район, с. Восточное, ул. Клубная, 13

⁵Сибирский федеральный научный центр агробιοтехнологий,
633501, Новосибирская обл., Краснообск, а/я 463
E-mail: m.razgonova@vir.nw.ru

Исследования проводили с целью детального метаболомного анализа методом тандемной масс-спектрометрии сорта сои Локус, отобранного из коллекции Федерального научного центра агробιοтехнологий Дальнего Востока им. А. К. Чайки, для идентификации полифенольного состава семян и определения других химических групп в составе семени. Результаты тандемной масс-спектрометрии были дополнительно подкреплены визуальными данными, впервые полученными методом лазерной микроскопии. Объект исследования – семена сорта сои Локус. Эксперименты проводили на лазерном конфокальном микроскопе CLSM-800, масс-спектрометрию биологически активных веществ осуществляли с использованием ионной ловушки amaZon SL. В результате лазерной микроскопии отмечено богатое присутствие в семенах сои сорта Локус соединений полифенольного комплекса. Фенольные соединения сои пространственно расположены преимущественно в семенной кожуре и наружном слое семядолей. Антоцианов особенно много в палисадном слое. Эта информация может быть полезна для быстрой оценки сортов для селекции и селекции в отношении этих соединений. Полифенольные вещества сои, в частности антоцианы, пространственно локализованы преимущественно в семенной кожуре сои. Методом тандемной масс-спектрометрии идентифицировано присутствие 59 соединений, из них 35 входят в группу полифенольных. В экстрактах семян сои сорта Локус впервые идентифицировано 15 соединений, в том числе флавоны апигенин, акацетин, цирсимаритин; тетрагидроксифлавоны аромандрин 7-О-рамнозид; флавонолы изорамнетин, гексозид дигидрокемпферол; лигнан медиоресинол; флаван-3-олы этиафзелехин, катехин, эпикатехин, кумарин томентин и др. Полученные данные помогут интенсифицировать будущие исследования по разработке и производству новых лекарственных препаратов, биологически активных и пищевых добавок, а также различных продуктов функционального и специализированного назначения, содержащих целевые экстракты сои.

SECONDARY METABOLITES OF SOYBEAN SEEDS VARIETY LOCUS AND THEIR SPATIAL ARRANGEMENT, REPRESENTED BY LASER MICROSCOPY

M. P. Razgonova^{1,2}, **E. I. Cherevach²**, **E. S. Butovets³**, **L. M. Lukyanchuk³**, **E. A. Vasina³**, **O. L. Shepel⁴**, **K. S. Golokhvast^{1,5}**

¹Federal Research Center the Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR),
190000, Sankt-Peterburg, ul. Bol'shaya Morskaya, 42–44

²Far Eastern Federal University, Advance Engineering School «Institute of Biotechnology,
Bioengineering and Food System»,
690922, Vladivostok, ostrov Russkii, Ayaks, 10

³Chaika Federal Scientific Center for Agrobiotechnology of the Far East,
692539, Ussuriisk, Primorskii krai, pos. Timiryazevskii, ul. Volozhenina, 30

⁴Far Eastern Research Institute of Agriculture, Khabarovsk Federal Scientific Center,
Far Eastern branch, Russian Academy of Sciences,
680000, Khabarovsk, ul. Dzerzhinskogo, 54

⁵Siberian Federal Research Center of Agricultural Biotechnology, Russian Academy of Sciences,
630501, Novosibirskaya obl., Novosibirskii r-n, pos. Krasnoobsk, a/ya 463
E-mail: m.razgonova@vir.nw.ru

The purpose of this study is a detailed metabolomic analysis using tandem mass spectrometry of the soybean variety Locus, selected from the collection of the Federal Scientific Center for Agrobiotechnologies of the Far East named after A. K. Chaika», to identify both the polyphenolic composition of seeds and the determination of other chemical groups in the composition of the seed. Tandem mass spectrometry studies were further supported by visual data obtained for the first time using laser microscopy. The object of the study is the seeds of the soybean variety Locus, grown in 2022 at the field site of the soybean breeding laboratory of the Federal

Scientific Center for Agrobiotechnologies of the Far East named after A. K. Chaika», located in the village of Timiryazevsky (near the city of Ussuriysk). Experiments were carried out on a CLSM-800 laser confocal microscope and mass spectrometry of biologically active substances on an amaZon SL ion trap. Laser microscopy made it possible to clarify in detail the spatial distribution of the content of phenolic acids, flavonols and anthocyanins in soybean seeds. The studies were able to convincingly show that soybean polyphenolic substances and, in particular, anthocyanins are spatially localized mainly in the soybean seed coat. High-performance liquid chromatography coupled with ion trap (tandem mass spectrometry) was used to identify target analytes in soybean seed extracts. Using tandem mass spectrometry, the presence of 59 compounds was identified, of which 35 compounds represent the group of polyphenolic compounds. 15 compounds were identified for the first time in soybean extracts of the Locus variety. These are flavones: apigenin, acacetin, cirsimaritin; tetrahydroxyflavone aromadendrin 7-O-rhamnoside; lignan medioresinol; coumarin tomentin and other polyphenolic compounds. The data obtained will help intensify future research on the development and production of new drugs, dietary supplements, food additives and various functional and specialized products containing targeted soybean extracts.

Ключевые слова: соя (*Glycine max* (L.) Merr.), ВЭЖХ-МС/МС, тандемная масс-спектрометрия, полифенольные соединения, лазерная микроскопия.

Key words: *Glycine max* (L) Merr., soja, HPLC–MS/MS, tandem mass spectrometry, polyphenolic compounds, laser microscopy.

Соя (*Glycine max* (L) Merr.) – экономически важный представитель семейства Fabaceae. Будучи известным источником дешевого концентрированного белка и растительного масла, соя на сегодняшний день приобрела мировое значение среди сельскохозяйственных культур. В последние годы производство сои в России демонстрирует стабильный рост из-за расширения посевных площадей и появления новых урожайных сортов [1, 2]. Прирост посевных площадей в 2021 г., относительно 2010 г., составил 134%, а валовое производство увеличилось на 279%. К основным регионам возделывания сои в России относят Амурскую, Курскую и Белгородскую области, а также Приморский и Краснодарский края – 62% всех посевных площадей. Доля посевов этой культуры на Дальнем Востоке составляет 44% от общероссийских [3, 4].

Семена сои в пересчете на сухую массу содержат 35...40% белка, из которых 90% составляют два запасных глобулина – 1S-глицинин и 7S β -конглицинин. Эти белки содержат все аминокислоты, необходимые для питания человека, что делает соевые продукты почти эквивалентными животным источникам по качеству белка, но с меньшим количеством насыщенных жиров и отсутствием холестерина. Кроме того, соя содержит такие биологически активные белковые компоненты, как гемагглютинин, ингибиторы трипсина, α -амилазы и липоксигеназы [5].

Среди исследователей и потребителей существует большой интерес к потенциальной роли сои и соевых продуктов в профилактике заболеваний. Клинические и научные данные выявили лечебную пользу компонентов сои при нарушениях обмена веществ и других хронических заболеваниях (диабет, ожирение, рак, остеопороз, климактерический синдром, анемия и др.). В качестве шага к пониманию механизмов влияния пищевых компонентов на здоровье важно изучить химический состав и выявить активные компоненты, ответственные за благотворное воздействие. Показано, что польза сои для здоровья обусловлена такими ее вторичными метаболитами, как изофлавоны, фитостеролы, лецитины, сапонины и др., в частности, отмечено, что изофлавоны, по-видимому, действуют в сочетании с белками, защищая от рака, сердечно-сосудистых заболеваний и остеопороза [6].

Все большее распространение получают новые прогрессивные методы исследования сои и соевых компонентов, например, лазерная микроскопия. Этот метод основан на способности химических веществ флуоресцировать при возбуждении лазером и может быть использован для визуализации расположения химических соединений в органах и тканях различных растений [7, 8]. Предыдущие микроскопические исследования сои

на основе автофлуоресценции были сосредоточены на визуализации таких анатомических особенностей, как трехмерная (3D) внутренняя структура семени [9] и анатомия листа *Glycine max* (L.) Merr. [10].

Хотя при изучении сои широко используют различные методы микроскопии, большинство из которых ориентированы только на оптическую микроскопию, специфическое окрашивание белков или полисахаридов и анализ сигналов специфических антител с флуоресцентной меткой [11, 12].

Поэтому была предпринята попытка изучения полифенольного состава сои методом автофлуоресценции, который позволяет визуально регистрировать локализацию полифенольных компонентов в семенах. Такой простой метод, как регистрация сигналов автофлуоресценции, сильно недооценен и может дать достаточно большой объем информации без сложной подготовки проб. Несмотря на недостаточность использования этого метода без поддержки данных, например, рамановской спектроскопии или MALDI-спектрометрии, он применим для более глубокого анализа семян сои с точки зрения классов присутствующих в растительной матрице соединений.

Предлагаемый метод перспективен для сбора предварительных данных и анализа большого количества сортовых образцов. Использование такого подхода может обеспечить экономию времени, ресурсов и реагентов, а также повышение уровня исследований в лабораториях, не имеющих более сложного оборудования. Такой подход, предусматривающий использование сразу двух новых прогрессивных методов, можно считать пионерными в России.

Цель исследования – детальный метаболомный анализ методом тандемной масс-спектрометрии сорта сои Локус (дополнительно подкреплен визуальными данными, впервые полученными методом лазерной микроскопии) для идентификации как полифенольного состава семян, так и определения других химических групп в составе семени.

Методика. В качестве объекта исследования использовали семена сорта сои Локус (оригинатор – Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное подразделение Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН) из коллекции ФГБНУ «ФНЦ агrobiотехнологий Дальнего Востока им. А. К. Чайки». Морфологическая, биометрическая и биохимическая характеристика сорта была составлена по результатам пятилетних исследований, учетов и наблюдений в условиях Приморского края. Сорт сои Локус индетерминантного типа роста, форма куста – раскидистая. Листья тройчатые овальной формы. Цветки

белой окраски, собранные в кисти по 6...15 шт. Окраска опушения – рыжая. Бобы темно-коричневые. Период вегетации сорта 108...111 дней, хозяйственная урожайность – 21,1...22,9 ц/га. Высота растения 50...86 см, прикрепления нижних бобов – 10,0...14,0 см, толщина стебля 0,5...0,7 см. Семена черные, среднего размера, овально-шаровидные, рубчик семени черного цвета. Масса 1000 семян 140...155 г.

Семена сорта сои Локус для исследований выращены в 2022 г. на полевом участке лаборатории селекции сои ФГБНУ «ФНЦ агробιοтехнологий Дальнего Востока им. А. К. Чайки», расположенном в п. Тимирязевский (вблизи г. Уссурийск). В 2022 г. складывались благоприятные условия для развития сои, при этом в отдельные декады с июня по сентябрь присутствовали избыточное увлажнение (сумма осадков за месяц превысила норму на 24,7...101,0 мм) и повышенный температурный фон, в сравнении с среднеголетними значениями. Большее количество выпавших осадков зафиксировано в третьей декаде июня – 78,8 мм (среднеголетнее 25,0 мм), второй декаде июля – 163,4 мм (среднеголетнее 38,0 мм), третьей декаде августа – 81,7 мм (среднеголетнее 45 мм). Благоприятное сочетание влаги и тепла способствовало формированию полноценных продуктивных завязей бобов, что позитивно отразилось на урожайности культуры.

Почва экспериментального участка – лугово-бурая отбеленная с тяжелым механическим составом, характеризовалась следующими агрохимическими показателями: рН солевой вытяжки – 6,2 (ГОСТ 26483-85), гидролитическая кислотность – 1,5 мг экв/кг почвы, N л.г. – 73,0 мг/кг почвы (ГОСТ Р 58596–2019), P₂O₅ – 89,0 мг/кг почвы и K₂O – 97,0 мг/кг почвы (ГОСТ Р 54650–2011), органическое вещество – 3,57% (ГОСТ 2623-91). Урожай убранный в фазе технической спелости семян. Семена хранили в морозильной камере при температуре –15 °С не более недели до начала экспериментов.

Для получения высококонцентрированных экстрактов проводили дробную мацерацию. Для анализа отбирали 50 г семян сои сорта Локус, при этом общее количество экстрагента (метилового спирта х.ч.) разделяли на 3 части и последовательно настаивали семена сои сначала с первой частью, затем со второй и третьей. Время экстрагирования каждой части представленной растительной матрицы составляло 7 дней [13]. Для идентификации в экстрактах целевых аналитов использовали высокоэффективную жидкостную хроматографию (ВЭЖХ) в комплексе с ионной ловушкой BRUKER DALTONIKS (тандемная масс-спектрометрия).

Для разделения многокомпонентных смесей использовали жидкостный хроматограф высокого давления Shimadzu LC-20 Prominence HPLC (Shimadzu, Япония), оборудованный UV-детектором и обратной фазной колонкой Shodex ODP-40 4E (250 × 4,6, размер частиц 4 мкм). Элюировали в градиенте от воды к ацетонитрилу (А, %): 0...4 мин – 0% А; 4...60 мин – 25% А; 60...75 мин – 100% А; 75...120 мин – 100% А, скорость потока 0,5 мл/мин. ВЭЖХ-анализ проводили на UV-VIS-детекторе SPD-20A (Kanda-Nishikicho 1-chrome, Shimadzu, Chiyoda-ku, Tokyo, Япония) при длинах волн 230 нм и 330 нм, температура 50 °С. Объем загрузочной петли составлял 200 мкл.

Масс-спектрометрические данные получали с использованием ионной ловушки amaZon SL (производство фирмы «BRUKER DALTONIKS», Германия), оснащенной источником ионизации электрораспылением ESI в режимах отрицательных и положительных ионов. Оптимизированные параметры получали следующим

образом: температура источника ионизации – 70 °С, поток газа – 4 л/мин, газ-небулайзер (распылитель) – 7,3 psi, капиллярное напряжение – 4500 V, напряжение на изгибе торцевой пластины – 1500 V, фрагментатор – 280 V, энергия столкновения – 60 eV. Масс-спектрометр использовали в диапазоне сканирования m/z 100–1.700 для MS и MS/MS. Проводили фрагментацию 4 порядка. Идентификацию химических компонентов осуществляли путем сравнения их индекса удерживания, масс-спектров и фрагментации MS с базой данных библиотеки, созданной Группой биотехнологий, биоинженерии и пищевых систем «Передовые инженерные школы» Дальневосточного федерального университета (Россия) на основе результатов таких спектроскопических методов, как ядерный магнитный резонанс, ультрафиолетовая спектроскопия и MS, а также путем сравнения экспериментальных данных с известными научными результатами, опубликованными в открытой научной литературе, которые постоянно обновляются и пересматриваются.

С использованием лазерного конфокального микроскопа CLSM 800 (Zeiss, Германия) определяли параметры автофлуоресценции среза семян. Выявлено 4 основных пика автофлуоресценции: при возбуждении УФ-лазером (405 нм) – максимумы излучения в диапазоне 410...450 нм, 495...550 нм и 570...610 нм; при возбуждении синим лазером (488 нм) – максимум излучения составляет 575...610 нм, что соответствует максимуму излучения антоцианов. Изображения были получены с использованием увеличения 10× и 20× и модуля Airyscan для увеличения разрешения.

Результаты и обсуждение. Наблюдение автофлуоресценции позволяет сделать выводы о наличии и локализации флуоресцентных веществ в тканях растений. Повышенный уровень сигнала флуоресценции на отдельных участках отражает основные места накопления соединений определенных классов. На изображениях срезов семян сои зеленое автофлуоресцентное излучение при УФ-возбуждении исходит от феруловой кислоты и лигнина [14]. Следует отметить, что в алейронах отсутствует лигнин, а в стенках алейроновых клеток присутствуют кумаровая и диферуловая кислоты, которые могут способствовать автофлуоресценции таких клеточных стенок [15].

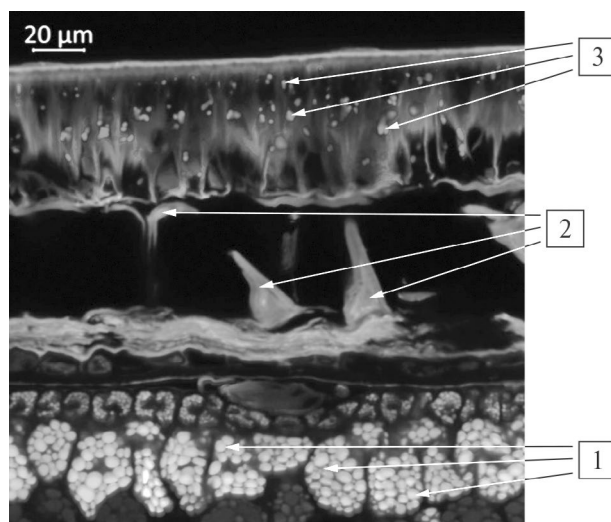


Рис. 1. Мультиспектральное изображение семян сои сорта Локус: возбуждение 405 нм, максимумы излучения в диапазонах 450...485 нм (1, синий цвет); 570...610 нм (2, зеленый цвет); возбуждение синим лазером (488 нм), максимум эмиссии 575...610 нм (3, красный цвет).

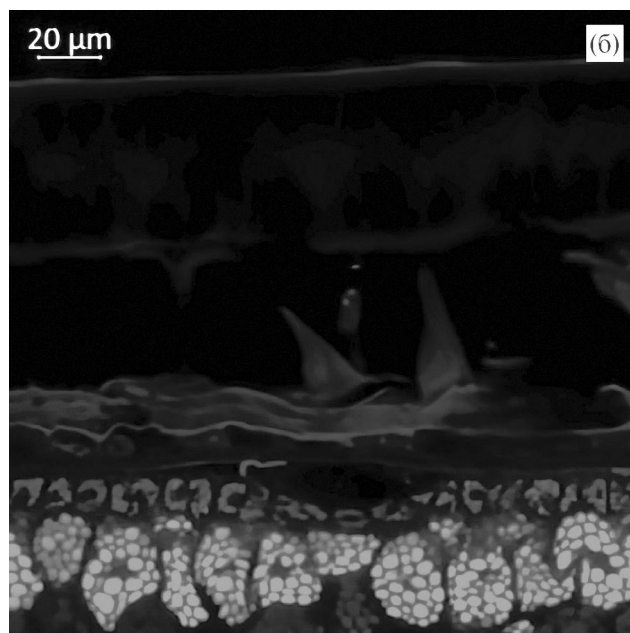
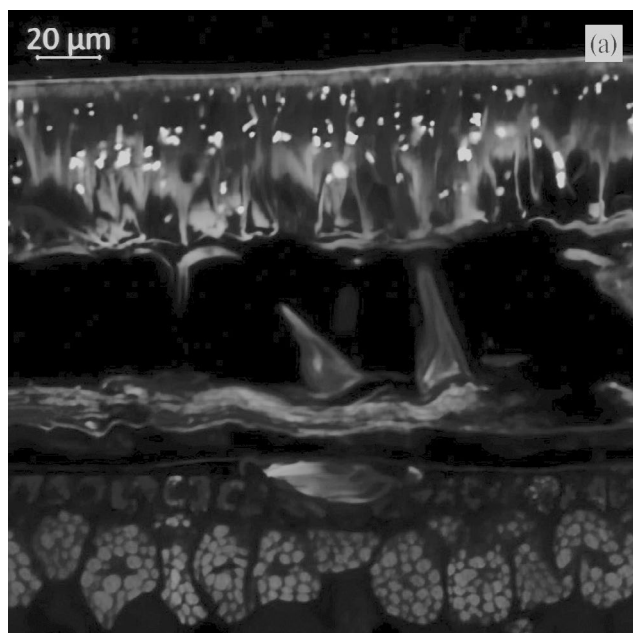


Рис. 2. Пространственное расположение антоцианов (а) и гидроксикоричных кислот (б) в семенах сои сорта Локус.

Неоднородность автофлуоресценции алейроновых клеточных стенок может быть дополнительно вызвана и другими веществами, например, кумаровой и диферуловой кислотами, обнаруженными в алейроновых клетках [16]. В технологии исследования семян метод автофлуоресцентной спектральной визуализации может применяться к флуоресцентным химическим соединениям, так называемым флуорофорам, играющим важную роль в биологии семян, включая пигменты (например, хлорофиллы) и такие структурные компоненты клеточной стенки, как лигнин [17, 18].

Когда флуоресцентные соединения стимулируются светом, они переводятся в возбужденное состояние в результате поглощения фотонов, а повторно излучаемый свет измеряется автофлуоресцентными спектральными датчиками изображения. Поглощение фотонов и испускание флуоресценции происходят одновременно [19, 20].

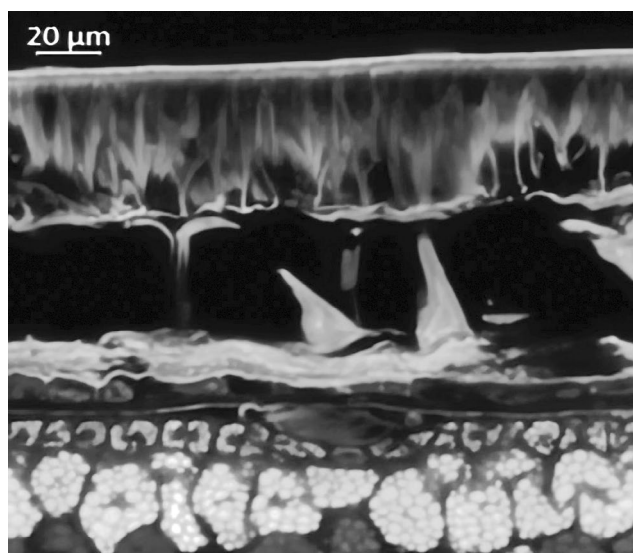


Рис. 3. Наличие и пространственное расположение полифенольной группы соединений в семенах сои сорта Локус.

На мультиспектральном изображении семян сои сорта Локус наблюдали три основных максимума автофлуоресценции: в синей (400...475 нм), зеленой (500...545 нм) и красной (620...700 нм) областях спектра (рис. 1).

По литературным данным, синяя флуоресценция у растений обусловлена в основном наличием фенольных гидроксикоричных кислот [21]. Главный флуоресцентный компонент – феруловая кислота, но вклад во флуоресценцию могут вносить и другие гидроксикоричные кислоты (например, п-кумаровая и кофейная) [22]. Кроме того, лигнин считают хорошо известным источником синей флуоресценции растений. Он имеет широкий диапазон излучения из-за присутствия в молекуле нескольких типов флуорофоров и может наблюдаться при возбуждении УФ- и видимым светом [18]. Результаты предыдущих исследований свидетельствуют о низком содержании лигнина в семенной оболочке бобовых [23], а также слабой лигнификации семядолей [24]. Таким образом, большая часть синей флуоресценции семян сои исходит от гидроксикоричных кислот.

В ходе исследования установлено наличие и пространственное расположение антоцианового содержания в семенах сои сорта Локус (красный цвет, рис. 2 а), и пространственное расположение гидроксикоричных кислот (синий цвет, рис. 2 б). Уровень сигнала красной флуоресценции хорошо коррелирует с цветом семян. Результаты микроскопических исследований свидетельствуют, что палисадный слой черносемянного сорта Локус имеет яркую красную флуоресценцию (см. рис. 1, рис 2 б). Ранее сообщалось, что черный цвет семенной кожуры бобовых – следствие большого количества антоцианов [25]. Это подтверждает, что ярко-красная флуоресценция вызвана именно перечисленными соединениями полифенольной группы.

Зеленая автофлуоресценция (рис. 3), индуцированная синим светом, в диапазоне 500...545 нм может быть объяснена присутствием флавонов, флавонолов, флаван-3-олов (апигенина, генистеина, лютеолина, изорамнетина, лютеолина, эпикатехина и др.) и их производных [26, 27].

Соединения, идентифицированные в экстракте семян сои *Glycine max* (L) Merr. (сорт Локуе)

Класс химического соединения	Идентификация	Ион-аддукт [M-H] ⁻	Ион-аддукт [M+H] ⁺	Фрагментирование МС/МС			Научный источник, использованный для уточнения идентификации
				1 порядка	2 порядка	3 порядка	
Полифенолы, флавоны							
Флавоноид	Daidzein [Daidzeol]		255	199; 137	181	153	соевые бобы [28]; черные соевые бобы [29]
Флавоноид	Apigenin		271	153	135		<i>Ribes meyeri</i> [30]; <i>Lonicera japonica</i> [31]
Флавоноид	Trihydroxy (iso)flavone		271	197	129		прополис [32]
Флавоноид	Genistein [Pruneton; Sophoricol]		271	254; 215; 153	210; 181; 133		черные соевые бобы [29]; Mexican lupine species [33]
Флавоноид	Acacetin [Linarigenin; Buddleoflavonol]		285	270; 225; 167	242; 152	213	Прополис [32]; Mexican lupine species [33]
Флавоноид	Glycitein		285	270; 229; 145	242	213; 168	черные соевые бобы [29]
Флавоноид	Cirsimaritin [Scrophulein]		315	300	272	229	<i>Artemisia annua</i> [34]; <i>Rosmarinus officinalis</i> [35]
Флавоноид	Daidzin [Daidzoid]		417	255	199; 137	181	черные соевые бобы [29]
Флавоноид	Apigenin-7-O-glucoside [Apigenin]	431		268	239; 132	211	Mexican lupine species [33]; <i>Grataegi Fructus</i> [36]
Флавоноид	Vitexin [Apigenin 8-C-Glucoside]	432		415; 271; 133	133		<i>Aspalathus linearis</i> [37]; <i>Lemon, Passion fruit</i> [38]
Флавоноид	Glycitin [Glycitein 7-O-glucoside]		447	285	270; 229; 145	242; 152	черные соевые бобы [29]; <i>Rhus coriaria</i> [39]
Флавоноид	Luteolin 7-O-glucoside [Cynaroside]		449	287	213	185	<i>Lonicera japonica</i> [31]
Флавоноид	Acetyl genistin		475	271	215; 153	197	черные соевые бобы [29]
Флавоноид	Genistein C-glucoside malonylated		519	271	215; 153	197	черные соевые бобы [29]; Mexican lupine species [33]
Флавоноид	Apigenin O-glucoside malonylated		519	271; 164	153		Mexican lupine species [33]
Флавоноид	Isorhamnetin	315		283	255	227	<i>Spondias purpurea</i> [40]
Флавоноид	Dihydrokaempferol-O-hexoside	449		287	259	215	<i>Rhus coriaria</i> [39]
Флавоноид	Quercetin 3-O-glucoside	463		301	271; 179	151	<i>Ribes meyeri</i> [30]; <i>Lonicera japonica</i> [31]; <i>Spondias purpurea</i> [40]
Флаван-3-ол	Epi-afzelechin [(epi) Afzelechin]		275	256	212	195	<i>A. cordifolia</i> ; <i>F. glaucescens</i> [41]
Флаван-3-ол	Catechin		291	207; 123	123		<i>Ribes meyeri</i> [30]; <i>Ribes magellanicum</i> [42]
Флаван-3-ол	(Epi)-catechin		291	273; 123	123		<i>C. edulis</i> [41]
Флаван-3-ол	(Epi)Gallocatechin	305		225; 287	163		<i>Ribes meyeri</i> [30]; <i>Ribes magellanicum</i> [42]
Тетрагидроксифлаванон	Aromadendrin 7-O-rhamnoside	433		313	285	257	<i>Zostera marina</i> [43]
Танин	Procyanidin A-type dimer		577	425; 245	245; 217	217; 189	grape juice [44]
Флавоноид	1,2,3,4,6-penta-O-galloyl-β-D-glucopyranoside		940	523; 455	421		<i>Rhodiola crenulata</i> [45]
Антоцианин	Cyanidin-3-O-glucoside [Cyanidin 3-O-beta-D-Glucoside]		449	287	213; 137	170	<i>Glycine soja</i> [28]; черные соевые бобы [29]; <i>Ribes magellanicum</i> [42]
Гидроксiben-зойная кислота	Protocatechuic acid		155	127			<i>Ribes meyeri</i> [30]; <i>Lonicera japonica</i> [31]
Метилбензойная кислота	Methylgallic acid		185	168; 143	122		<i>Lonicera caerulea</i> [46]
Фенольная кислота	Ethyl 3,4-Dihydroxycinnamate	207		179	135		<i>Lepechinia</i> [47]
Фенольная кислота	Caffeic acid-O-hexoside	341		179; 113	119		<i>Ribes magellanicum</i> [42]
Гидроксико-ричная кислота	Chlorogenic acid [3-O-Caffeoylquinic acid]	353		191	127		<i>Lonicera japonica</i> [31]; <i>Spondias purpurea</i> [40]; <i>Ribes magellanicum</i> [42]
Гидроксико-ричная кислота	Neochlorogenic acid [5-O-Caffeoylquinic acid]	353		191	173	126	<i>Lonicera japonica</i> [31]; <i>Ribes magellanicum</i> [42]
Фенольная кислота	Caffeic acid derivative	377		341; 215	179; 143		<i>Embelia</i> [48]
Кумарин	Tomentin		223	208	180	165	<i>Jatropha</i> [49]
Лигнан	Syringaresinol		419	326; 285; 246; 216	298; 282; 254; 218	252; 226; 208	<i>Magnolia</i> [50]
Соединения других химических групп							
Циклогексенкарбоновая кислота	Shikimic acid [L-Schikimic acid]		175	157	112		соевые бобы [28]; <i>Ribes meyeri</i> [30]; <i>A. cordifolia</i> [41]
Ароматическая аминокислота	Tyrosine		182	154	127		листья сои [51]; <i>Vigna unguiculata</i> [52]; <i>Euphorbia hirta</i> [53]
Незаменимая аминокислота	L-Tryptophan		205	188	146	118	<i>Vigna unguiculata</i> [52]; <i>Euphorbia hirta</i> [53]; <i>Rosa acicularis</i> [54]
Органическая кислота	Glucoheptonic acid [Glucate]		227	161	145	127	листья сои [51]
Карбоновая кислота	Myristoleic acid [Cis-9-Tetradecanoic acid]		227	209; 165	121		<i>F. glaucescens</i> [41]; <i>Maackia amurensis</i> [55]

Таблица (продолжение)

Класс химического соединения	Идентификация	Ион-аддукт [M-H] ⁻	Ион-аддукт [M+H] ⁺	Фрагментирование МС/МС			Научный источник, использованный для уточнения идентификации
				1 порядка	2 порядка	3 порядка	
Пуриновый нуклеозид	Inosine		269	136			<i>Lonicera japonica</i> [31]
Рибонуклеозидный композит аденина (пурина)	Adenosine		268	136	112		<i>Lonicera japonica</i> [31]; <i>Rosa acicularis</i> [54]
Омега-3-жирные кислоты	Linolenic acid (Alpha-Linolenic acid)		279	261	219	163	<i>Jatropha</i> [49]; <i>Maackia amurensis</i> [55]
Оксипирины	11-Hydroperoxy-octadecatrienoic acid		311	182	165	147	листья картофеля [56]
Оксипирины	13-Trihydroxy-Octadecenoic acid [THODE]	329		291; 171	247	245; 122	<i>Jatropha</i> [49]
Глицерил пальмитат	Monopalmitin		331	314; 152	152	134	соевые бобы [28]
Сахар	Fructose 1,6-bisphosphate		337	190	123		соевые бобы [28]; листья сои [51]
Сахар	Fructose 2,6-bisphosphate		341	273; 209; 129	128		соевые бобы [28]; листья сои [51]
Сахар	Sucrose	341		179; 113	119		соевые бобы [28]; <i>Artemisia annua</i> [34]; листья сои [51]
Нафтохинон	8,8'-Dihydroxy-2,2'-binaphthalene-1,1',4,4'-tetrone		347	319; 219	291; 219	261; 191	<i>Juglans mandshurica</i> [57]
Сахар	Trehalose (+FA adduct) CH ₂ O ₂	387		341	178	113	Pubchem
Стероид	Vebronol		453	435; 210	226; 336	210	<i>Rhus coriaria</i> [39]; <i>Hyloserius polyrhizus</i> [58]
Сапонин	Soyasapogenol A		475	459	177; 221; 309; 371	133	Pubchem
Сахар	Maltotriose [Amylotriose]		505	487; 441; 385; 235	440; 385; 235; 191	382; 277; 209; 147	листья сои [51]
Индолсесквитерпеновый алкалоид	Sespendole		520	184	125		<i>Rhus coriaria</i> [39]
Сапонин	Chikusetsusaponin Iva		796	597; 439; 245	421; 365; 245	403; 308; 271	<i>Bougainvillea</i> [59]; <i>Leguminous</i> [60]
Сапонин	Soyasaponin Bb' [Soyasaponin III]		797	598; 423; 229	581; 423	537; 405; 281; 170	черные соевые бобы [21]
Сапонин	Soyasaponin I [Soyasaponin Bb]		944	423; 295	354; 203; 121		черные соевые бобы [21]; <i>Leguminous</i> [53]
Сапонин	Soyasaponin Beta g		1069	507; 415; 331; 299	331; 299	185	черные соевые бобы [21]; <i>Leguminous</i> [53]

Метод тандемной масс-спектрометрии использован для идентификации вторичных метаболитов полифенольной группы в семенах сои, присутствие которых отражено на снимках лазерной микроскопии (см. рис. 1–3). Уточнение метаболомного состава – чрезвычайно важный аспект биохимического анализа. В результате масс-спектрометрического исследования предварительно выделено 59 химических соединений, присутствующих в сое сорта Локус, из них 35 соединений представляли собой соединения полифенольной группы, 15 химических соединений были идентифицированы в сое сорта Локус впервые. Это флавоны (апигенин, акацетин, цирсимаритин, витексин); тетрагидрооксифлавоны (аромадендрин

7-О-рамнозид, лигнан медиоресинол, кумарин томентин, дигидрокемпферол гексозид, метилгалловая кислота, моноальмитин, линоленовая кислота и др. (см. табл.).

С использованием тандемной масс-спектрометрии в режиме положительных ионов в экстракте из семян сои сорта Локус был идентифицирован глицерил пальмитата моноальмитина (рис. 4). На масс-спектре видно, что [M+H]⁺ ион продуцирует два фрагментированных иона, *m/z* 314.19 и *m/z* 152.17. Фрагментированный ион *m/z* 314.19 формирует один характерный дочерний ион (*m/z* 152.19). Далее дочерний ион *m/z* 152.19 формирует ион четвертой фрагментации *m/z* 134.18. В статье, посвященной рассмотрению подобных масс-спектров семян

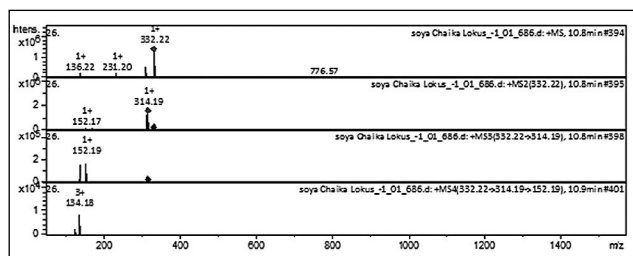


Рис. 4. Масс-спектр соединения моноальмитина, полученный из экстракта семян сои сорта Локус (верхняя линия – МС-скан в диапазоне 100...1700 *m/z*, далее – спектры фрагментации (сверху вниз): МС2 протонированного иона моноальмитина (332,22 *m/z*), МС3 фрагмента 332,22→314,19 *m/z* и МС4 фрагмента 332,22→314,19→152,19).

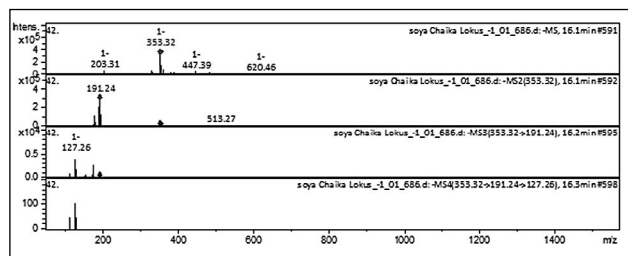


Рис. 5. Масс-спектр соединения хлорогеновой кислоты, полученный из экстракта семян сои сорта Локус (верхняя линия – МС-скан в диапазоне 100...1700 *m/z*, далее спектры фрагментации (сверху вниз): МС2 протонированного иона хлорогеновой кислоты (353,32 *m/z*), МС3 фрагмента 353,32→191,24 *m/z* и МС4 фрагмента 353,32→191,24→127,26).

сои это соединение классифицировали как глицерил пальмитат монопальмитин [28].

В масс-спектре, полученном в режиме отрицательных ионов (рис. 5), показано, что [M-H]⁻ ион продуцирует один фрагментированный ион, m/z 191.24. Фрагментированный ион m/z 191.24 формирует характерный дочерний ион: m/z 127.26. В литературе это соединение определяют, как хлорогеновая кислота: *Lonicera japonica* [31]; *Spondias purpurea* [40]; *Ribes magellanicum* [42].

Еще в одном масс-спектре, полученном в режиме отрицательных ионов, из экстракта семян сои сорта Локус, установлено, что [M+H]⁺ ион продуцирует один фрагментированный ион, m/z 287.14 (рис. 6). Фрагментированный ион m/z 191.24 формирует два дочерних иона: m/z 213.05 и m/z 137.15. Далее представлена фрагментация четвертого порядка: дочерний ион m/z 170.96. В литературе это соединение идентифицируют,

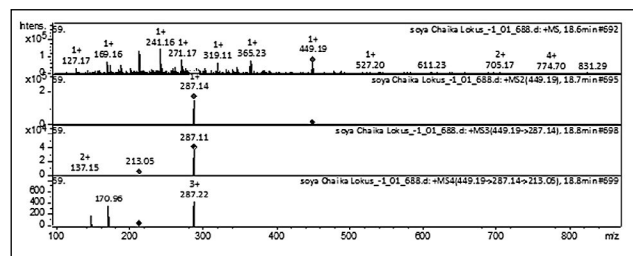


Рис. 6. Масс-спектр соединения цианидина 3-О-глюкозида, полученный из экстракта семян сои сорта Локус (верхняя линия – MS-скан в диапазоне 100...1700 m/z , далее спектры фрагментации (сверху вниз): МС2 протонированного иона цианидина 3-О-глюкозида (449,19 m/z), МС3 фрагмента 449,19→287,14 m/z и МС4 фрагмента 449,19→287,14→213,05).

как цианидин 3-О-глюкозид: *Glycine soja* [28]; черные соевые бобы [29]; *Ribes magellanicum* [42].

Выводы. Данные, полученные методом лазерной микроскопии, свидетельствуют о богатом присутствии соединений полифенольного комплекса в семенах сои сорта Локус. Результаты исследования свидетельствуют, что фенольные соединения сои преимущественно расположены преимущественно в семенной кожуре и наружном слое семядолей. Антоцианов особенно много в палисадном слое. Эта информация может быть полезна для быстрой оценки сортов в селекции, особенно при ее проведении в отношении таких соединений.

В мацерационных экстрактах семян сои сорта Локус было идентифицировано 35 соединений полифенольной группы, многие из которых характерны для вида *Glycine max* (L) Merr, в том числе 15 полифенольных соединений идентифицированы в растениях этого вида впервые – флавоны апигенин, акацетин, цирсимаритин; тетрагидроксифлавоны арамадендрин 7-О-рамнозид; флавонолы изорамнетин, гексозид дигидрокемпферола, лигнан медиоресинол; флаван-3-олы эпиафзелехин, катехин, эпикатехин, кумарин томентин и др.

Полученные данные могут интенсифицировать будущие исследования по разработке и производству различных продуктов функционального питания, содержащих целевые экстракты *Glycine max* (L) Merr.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках достижения результатов федерального проекта «Передовые инженерные школы», Соглашение № 075–15–2022–1143 от 07.07.2022.

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. Создание высокопродуктивного сорта сои классическими методами селекции / В. В. Толоконников, Т. С. Кошкарова, Г. О. Чамурлиев и др. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 2 (62). С. 87–93. doi 10.32786/2071–9485–2021–02–09.
2. Синеговская В. Т., Фокина Е. М. Селекция сои как инструмент решения задач импортозамещения в Дальневосточном федеральном округе // Труды Кубан. гос. аграр. ун-та. 2018. Вып. 172. С. 328–331. doi: 10.21515/1999-1703-72-328-331.
3. Синеговский М. О. Перспективы производства сои в Дальневосточном федеральном округе // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2020. Вып. 1. С. 13–16. doi: 10.30850/vrsn/2020/1/13-16.
4. Бутовец Е. С., Страшненко Т. Н. Изучение сортов сои дальневосточной селекции в условиях Приморского края // Аграрный вестник Приморья. 2020. Вып. 13 (19). С. 10–13.
5. Genome-wide association mapping for seed protein and oil contents using a large panel of soybean accessions / D. Li, X. Zhao, Y. Han, et al. // Genomics. 2019. Vol. 111. No. 1. P. 90–95. doi: 10.1016/j.ygeno.2018.01.004.
6. Soybean constituents and their functional benefits / A. K. Dixit, J. Antony, N. K. Sharma, et al. // Research Singpost. 2011. Vol. 37. No. 2. P. 367–383.
7. Tissue localization of phenolic compounds in plants by confocal laser scanning microscopy / P. Hutzler, R. Fischbach, W. Heller, et al. // J. Exp. Bot. 1998. Vol. 49. P. 953–965.
8. Spatial Distribution of Polyphenolic Compounds in Corn Grains (*Zea mays* L. var. Pioneer) Studied by Laser Confocal Microscopy and High-Resolution Mass Spectrometry / M. Razgonova, Y. Zinchenko, K. Pikula, et al. // Plants. 2022. Vol. 11. Article 630. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/5/630> (дата обращения: 02.12.2023).
9. Three-dimensional internal structure of a soybean seed by observation of autofluorescence of sequential sections / Y. Ogawa, K. Miyashita, H. Shimizu, et al. // J. Jpn. Soc. Food Sci. Technol. 2003. Vol. 50. P. 213–217.
10. Pegg T. J., Gladish D. K., Baker R. L. Algae to angiosperms: Autofluorescence for rapid visualization of plant anatomy among diverse taxa // Appl. Plant Sci. 2021. Vol. 9. Article e11437. URL: <https://bsapubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/aps3.11437> (дата обращения: 02.12.2023).
11. Systemic Uptake of Fluorescent Tracers by Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) Seed and Seedlings / Z. Wang, M. Amirkhani, S.A.G. Avelar, et al. // Agriculture. 2020. Vol. 10. Article 248. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/6/248> (дата обращения: 02.12.2023).
12. Krishnan H.B., Jurkevich A. Confocal Fluorescence Microscopy Investigation for the Existence of Subdomains within Protein Storage Vacuoles in Soybean Cotyledons // Int. J. Mol. Sci. 2022. Vol. 23. Article 3664. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/23/7/3664> (дата обращения: 02.12.2023).

13. Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review / J. Azmir, I.S.M. Zaidul, M. M. Rahman, et al. // *J. Food Eng.* 2013. Vol. 117. P. 426–436.
14. Rudall P. J., Caddick L. R. Investigation of the presence of phenolic compounds in monocotyledonous cell walls, using UV fluorescence microscopy // *Annals of Botany.* 1994. Vol. 74. P. 483–491.
15. Endosperm structure affects the malting quality of barley (*Hordeum vulgare* L.) / U.R.M. Holopainen, A. Wilhelmson, M. Salmenkallio-Marttila, et al. // *J. Agric. Food Chemistry.* 2005. Vol. 53. P. 7279–7287.
16. Hydroxycinnamic acids and ferulic acid dehydromers in barley and processed barley / D. Hernanz, V. Nunez, A. I. Sancho, et al. // *J. Agric. Food Chemistry.* 2001. Vol. 49. No. 10. P. 4884–4888.
17. Goggin D. E., Steadman K. J. Blue and green are frequently seen: responses of seeds to short- and mid-wave length light // *Seed Science Research.* 2011. Vol. 22. No. 1. P. 27–35.
18. Donaldson L. Autofluorescence in Plants // *Molecules.* 2020. Vol. 25. Article 2393. URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/25/10/2393> (дата обращения: 02.12.2023).
19. Frequency-upconverted stimulated emission by simultaneous five-photon absorption / Q. Zheng, H. Zhu, S.-C. Chen, et al. // *Nature Photonics.* 2013. Vol. 7. P. 234–239.
20. Frequency-upconverted stimulated emission by simultaneous five-photon absorption / C.B. da Silva, N. M. Oliveira, M. E. Amaral de Carvalho, et al. // *Nature Photonics.* 2013. Vol. 7. P. 234–239.
21. Identification of tissular origin of particles based on autofluorescence multispectral image analysis at the macroscopic scale / M. Corcel, M.-F. Devaux, F. Guillon, et al. // *EPJ Web of Conferences. Powders & Grains 2017.* Vol. 140 Article 05012. URL: <https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2017/09/epjconf162551.pdf>. (дата обращения: 02.12.2023).
22. Lichtenthaler H. K., Schweiger J. Cell wall bound ferulic acid, the major substance of the blue-green fluorescence emission of plants // *J. Plant Physiol.* 1998. Vol. 152. P. 272–282. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0176161798801429> (дата обращения: 02.12.2023).
23. Brillouet J. M., Riochet D. Cell wall polysaccharides and lignin in cotyledons and hulls of seeds from various lupin (*Lupinus* L.) species // *J. Sci. Food Agric.* 1983. Vol. 34. P. 861–868.
24. Evaluation of lignin content of soybean seed coat stored in a controlled environment / F. C. Krzyzanowski, J.D.B. Franca Neto, J.M. . Mandarino, et al. // *Rev. Bras. De Sementes.* 2008. Vol. 30. P. 220–223. URL: <https://www.scielo.br/j/rbs/a/FzBZzk6xD6VCKDmbW CyTXmF/?lang=en> (дата обращения: 02.12.2023).
25. Genetic diversity of soybeans (*Glycine max* (L.) merr.) with black seed coats and green cotyledons in Korean germplasm / H. Jo, J. Y. Lee, H. Cho, et al. // *Agronomy.* 2021. Vol. 11. Article 581. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/3/581> (дата обращения: 02.12.2023).
26. O. Monago-Marana, I. Duran-Meras, T. Galeano-Diaz, et al. Fluorescence properties of flavonoid compounds. Quantification in paprika samples using spectrofluorimetry coupled to second order chemometric tools // *Food Chem.* 2016. Vol. 196. P. 1058–1065.
27. Roshchina V. V., Kuchin A. V., Yashin V. A. Application of Autofluorescence for Analysis of Medicinal Plants // *Spectrosc. Int. J.* 2017. Article 7159609. URL: <https://downloads.hindawi.com/archive/2017/7159609.pdf> (дата обращения: 02.12.2023).
28. Photosynthetic characteristics and metabolic analyses of two soybean genotypes revealed adaptive strategies to low-nitrogen stress / M. Li, J. Xu, X. Wang, et al. // *J. Plant Physiol.* 2018. Vol. 229. P. 132–141.
29. Differences in the metabolic profiles and antioxidant activities of wild and cultivated black soybeans evaluated by correlation analysis / J. L. Xu, J.-S. Shin, S.-K. Park, et al. // *Food Res. Int.* 2017. Vol. 100. P. 166–174.
30. Rapid qualitative profiling and quantitative analysis of phenolics in *Ribes meyeri* leaves and their antioxidant and antidiabetic activities by HPLC-QTOF-MS/MS and UHPLC-MS/MS / Y. Zhao, H. Lu, Q. Wang, et al. // *J. Sep. Sci.* 2021. Vol. 44. P. 1404–1420.
31. Comparison of Multiple Bioactive Constituents in the Flower and the Caulis of *Lonicera japonica* Based on UFLC-QTRAP-MS/MS Combined with Multivariate Statistical Analysis / Z. Cai, C. Wang, L. Zou, et al. // *Molecules.* 2019. Vol. 24. Article 1936. URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/24/10/1936> (дата обращения: 02.12.2023).
32. Synergistic interaction between propolis extract, essential oils, and antibiotics against *Staphylococcus epidermidis* and methicillin resistant *Staphylococcus aureus* / O. Belmehdi, A. Bouyahya, J. Jeko, et al. // *Int. J. Second Metab.* 2021. Vol. 8. No. 3. P. 195–213.
33. Structural analysis and profiling of phenolic secondary metabolites of Mexican lupine species using LC-MS techniques / A. Wojakowska, A. Piasecka, P. M. Garcia-Lopez, et al. // *Phytochem.* 2013. Vol. 92. P. 71–86.
34. Unveiling the Phytochemical Profile and Biological Potential of Five *Artemisia* Species / A. Trifan, G. Zengin, K. I. Sinan, et al. // *Antioxidants.* 2022. Vol. 11. Article 1017. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3921/11/5/1017> (дата обращения: 02.12.2023).
35. Phytochemical Profiling of Flavonoids, Phenolic Acids, Terpenoids, and Volatile Fraction of a Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) Extract / P. Mena, M. Cirlini, M. Tassotti, et al. // *Molecules.* 2016. Vol. 21. Article 1576. URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/21/11/1576> (дата обращения: 02.12.2023).
36. The Yin-Yang Property of Chinese Medicinal Herbs Relates to Chemical Composition but Not Anti-Oxidative Activity: An Illustration Using Spleen-Meridian Herbs / Y. Huang, P. Yao, K. W. Leung, et al. // *Frontiers in Pharmacology.* 2018. Vol. 9. Article 1304. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/pharmacology/articles/10.3389/fphar.2018.01304/full> (дата обращения: 02.12.2023).
37. Chemical Fingerprinting Profile and Targeted Quantitative Analysis of Phenolic Compounds from Rooibos Tea (*Aspalathus linearis*) and Dietary Supplements Using UHPLC-PDA-MS / O. I. Fantoukh, Y.-H. Wang, A. Parveen, et al. // *Separations.* 2022. Vol. 9. Article 159. URL: <https://www.mdpi.com/2297-8739/9/7/159> (дата обращения: 02.12.2023).
38. Spinola V., Pinto J., Castilho P. C. Identification and quantification of phenolic compounds of selected fruits from Madeira Island by HPLC-DAD-ESI-MSn and screening for their antioxidant activity // *Food Chem.* 2015. Vol. 173. P. 14–30.
39. HPLC-DAD-ESI-MS/MS screening of bioactive components from *Rhus coriaria* L. (Sumac) fruits /

- I. M. Abu-Reidah, M. S. Ali-Shtayeh, R. M. Jamous, et al. // *Food Chem.* 2015. Vol. 166. P. 179–191.
40. Characterization of phenolic compounds in jocote (*Spondias purpurea* L.) peels by ultra-high-performance liquid chromatography/electrospray ionization mass spectrometry / C. Engels, D. Grater, P. Esquivel, et al. // *Food Res. Int.* 2012. Vol. 46. P. 557–562.
41. Identification of Chemopreventive Components from Halophytes Belonging to Aizoaceae and Cactaceae Through LC/MS – Bioassay Guided Approach / A. R. Hamed, S. S. El-Hawary, R. M. Ibrahim, et al. // *J. Chrom. Sci.* 2021. Vol. 59. No. 7. P. 618–626.
42. Colonic fermentation of polyphenols from Chilean currants (*Ribes spp.*) and its effect on antioxidant capacity and metabolic syndrome-associated enzymes / A. Burgos-Edwards, F. Jimenez-Aspee, C. Theoduloz, et al. // *Food Chem.* 2018. Vol. 258. P. 144–155.
43. *Zostera marina* L. Supercritical CO₂-Extraction and Mass Spectrometric Characterization of Chemical Constituents Recovered from Seagrass / M. P. Razgonova, L. A. Tekutyeva, A. B. Podvolotskaya, et al. // *Separations.* 2022. Vol. 9. Article 182. URL: <https://www.mdpi.com/2297-8739/9/7/182> (дата обращения: 02.12.2023).
44. Low Molecular Weight Phenolics of Grape Juice and Winemaking Byproducts: Antioxidant Activities and Inhibition of Oxidation of Human Low-Density Lipoprotein Cholesterol and DNA Strand Breakage / A. Costa de Camargo, M.A.B. Regitano-d'Arce, A. C. Telles Biasoto, et al. // *Agric. Food Chem.* 2014. Vol. 62. P. 12159–12171. doi: 10.1021/jf504185s.
45. A rapid and sensitive UHPLC-FT-ICR MS/MS method for identification of chemical constituents in *Rhodiola crenulata* extract, rat plasma and rat brain after oral administration / F. Han, Y. Li, L. Ma, et al. // *Talanta.* 2016. Vol. 160. P. 183–193.
46. The Global metabolome profiles of four varieties of *Lonicera caerulea*, established via tandem mass spectrometry / M. P. Razgonova, M. A. Navaz, A. S. Sabitov, et al. // *Horticulturae.* 2023. Vol. 9. Article 1188. URL: <https://www.mdpi.com/2311-7524/9/11/1188> (дата обращения: 02.12.2023).
47. Serrano C. A., Villena G. K., Rodrigues E. F. Phytochemical profile and rosmarinic acid purification from two Peruvian *Lepedinia* Willd. species (*Salviinae*, *Menthae*, *Lamiaceae*) // *Scientific Report.* 2021. Vol. 11. Article 7260. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-86692-3> (дата обращения: 02.12.2023).
48. Vijayan K. P. R., Raghu A. V. Tentative characterization of phenolic compounds in three species of the genus *Embelia* by liquid chromatography coupled with mass spectrometry analysis // *Spectroscopy Letters.* 2019. Vol. 52. No. 10. P. 653–670.
49. Chemical composition and biological properties of two *Jatropha* species: Different parts and different extraction methods / G. Zengin, M. F. Mahomoodally, K. I. Sinan, et al. // *Antioxidants.* 2021. Vol. 10. Article 792. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3921/10/5/792> (дата обращения: 02.12.2023).
50. Identification of minor lignans, alkaloids, and phenylpropanoid glycosides in *Magnolia officinalis* by HPLC-DAD-QTOF-MS/MS / K. Guo, C. Tong, Q. Fu, et al. // *J. Pharmaceut. Biomed. Anal.* 2019. Vol. 170. P. 153–160.
51. Physiological and metabolomics analyses of young and old leaves from wild and cultivated soybean seedlings under low nitrogen conditions / Y. Liu, M. Li, J. Xu, et al. // *BMC Plant Biology.* 2019. Vol. 19. Article 389. URL: <https://bmcplantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-019-2005-6> (дата обращения: 02.12.2023).
52. Composition of Primary and Secondary Metabolite Compounds in Seeds and Pods of Asparagus Bean (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) from China / I. Perchuk, T. Shelenga, M. Gurkina, et al. // *Molecules.* 2020. Vol. 25. Article 3778. URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/25/17/3778> (дата обращения: 02.12.2023).
53. Phenolic compounds profile of water and ethanol extracts of *Euphorbia hirta* L. leaves showing antioxidant and antifungal properties / P. N. Mekom, S. Martini, J. Nguefack, et al. // *South African J. of Botany.* 2019. Vol. 127. P. 319–332.
54. *Rosa davurica* Pall., *Rosa rugosa* Thumb., and *Rosa acicularis* Lindl. originating from Far Eastern Russia: Screening of 146 Chemical Constituents in Tree Species of the Genus *Rosa* / M. P. Razgonova, B. B. Bazhenova, Y. Y. Zabalueva, et al. // *Applied Sci.* 2022. Vol. 12. Article 9401. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/19/9401> (дата обращения: 02.12.2023).
55. *Maackia amurensis* Rupr. et Maxim.: Supercritical CO₂-extraction and Mass Spectrometric Characterization of Chemical Constituents / M. P. Razgonova, E. I. Cherevach, L. A. Tekutyeva, et al. // *Molecules.* 2023. Vol. 28. Article 2026. URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/28/5/2026> (дата обращения: 02.12.2023).
56. Comprehensive metabolite profiling of *Solanum tuberosum* L. (potato) leaves T by HPLC-ESI-QTOF-MS / C. Rodriguez-Perez, A. M. Gomez-Caravaca, E. Guerra-Hernandez, et al. // *Molecules.* 2018. Vol. 112. P. 390–399.
57. Identification and characterization of major constituents in *Juglans mandshurica* using ultra performance liquid chromatography coupled with time-of-flight mass spectrometry (UPLC-ESI-Q-TOF/MS) / J.-H. Huo, X.-W. Du, G.-D. Sun, et al. // *Chinese J. Nat. Medic.* 2018. Vol. 16. No. 7. P. 0525–0545.
58. Metabolic Profiling of *Pitaya* (*Hylocereus polyrhizus*) during Fruit Development and Maturation / Y. Wu, J. Hu, Y. He, et al. // *Molecules.* 2019. Vol. 24. Article 1114. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6470951/> (дата обращения: 02.12.2023).
59. UPLC-ESI-MS/MS Profile of The Ethyl Acetate Fraction of Aerial Parts of *Bougainvillea 'Scarlett O'Hara'* Cultivated in Egypt / M. A. El-Sayed, F. A. Abbas, S. Refaat, et al. // *Egyptian J. of Chem.* 2020. Vol. 64. No. 2. Article 22. URL: <https://ejchem.journals.ekb.eg/article/120457.html> (дата обращения: 02.12.2023).
60. Rapid characterisation and comparison of saponin profiles in the seeds of Korean Leguminous species using ultra performance liquid chromatography with photodiode array detector and electrospray ionisation/mass spectrometry (UPLC-PDA-ESI/MS) analysis / T. J. Ha, B. W. Lee, K. H. Park, et al. // *Food Chem.* 2014. Vol. 146. P. 270–277.

Поступила в редакцию 13.12.2023
 После доработки 17.01.2024
 Принята к публикации 28.03.2024

ГЕНЕТИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ ЯРОВОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ РОССИЙСКОЙ И КАЗАХСТАНСКОЙ СЕЛЕКЦИИ ПО УСТОЙЧИВОСТИ К БУРОЙ И ЖЕЛТОЙ РЖАВЧИНАМ

Е. И. Гультяева, доктор биологических наук, **Е. Л. Шайдаюк**, кандидат биологических наук, **В. В. Веселова**, **М. М. Левитин**, доктор биологических наук, академик РАН

*Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений,
196608, Санкт-Петербург-Пушкин, ш. Подбельского, 3
E-mail: eigulyaeva@gmail.com*

Исследования проводили с целью характеристики устойчивости к бурой и желтой ржавчинам у перспективных образцов яровой мягкой пшеницы и оценки их разнообразия по Lr и Yr генам устойчивости для выявления ценных генотипов. Материал для исследования включал 36 новых сортов и линий (23 российской и 13 казахстанской селекции). В лабораторных условиях проводили оценку ювенильной устойчивости с использованием тест-клонов и популяций, различающихся по вирулентности. Резистентность к бурой ржавчине в фазе проростков характеризовались 42 % образцов. С использованием специфических ПЦР-маркеров была проведена идентификация 20 Lr-генов. Положительными контролями служили изогенные линии Thatcher с идентифицируемыми генами. У яровых образцов выявлены высокоэффективные в России и Казахстане гены Lr24 (3 образца), LrAgi2 (3), частично утратившие эффективность гены Lr9 (4), Lr19 (6), неэффективные гены Lr1 (7), Lr3 (13), Lr10 (4), Lr26 (12) и Lr34 (4) и пшенично-ржаная транслокация 1AL.1RS (4) с генами устойчивости к бурой, стеблевой и желтой ржавчинам. Устойчивые образцы несли по два и более Lr-генов. По результатам фитопатологического тестирования высокоустойчивых образцов ко всем изученным региональным популяциям возбудителя желтой ржавчины не выявлено. При использовании молекулярных маркеров не обнаружено образцов с высокоэффективными генами Yr5, Yr10, Yr15, Yr17, Yr24. Малоэффективные гены Yr9 и Yr18 идентифицированы у 30 % и 8 % линий соответственно. Результаты проведенного анализа свидетельствуют об успехах в селекции на устойчивость к бурой ржавчине и необходимость опережающей селекции на устойчивость к желтой ржавчине с привлечением эффективных доноров.

GENETIC DIVERSITY OF PROMISING ACCESSIONS OF SPRING SOFT WHEAT OF RUSSIAN AND KAZAKH BREEDING FOR RESISTANCE TO LEAF AND YELLOW RUST

E. I. Gulyaeva, E. L. Shaydayuk, V. V. Veselova, M. M. Levitin

*All Russian Institute of Plant Protection,
196608, Cankt-Peterburg-Pushkin, sh. Podbelskogo, 3
E-mail: eigulyaeva@gmail.com*

The study was carried out to characterize the resistance to leaf and yellow rust in promising spring common wheat accessions and to assess their diversity by Lr and Yr resistance genes for searching of promising genotypes. The material included 36 new varieties and lines, 23 of them of Russian and 13 of Kazakh breeding. Juvenile resistance to leaf and yellow rust was evaluated in the laboratory using test-clones and populations differing in virulence. Resistance to leaf rust at the seedling stage was characterized by 42 % of the accessions. 20 Lr genes were identified using specific PCR markers. Thatcher isogenic lines with identifiable genes served as positive controls. Highly effective genes Lr24 (3 accessions), LrAgi2 (3), partially effective genes Lr9 (4), Lr19 (6), ineffective genes Lr1 (7), Lr3 (13), Lr10 (4), Lr26 (12) and Lr34 (4), and wheat-rye translocation 1AL.1RS with genes of resistance to leaf, stem and yellow rust were identified in spring accessions. Resistant accessions carried two or more Lr genes. According to phytopathological analysis, no highly resistant samples to all used regional populations of the yellow rust pathogen were found. When using molecular markers, no samples with highly effective genes Yr5, Yr10, Yr15, Yr17, Yr24 were detected. Ineffective Lr9 and Yr18 genes were identified in 30 % and 8 % of the lines, respectively. The analysis indicates success in breeding for resistance to leaf rust and the need for advanced breeding for resistance to yellow rust with the involvement of genetically diverse donors.

Ключевые слова: *Triticum aestivum, Puccinia triticina, Puccinia striiformis, Lr-гены, Yr-гены.*

Key words: *Triticum aestivum, Puccinia triticina, Puccinia striiformis, Lr genes, Yr genes.*

Расширение генетического разнообразия мягкой пшеницы по устойчивости к ржавчинным болезням – актуальная задача современной селекции. Бурая ржавчина (*Puccinia triticina* Erikss.) – наиболее распространенное заболевание. Оно встречается во всех зонах возделывания культуры. Желтая ржавчина (*P. striiformis* West.) относится к группе болезней, имеющих региональное значение в годы с прохладным и влажным климатом. С 2000 г. во всем мире отмечено расширение ареала вредоносности *P. striiformis* и относительное снижение значимости *P. triticina*. Обусловлено это адаптацией возбудителя желтой ржавчины к высоким температурам. Заболевание стало приобретать значимость в тех регионах, где ранее его не наблюдали [1, 2].

Генетическая защита – экологически безопасный метод борьбы с ржавчинными болезнями. Ее эффективность предопределяет разнообразие возделываемых сортов по типам и генам устойчивости. Интенсивную селекцию на устойчивость к бурой ржавчине в России проводят с середины прошлого века. За этот период достигнуты определенные успехи. Многие новые сорта, включенные в Государственный реестр селекционных достижений, характеризуются устойчивостью к *P. triticina* [3, 4]. Селекцию на устойчивость к желтой ржавчине традиционно проводят на Северном Кавказе, где заболевание имеет экономическую значимость [3]. В последние годы развитие болезни стали отмечать и в других регионах РФ, например, в Северо-Западном

и Центрально-Черноземном, а также в Западной Сибири [5, 6, 7]. В связи с этим актуально проведение опережающей селекции на устойчивость к этому заболеванию. Предварительный фитопатологический и генетический скрининг новых сортов и перспективного селекционного материала мягкой пшеницы позволяет оценить их потенциал генетической защиты от желтой ржавчины.

С 2000 г. в России и Казахстане реализуется селекционная программа по улучшению яровой пшеницы (Казахстанско-Сибирская сеть улучшения яровой мягкой пшеницы, КАСИБ), в которой участвуют ведущие научно-исследовательские учреждения обеих стран. В рамках этой программы каждые два года предлагаются новые перспективные образцы яровой мягкой пшеницы для мультилокальных испытаний в России и Казахстане по хозяйственно ценным признакам и устойчивости к болезням [8, 9, 10]. Полевые эксперименты в каждой экологической точке организованы по единой схеме. Совместное экологическое изучение объективно отражает уровень прогресса, достигнутого в различных научных учреждениях, и адаптивный потенциал изучаемого материала [8].

Наряду с полевыми исследованиями материал КАСИБ широко изучают в лабораторных условиях по качественным характеристикам зерна и устойчивости к фитопатогенам. Лабораторную оценку его устойчивости к бурой ржавчине и идентификацию генов устойчивости (*Lr*-генов) традиционно проводят во Всероссийском научно-исследовательском институте защиты растений (Санкт-Петербург) [11]. С 2020 г. в связи с увеличением значимости желтой ржавчины эти исследования дополнены новым объектом.

Цель исследований – характеристика ювенильной устойчивости к бурой и желтой ржавчинам у образцов яровой мягкой пшеницы питомника КАСИБ-22 и идентификация *Lr* и *Yr* генов с использованием молекулярных маркеров.

Для мультилокального изучения в России и Казахстане в 2021–2022 гг. селекционными учреждениями-участниками программы КАСИБ предложено 36 новых перспективных сортов и линий яровой мягкой пшеницы, которые в предварительных испытаниях выделили по комплексу хозяйственно ценных признаков (табл. 1).

В лабораторных условиях проводили оценку ювенильной устойчивости образцов яровой пшеницы к возбудителю бурой и желтой ржавчины. В фитопатологическом тесте с бурой ржавчиной использовали три тест-клона *P. triticina*, маркированные вирулентностью к генам *Lr9*, *Lr19* и *Lr26*, а также дагестанскую популяцию, собранную в коллекционном посеве пшеницы Дагестанской опытной станции ВИР в 2023 г. (табл. 2). Все тест-клоны (*kLr9*, *kLr19*, *kLr26*) были вирулентны к линиям с генами *Lr 1*, *2a*, *2b*, *2c*, *3a*, *3bg*, *3ка*, *10*, *14a*, *14b*, *15*, *16*, *17*, *18*, *20*, *30* и авирулентны к линиям с генами *Lr 24*, *25*, *28*, *29*, *41*, *47*, *51*. Тест клон *kLr9* был авирулентным к *Lr19* и *Lr26* и вирулентным к *Lr9*; клон *kLr19* – авирулентным к *Lr9* и *Lr26* и вирулентным к *Lr19*; *kLr26* – авирулентным к *Lr9* и *Lr19* и вирулентным к *Lr26*. Дагестанская популяция отличалась от них авирулентностью к *Lr 2a*, *2b*, *2c*, *9*, *19*, *24*, *26*.

Для инокуляции *P. striiformis* использовали пять сборных популяций из географически отдаленных регионов: дагестанскую (pDag, сбор – 2023 г.), краснодарскую (pKgr, 2022 г.), ленинградскую (pSPb, 2022 г.), саратовскую (pSag, 2023 г.) и новосибирскую (pNov, 2021 г.). Предварительно их вирулентность была изучена на почти изогенных линиях Avocet NIL с генами *Yr1*, *Yr5*, *Yr6*, *Yr7*, *Yr8*, *Yr9*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr17*, *Yr18*, *Yr24*,

Табл. 1. Список образцов яровой мягкой пшеницы питомника КАСИБ-2022

Сорт/Линия	Оригинатор	Происхождение
Династия	Актюбинская СХОС	Степная 60 × k-29614 (Канада) × Саратовская 29
Линия 198/225–2020		Саратовская 70 × Лют.2143 × Асар
Линия 205–2020		Саратовская 55 × Саратовская 71 × Степная 75
Лютесценс 176/09	НПЦ ЗХ им. А. И. Бараева	Байтерек × Орал
Лютесценс 342/08		Карабалыкская 90 × Акмола 40
Линия 43/94к-07–7	Павлодарская СХОС	Казахстанская 15 × Омская 18
Линия 2/03–09–3		Лютесценс 251–93–4 × Актобе 130
Лютесценс 77201/09	Карабалыкская СХОС	Карабалыкская 7 × Карабалыкская 4
Лютесценс 3022/09		Шортандинская 125 × Лютесценс 86–91–94–1
Лютесценс 8–12–18		(Омская 35 × ЕМВ 16) × Омская 35
Лютесценс 2244	Карагандинская СХОС	Акмола 2 × Лютесценс 253–93–4
Лютесценс 2219		Эритроспермум 78 × Целина 50
Лютесценс 2223		Лютесценс 1567 × Омская 26
Линия 23/07	Северо-Казахстанская СХОС	Алтайская 100 × Курганская 5
Линия 435/12		Астана × Омская 36
Линия Чт-11	Курганский НИИСХ	Омская 28 × Авиада
Линия Пт-235		ЧС11№ 28
Линия Пт-311		ЧС11№ 84
KS 14/09–2	ООО «Агрокомплекс» Кургансена»	(Лют.162/84–1 × Chris) × (Целинная 20 × Терция)
KS 60/09–9		Лют 290 × 99–7 × Лют. 241 × 00–4
KS 61/09–4		Лют 290/99–7 × Тулеевская
KS 285/12–1586		Заульбинка × (Лютесценс 123 × Омская 20)
Лютесценс 1462	Самарский НИИСХ	Экада 128 × Тулайковская 110
Лютесценс 1486		Тулайковская 110 × Тулайковская 108
Лютесценс 1489		F ₁ 1619ae (Бирюза × Лют. 904) × Тулайковская 110
Линия-1616ae14		Тулайковская 110 × Безенчукская 380
Лютесценс 1356	СибНИИРС – филиал ИЦиГ	((Новосибирская (H)31 × H.15) × H.15) × H.15
Лютесценс 1364	СО РАН	((Новосибирская (H)31 × H.15) × H.15) × H.15
Агрономическая 5	Омский ГАУ	Sonata × (TAM 200 × Turaco) × Sonata
Лютесценс 76–17		Омская 37 × (KA × NAC) × TRCH × Лют.210.99.10
Лютесценс 82/09–7	ФГБНУ «Омский АНЦ»	Лют. 242/97–2–45 × Лют. 220/03–52
Лютесценс 136/10–1		Омская 35 × Лют.111/03–3
Лютесценс 71/10–4		Лют. 403/02–2 × Лют. 219/03–10
Ялуторовка	ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья	(Lutescens 210.99.10 × Bavis) × Омская 37
ГАУ-11–2016		Челяба × (Oasis × Skauz) × (BCN × WBLL1) Lutescens 30–94
Челябинка	Челябинский НИИСХ	Ватан × Дуэт

Yr27 и сортах-дифференциаторах: Vilmorin 23 (*Yr3*), Nord Desprez (*YrND*), Spaldings Prolific (*YrSP*), Strubes Dickkopf (*YrSD*). Используемый инфекционный материал *P. striiformis* характеризовался высоким генетическим разнообразием по признаку вирулентности. Дагестанская популяция была вирулентной к *Yr 2*, *3*, *4*,

Табл. 2. Характеристика вирулентности инфекционного материала *P. triticina* и *P. striiformis*, используемого в исследованиях

Изолят	Происхождение	Вирулентность / авирулентность*
<i>Puccinia triticina</i>		
kLr9	Челябинская обл., 2022	1, 2a, 2b, 2c, 3a, 3bg, 3ка, 9, 10, 14a, 14b, 15, 16, 17, 18, 20, 30 / 19, 24, 26
kLr19	Саратовская обл., 2022	1, 2a, 2b, 2c, 3a, 3bg, 3ка, 10, 14a, 14b, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 30 / 9, 24, 26
kLr26	Новосибирская обл., 2022	1, 2a, 2b, 2c, 3a, 3bg, 3ка, 10, 14a, 14b, 15, 16, 17, 18, 20, 26, 30 / 9, 19, 24
pDag	Республика Дагестан, 2023	1, 3a, 3bg, 3ка, 10, 14a, 14b, 15, 16, 17, 18, 20, 26, 30 / 2a, 2b, 2c, 9, 19, 24
<i>Puccinia striiformis</i>		
pDag	Республика Дагестан, 2023	2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 18, 27, SP, SD, ND / 1, 5, 15, 17, 24
pKr	Краснодарский край, 2022	1, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 18 / 2, 5, 10, 15, 17, 24, 27, SP, SD, ND
pSPb	Ленинградская обл., 2022	2, 6, 8, 9, 18, 27 / 1, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 17, 24, SP, SD, ND
pSar	Саратовская обл., 2023	4, 6, 8, 9, 17, 18, 27 SP, ND / 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 24, SD
pNov	Новосибирская обл., 2021	1, 2, 3, 6, 8, 9, 18, 27, SD, ND / 4, 5, 7, 10, 15, 17, 24, SP

*для *Puccinia triticina* – к линиям Thatcher с генами Lr; для *Puccinia striiformis* – к линиям Avocet с генами Yr и сортам-дифференциаторам (AvocetNIL: Yr1, Yr5, Yr6, Yr7, Yr8, Yr9 Yr10, Yr15, Yr17, Yr18, Yr24, Yr27; Yr3 – Vilmorin 23, ND – Nord Desprez, SP – Spaldings Prolific, SD – Strubes Dickkopf).

6, 7, 8, 9, 10, 18, 27, SP, SD, ND, авирулентной к Yr 1, 5, 15, 17, 24; краснодарская – вирулентной к Yr 1, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 18, авирулентной к Yr 2, 5, 10, 15, 17, 24, 27, SP, SD, ND; ленинградская – вирулентной к Yr 2, 6, 8, 9, 18, 27, авирулентной к Yr 1, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 17, 24, SP, SD, ND; саратовская – вирулентной к Yr 4, 6, 8, 9, 17, 18, 27, SP, ND, авирулентной к Yr 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 24, SD; новосибирская – вирулентной к Yr 1, 2, 3, 6, 8, 9, 18, 27, SD, ND, авирулентной к Yr 4, 5, 7, 10, 15, 17, 24, SP.

Оценку ювенильной устойчивости образцов пшеницы КАСИБ-22 выполняли по ранее описанным методикам [11, 12]. Растения высевали в сосуды с почвой (по 10 зерен на образец). Инокуляцию бурой ржавчиной проводили в фазе первого листа (8...10 дневные проростки), желтой – в фазе появления второго листа (11...14 дневные проростки). Изучаемые образцы пшеницы опрыскивали суспензией спор каждого изолята/популяции в иммерсионной жидкости 3M™ Noves™ 7100. После заражения бурой ржавчиной растения выдерживали в темноте в течение суток во влажной камере при температуре 20 °С. Затем переносили в светустановку (температура 20 °С, фотопериод 16 ч день / 8 ч ночь). Спороношение патогена отмечали на 8...9 сутки. После инокуляции популяциями желтой ржавчины сосуды с растениями инкубировали в темноте при температуре 10 °С и влажности 100 % в течение суток, затем переносили в климатическую камеру (Versatile Environmental Test Chamber MLR-352H) со следующими параметрами: день – 16 ч, освещение 15000...20000 люкс, температура 16 °С; ночь – 8 ч, температура 10 °С. Учет проводили через 16...18 дней после заражения.

Учет типа реакции к бурой ржавчине осуществляли по шкале Майнса и Джексона [13]; к желтой ржавчине – по шкале Гасснера и Штрайба [13]: балл 0 – отсутствие симптомов поражения; 0; – некрозы без пустул; 1 – мелкие пустулы, окруженные некрозом; 2 – пустулы среднего размера, окруженные некрозом или хлорозом; 3 – пустулы среднего размера без некроза; 4 – крупные пустулы без некроза. Растения с оценкой 0, 1, 2 балла относили к устойчивым, 3, 4 балла – к восприимчивым.

ДНК выделяли СТАВ-методом с использованием набора фирмы «Бигль» из смеси 3 растений. В случае обнаружения расщепления по устойчивости при фитопатологическом тестировании, ДНК выделяли по растениям для 10 проростков. С использованием молекулярных маркеров проводили идентификацию 20 генов – Lr1 (WR003), Lr3 (Xmwig798), Lr9 (SCS5), Lr10 (F1.2245/Lr10-6/r2), Lr19 (SCS265), Lr20 (STS638), Lr21 (Lr21F/R), Lr24 (Sr24#12, Sr24#50), Lr25 (Lr25F20/R19), Lr28 (SCS421), Lr29 (Lr29F24), Lr35 (Sr39#12), Lr39 (GDM35), Lr47 (PS10), Lr50 (GWM382, GDM87), Lr66 (S13-R16), Lr YrAgi2 (MF2/MR1r2), Yr2 (Wmc364), Yr5 (STS7/8, STS9/10), Yr7 (CFD77), Yr10 (Xpsp3000), Yr15 (Xbarc8), Yr24 (Barc181), Yr25 (Xgwm6), Yr60 (Wmc776, Wmc313), Lr34, Yr18 (csLV34), Lr37, Yr17 (Ventriup/LN2) и 2 транслокаций – 1BL.1RS (Lr26, Yr9) и 1AL.1RS (SCM9) (4,11,12,14–17). Информация об этих маркерах и эффективности Lr и Yr генов, сцепленных с этими маркерами, широко представлена в мировой и отечественной литературе [13, 14, 15]. Маркеры были синтезированы фирмой BioBeagle (Санкт-Петербург). Для постановки ПЦР использовали протоколы, рекомендованные разработчиками маркеров [15, 16, 17], и амплификатор BioRad C1000. Реакционные смеси для ПЦР готовили с использованием реактивов фирмы «Диалат ЛТД». Положительными контролями для бурой ржавчины служили изогенные линии Thatcher с генами Lr1, Lr3, Lr9, Lr10, Lr19, Lr20, Lr21, Lr24, Lr25, Lr26, Lr28, Lr29, Lr35, Lr37, Lr34 и сорта KS90WGRC10 (Lr39), Pavon (Lr47), KS96WGRC36 (Lr50), Челябин 75 (Lr66), Тулайковская 10 (Lr YrAgi2), для желтой ржавчины – изогенные линии Avocet с генами Yr5, Yr7, Yr9, Yr10, Yr15, Yr17, Yr18, Yr24 и Yr25. Для разделения ПЦР-продуктов использовали 1,5 %-ный агарозный гель (ТВЕ). Определение размеров продуктов амплификации проводили с использованием маркеров молекулярного веса ДНК 100bp и 1Kbp («Диалат ЛТД»).

Результаты и обсуждение. При проведении фитопатологического анализа высокую устойчивость ко всем клонам и дагестанской популяции *P. triticina* протестировали 15 образцов (табл. 3), в том числе 14 российской и 1 казахстанской селекции. Линии KS 14/09–2, KS 60/09–9, KS 285/12–1586 и ГАУ-11–2016 были восприимчивы к тест-клону kLr26 и дагестанской популяции (pDag), а линия 23/07 к тест-клону kLr9. Согласно результатам фитопатологического теста у них можно предположить наличие генов Lr26 и Lr9 соответственно. Расщепление по устойчивости выявлено у линии KS 61/09–4 при инокуляции клоном kLr26 и популяцией pDag, а также у сорта Ялutorовка при инокуляции kLr19, kLr26 и pDag, что указывает на гетерогенность этих образцов пшеницы. При инокуляции линии KS 61/09–4 70 % растений протестировали устойчивую реакцию, 30 % восприимчивость. Для сорта Ялutorовка расщепление по устойчивости для указанных клонов и популяции составило 50 %.

Известно [11, 13, 14], что высокую эффективность в защите от бурой ржавчины в России и Казахстане имеют гены Lr24, Lr25, Lr28, Lr29, Lr39(41), Lr45, Lr47, Lr51, Lr53. Частично утратили эффективность гены Lr9, Lr19, Lr21, Lr23, Lr44, Lr48, Lr49, Lr50. Большая часть других Lr-генов [13] по отдельности утратили свою эффективность.

С использованием молекулярных маркеров 20 Lr-генов, широко и умеренно используемых в селекции, установлено высокое генетическое разнообразие материала КАСИБ-22 по устойчивости к бурой ржавчине. У резистентных образцов определены высокоэффективные

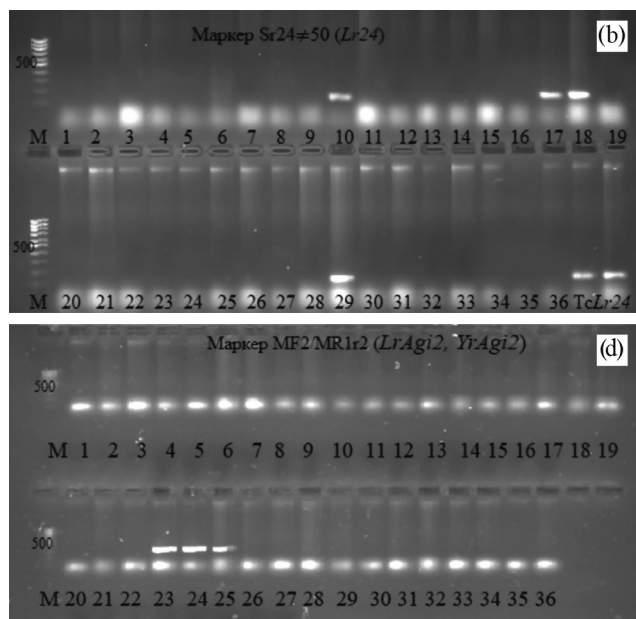
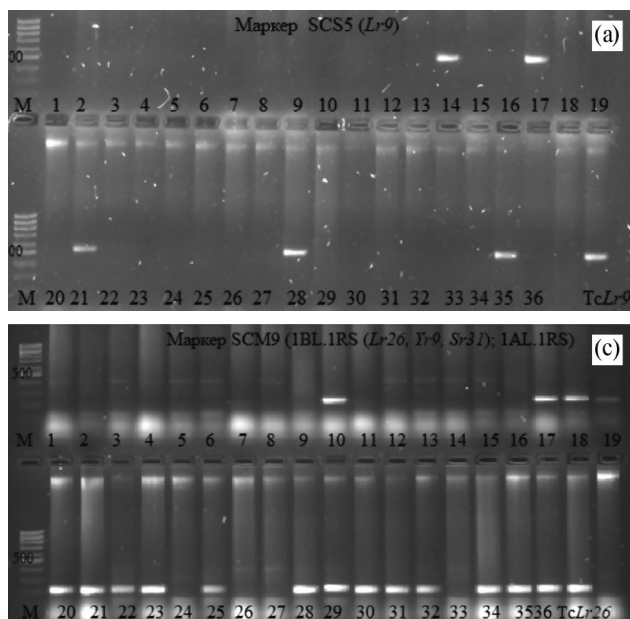
Табл. 3. Характеристика образцов КАСИБ-22 по устойчивости к бурой и желтой ржавчинам и идентифицированные у них гены устойчивости

Линия, сорт	Тип реакции (балл)										Идентифицированные гены устойчивости
	бурая ржавчина					желтая ржавчина					
	kLr9	kLr19	kLr26	pDag	pDag	pKг	pSPb	pSar	pNov		
Династия	3	3	3	3	3	3...4	3	3	3	-	
Линия 198/225-2020	3	3	3	3	3	3	3	3	3	Lr3	
Линия 205-2020	3	3	3	3	3	3...4	3	3	3	-	
Лютесценс 176/09	3	3	3	3	3	3...4	3	3	3	Lr10	
Лютесценс 342/08	3	3	3	3	3	3...4	3	3	3	-	
Линия 43/94к-07-7	3	3	3	3	3	3...4	3	0	3	-	
Линия 2/03-09-3	3...4	3	3	3	3	3	3	3	3	-	
Лютесценс 77 201/09	3...4	3	3	3	3	3	3	3	3	Lr3	
Лютесценс 30 22/09	3...4	3	3	3	3...4	3	2...3	3	3	-	
Лютесценс 8-12-18	0...1	0	1	0...1	3...4	3	2...3	3	3	Lr24, Lr34/Yr18, 1AL.1RS	
Лютесценс 2244	3	3	3	3	3	1...2	2	3	3	Lr3	
Лютесценс 2219	3	3	3	3	3	3	2...3	3	3	-	
Лютесценс 2223	3	3	3	3	3	3...4	2...3	3	3	Lr3	
Линия 23/07	3	0	0	0	3	3	3...4	3	3	Lr1, Lr9	
Линия 435/12	3	3	3	3	3...4	3...4	3	3	3	Lr3	
Линия Чт-11	3	3	3	3	3	3	2	3	3	-	
Линия Пт-235	0	0	0	0	3	3	3	3	3	Lr9, Lr24, 1AL.1RS	
Линия Пт-311	0	0	0...1	0	3	3...4	3...4	0...1	3	Lr3, Lr24, 1AL.1RS	
KS 14/09-2	0	0	3	3	3	3...4	3	3	3	Lr26/Yr9	
KS 60/09-9	0	0	3	3	2...3	3...4	3...4	3	3	Lr1, Lr26/Yr9	
KS 61/09-4	0	0	0, 3**	0,3	0	2	3	0	3	Lr9*, Lr26/Yr9	
KS 285/12-1586	0	0	3	3	3	2...3	3	3	3	Lr1, Lr26/Yr9	
Лютесценс 1462	0	0	0	0	0	3	2...3	0	2...3	Lr19, Lr26/Yr9, LrAgi2	
Лютесценс 1486	0	0	0	0	3	2	3...4	3	3	Lr3, Lr19, LrAgi2	
Лютесценс 1489	0	0	0	0	3	1...2	2...3	3	3	Lr3, LrAgi2	
Линия 1616ae14	0	0	0	0	2...3	3	3	3	3	Lr19, Lr26/Yr9	
Лютесценс 1356	0	0	0	0	3	3...4	3...4	3	3	Lr1, Lr3, Lr10	
Лютесценс 1364	0	0	0	0...1	3	3...4	3...4	3	3	Lr1, Lr3, Lr10	
Агрономическая 5	0	0	0	0...1	2	2...3	2...3	2	3	Lr9, Lr26/Yr9	
Лютесценс 76-17	0	0	0	0	3	3	2...3	2	3	Lr24, 1AL.1RS	
Лютесценс 82/09-7	0	0...1	0...1	0...1	3	3	2...3	3	3	Lr1, Lr3, Lr19, Lr26/Yr9	
Лютесценс 136/10-1	0	0	0	0	2...3	2	2...3	2	3	Lr3, Lr19, Lr26/Yr9, Lr34/Yr18	
Лютесценс 71/10-4	0	0	0	0	3	3	3	3	3	Lr1, Lr19, Lr26/Yr9	
Ялуторовка	3	0, 3	0, 3	0, 3	0	0	0...1	3	3	Lr3, Lr10, Lr34/Yr18	
ГАУ-11-2016	0	0	3	3	0	3	3	3	3	Lr26/Yr9, Lr34/Yr18	
Челябинка	0	0	0	0	3	3	3	3	3	Lr9, Lr26/Yr9	

*расщепление при анализе по растениям при использовании маркера гена Lr9; ** расщепление образца по устойчивости в фитопатологическом тесте; - - идентифицируемых генов не выявлено.

гены *Lr24*, *LrAgi2*, частично утратившие эффективность гены *Lr9*, *Lr19*, малоэффективные гены *Lr1*, *Lr3*, *Lr10*, *Lr26* и *Lr34* и пшенично-ржаная транслокация 1AL.1RS с неидентифицированными генами устойчивости к бурой, стеблевой и желтой ржавчинам (см. табл. 3). Напри-

мер, с использованием маркера SCS5 отмечено наличие гена *Lr9* у линий 23/07, Пт-235, KS 61/09-4, Лютесценс 1364, ГАУ-11-2016 (см. рисунок, а), маркера *Sr24#50* - гена *Lr24* у образцов Лютесценс 8-12-18, Линия Пт-235, Линия Пт-311, Агрономическая 5 (см. рисунок, б). При



Электрофореграммы ПЦР образцов яровой пшеницы КАСИБ-22 с маркерами SCS5 (а), *Sr24#50* (б), SCM9 (с) и MF2/MR1r2 (д): М – маркер молекулярного веса (100bp, Дюалат); 1...36 – образцы яровой пшеницы согласно перечню в табл. 1.

проведении ПЦР с маркером SCM9 положительная реакция показана у 17 образцов из 36 (см. рисунок, с), с маркером MF2/MR1r2 – у образцов Лютесценс 1462, Лютесценс 1486, Лютесценс 1489 (см. рисунок, д).

У устойчивых линий выявлено по несколько генов устойчивости. Высокоэффективный ген *Lr24* и транслокация AL.1RS обнаружены у линии Лютесценс (Лют.) 8–12–18 из Казахстана и линий Пт-235, Пт-311, Лют. 76–17 из России (см. табл. 3). Наряду с этими генами у линии Лют.8–12–18 определен ген *Lr34*, у линии Пт-235 – ген *Lr9*, у линии Пт-311 – ген *Lr3*.

В защите от бурой ржавчины эффективной считают стратегию пирамидирования генов устойчивости [3, 8]. Она подразумевает комбинирование в одном генотипе нескольких генов устойчивости. Это могут быть как высокоэффективные гены, так и гены по отдельности, утратившие эффективность. Эффективные их сочетания позволяют существенно продлить срок «полезной жизни» новых сортов. В защите от бурой ржавчины перспективным считают сочетание генов *Lr9* (или *Lr19*) с *Lr26*. Ген *Lr9* утратил свою эффективность в Западной Сибири и на Урале, *Lr19* – в Поволжье. Обусловлено это широким возделыванием генетически однородных по *Lr9* и *Lr19* сортов в указанных регионах. Изоляты *P. triticina* по отдельности вирулентные к *Lr9* и *Lr19* имеют высокую представленность в западно-сибирских и уральских популяциях, при этом все они авирулентны к линии с геном *Lr26* [4]. Это обуславливает эффективность пирамидирования генов *Lr9* и *Lr19* с *Lr26*. В материале КАСИБ-22 гены *Lr9* и *Lr26* определены у сортов Агрономическая 5 и Челябинка. В мультилокальных полевых исследованиях КАСИБ и региональных Государственных сортоиспытаниях они выделены по комплексу хозяйственно ценных признаков [9, 18] и в 2023–2024 гг. включены в Государственный реестр селекционных достижений РФ. Линия KS 61/09–14 показала гетерогенность по *Lr9*. При анализе индивидуальных растений определены растения с двумя генами (*Lr9*, *Lr26*) и с одним (*Lr26*). Расщепление этой линии по устойчивости отмечено и при фитопатологическом тестировании.

Сочетание генов *Lr19* и *Lr26* выявлено у трех линий селекции Омского АНЦ: Лют. 82/09–7 (+*Lr1*, *Lr3*), Лют. 136/10–1 (+*Lr3*, *Lr34*), Лют. 71/10–4 (+*Lr1*). Коммерческие сорта Омская 37 и Омская 38 с генами *Lr19* и *Lr26* возделываются в Западной Сибири с 2010 гг. и до сих пор характеризуются устойчивостью к бурой ржавчине.

Сочетание генов *Lr19* и *Lr26* также определено у линий 161ae14 и Лют. 1462, созданных в Самарском НИИСХ. У линии Лют. 1462 дополнительно идентифицирован высокоэффективный ген *LrAgi2*. Кроме того, он определен еще у двух линий этого селекцентра: Лют. 1486 (+*Lr19*, *Lr3*) и Лют. 1489 (+ *Lr3*). Первые высокоустойчивые к бурой ржавчине сорта с *LrAgi2* были созданы в Самарском НИИСХ в начале 2000 гг. (Тулайковская 5, Тулайковская 10). Ген сохраняет свою эффективность в России и Казахстане [6].

В молекулярном анализе присутствие гена *Lr26* определено у линий KS 14/09–2, KS 60/09–9 (+*Lr1*), KS 285/12–1586 (*Lr1*), ГАУ-11–2016 (+*Lr34*); гена *Lr9* – у линии 23/07 (+*Lr1*), что согласуется с результатами фитопатологического теста.

У двух высокоустойчивых линий Лют. 1356 и Лют. 1364, созданных в СибНИИРС с участием сортов Новосибирская 15 и Новосибирская 31, определены только малоэффективные гены *Lr1*, *Lr3* и *Lr10*. Их комбинация не обеспечивает эффективной защиты от ржавчины, что указывает на наличие у этих линий дополнительных

Lr-генов, отличающихся от идентифицируемых в представленном анализе. По результатам Государственного сортоиспытания в 2024 г. линия Лют. 1356 включена в Реестр селекционных достижений как сорт Загора Новосибирская. Линия Лют. 1364 проходит государственное сортоиспытание как сорт Суенга [9].

Все устойчивые к бурой ржавчине сорта и линии яровой пшеницы, выделенные в представленном анализе, имели высокую резистентность к болезни в полевых условиях [9].

Иммунологические исследования устойчивости к желтой ржавчине продемонстрировали низкий потенциал материала КАСИБ-22. Образцов, устойчивых ко всем региональным популяциям при инокуляции в фазе проростков, не выявлено. Это указывает на отсутствие у них высокоэффективных *Yr*-генов. Устойчивость к трем популяциям показали сорт Ялуторовка (pDag, pKг, pSPb) и линия KS61/09–4 (pDag, pKг, pSar); к двум популяциям – Лют. 2244 (pKг, pSPb), Лют. 136/10–1 (pKг, pSar), Лют. 1462, Агрономическая (pDag, pSar); к одной – линии 43/94к-07–7 и ПТ-311 (pSar). Число устойчивых образцов к саратовской (17%), дагестанской (11%) и краснодарской (11%) популяциям было выше, чем к ленинградской (5%). Все изученные образцы были восприимчивы к новосибирской популяции.

Высокой эффективностью в России и Казахстане характеризуются гены *Yr5*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr17* и *Yr24* [7, 19, 20]. С использованием молекулярных маркеров в образцах КАСИБ-22 такие гены не выявлены, что согласуется с результатами фитопатологического тестирования. Также у них не выявлено частично эффективных генов *Yr2*, *Yr7*, *Yr25* и *Yr60*. У 11 образцов определено наличие гена *Yr9*, локализованного в одной транслокации с геном *Lr26* и *Sr31*. У трех линий определено наличие гена *Yr18*, сцепленного с генами *Lr34* и *Sr57*. Гены *Yr9* и *Yr18*, *Lr26* и *Lr34* утратили свою эффективность в России [4, 7]. При этом сохраняется эффективность *Sr31* и *Sr57*.

Выводы. В фазе проростков 42% изученных образцов КАСИБ-22, включающих перспективные сорта и линии яровой мягкой пшеницы российской и казахстанской селекции (23 и 13 образцов соответственно), продемонстрировали резистентность при инокуляции тест-клонами и популяцией *P. triticina*. Больше всего устойчивых отмечено среди образцов российской селекции (36%). С использованием молекулярных маркеров показано высокое разнообразие изученного материала по *Lr*-генам. Выявлены высокоэффективные гены *Lr24* и *LrAgi2*, частично утратившие эффективность гены *Lr9* и *Lr19*, малоэффективные гены *Lr1*, *Lr3*, *Lr10*, *Lr26* и *Lr34*, а также пшенично-ржаная транслокация 1AL.1RS с не идентифицированными генами устойчивости к бурой, стеблевой и желтой ржавчине. Все устойчивые образцы несли по два и более *Lr*-генов.

В ходе лабораторной оценки устойчивости к возбудителю желтой ржавчины образцов иммунных ко всем используемым популяциям *P. striiformis*, которые отличались по географическому происхождению (Северный Кавказ, Северо-Запад, Западная Сибирь), не обнаружено. Устойчивость к трем из пяти популяций продемонстрировали 5% образцов, к двум – 11%, к одной – 17%. В молекулярном анализе у изученных образцов высокоэффективных генов *Yr5*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr17*, *Yr24* не обнаружено. Малоэффективные гены *Yr9* и *Yr18* идентифицированы у 30% и 8% линий соответственно.

Результаты проведенного анализа указывают на необходимость опережающей селекции яровой пшеницы на устойчивость к желтой ржавчине с привлечением генетически разнообразных доноров.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Исследования поддержаны Российским научным фондом, проект № 23–26–00042. 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. Virulence characterization of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* collections from six countries in 2013 to 2020 / X. Chen, M. Wang, A. Wan, et al. // *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2021. Vol. 43. No. 2. P. 308–322. doi: 10.1080/07060661.2021.1958259.
2. Левитин М. М. Распространение болезней растений в условиях глобального изменения климата // *Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков*. 2016. С. 97–100.
3. Генетическая защищенность сортов озимой пшеницы от ржавчинных болезней / Л. А. Беспалова, И. Б. Аблова, Ж. Н. Худокомова и др. // *Рисоводство*. 2019. Т. 4. № 45. С. 30–37.
4. Gulyaeva E., Shaydayuk E., Gannibal P. Leaf rust resistance genes in wheat cultivars registered in Russia and their influence on adaptation processes in pathogen populations // *Agriculture*. 2021. Vol. 11. No. 4. Article 319. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/11/4/319> (дата обращения: 15.12.2023). doi: 10.3390/agriculture11040319.
5. Зеленева Ю.В., Судникова В. П., Бучнева Г. Н. Иммунологическая характеристика сортов озимой мягкой пшеницы в условиях ЦЧР // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2022. № 96. С. 95–99. doi: 10.21515/1999-1703-96-95-99.
6. Получение и характеристика линии мягкой пшеницы (Тулайковская 10×Саратовская 29) с интрогрессией хромосомы пырея *Thinopyrum intermedium* 6Agi2 / Ю. Н. Иванова, К. К. Розенфрид, А. И. Стасюк и др. // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021. Т. 25. Вып. 7. С. 701–712. doi: 10.18699/VJ21.080.
7. Gulyaeva E. I., Shaydayuk E. L., Kosman E. Virulence diversity of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in common wheat in Russian Regions in 2019–2021 // *Agriculture*. 2022 V. 12 No. 11. Article 1957. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/12/11/1957> (дата обращения: 15.12.2023). doi: 10.3390/agriculture12111957.
8. Шаманин В. П., Потоцкая И. В., Кузьмин О. Г. Скрининг сортов яровой мягкой пшеницы питомника КАСИБ к бурой и стеблевой ржавчине в условиях Западной Сибири // *Вестник Казанского ГАУ*. 2017. Т. 4. № 46. С. 61–66. doi: 10.12737/article_5a5f06807861a9.60475518.
9. Агеева Е. В., Капко Т. Н., Советов В. В. Изучение устойчивости к некоторым заболеванияям сортов и линий яровой пшеницы питомника КАСИБ-22 // *Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2023. Т. 9. Вып. 1. С. 21–29. doi: 10.18699/LettersVJ-2023-9-04.
10. Оценка коллекции сортов сети КАСИБ в условиях южной лесостепи Западной Сибири / В. Е. Пожерукова, В. П. Шаманин, М. С. Гладких и др. // *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 1. № 33. С. 30–37.
11. Гульятеева Е. И., Шайдаюк Е. Л., Рсалиев А. С. Идентификация генов устойчивости к бурой ржавчине у образцов яровой мягкой пшеницы российской и казахстанской селекции // *Вестник защиты растений*. 2019. № 3. С. 41–49. doi: 10.31993/2308-6459-2019-3(101)-41-49.
12. Gulyaeva E. I., Shaydayuk E. L. Resistance of modern Russian winter wheat cultivars to yellow rust // *Plants*. 2023. Vol. 12. No. 19. Article 3471. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/19/3471> (дата обращения: 15.12.2023). doi: 10.3390/plants12193471.
13. McIntosh R. A., Wellings C. R., Park R. F. *Wheat rusts. An atlas of resistance genes*. CSIRO Australia: Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, the Netherlands, 1995. 213 p.
14. Mas Wheat. URL: <https://maswheat.ucdavis.edu/> (дата обращения 20.02.2024).
15. Rani R., Singh R., Yadav N. R. Evaluating stripe rust resistance in Indian wheat genotypes and breeding lines using molecular markers // *Comptes Rendus Biol*. 2019. Vol. 342. P. 154–174. doi: 10.1016/j.crv.2019.04.002.
16. Chawla V. Genetic diversity of bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) revealed by microsatellite SSR markers for leaf and stripe rust resistance // *J. Pharmacogn. Phytochem*. 2019. Vol. 8. P. 86–93.
17. Фенотипическая изменчивость селекционных линий мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по элементам структуры урожая в экологических условиях Западной Сибири и Татарстана / А. И. Стасюк, И. Н. Леонова, М. Л. Пономарева и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2021. Т. 56. № 1. С. 78–91. doi: 10.15389/agrobiol.2021.1.78rus.
18. Характеристики сортов растений, впервые включенных в 2023 году в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию: официальное издание. М: ФГБНУ «Росинформгротех»; 2023. 326 с.
19. Kokhmetova A., Rsaliyev Sh., Atishova M., et al. Evaluation of wheat germplasm for resistance to leaf rust (*Puccinia triticina*) and identification the sources of *Lr*-resistance genes using molecular markers // *Plants*. 2021. Vol. 10. No. 7. Article 1484. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/7/1484> (Дата обращения 15.12.2023). doi: 10.3390/plants10071484.
20. Postulation of *Yr* resistance genes to stripe rust in 12 commercial wheat cultivars of Russian breeding / I. Matveeva, G. Volkova, Y. Kim, et al. // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023. Vol. 15. No. 4. P. 158–179. doi: 10.12731/2658-6649-2023-15-4-158-179.

Поступила в редакцию 29.02.2024
 После доработки 22.03.2024
 Принята к публикации 09.04.2024

Агрочоведение и агроэкология

УДК:581.132:631.8

DOI 10.31857/S2500262724020091 EDN GSTNCO

ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ПОСЕВОВ И СЕКВЕСТРАЦИЯ АТМОСФЕРНОГО УГЛЕРОДА КЛЕВЕРОМ ЛУГОВЫМ И ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЕЙ В СЕВООБОРОТЕ**Н. Е. Завьялова**, доктор биологических наук, **Д. Г. Шишков**, мл. научный сотрудник,
Д. Р. Сафуллина, мл. научный сотрудник*Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
614532, Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры, 12
E-mail: nezavyalova@gmail.com*

Цель исследований – оценить интенсивность поглощения световой энергии культурами севооборота в течение вегетационного периода и определить количество атмосферного углерода, поглощенного в процессе фотосинтеза. В длительном стационарном опыте изучали поглощение фотосинтетически активной радиации (ФАР) посевами клевера лугового 2 года пользования и яровой пшеницей в вариантах без удобрений и при внесении $N_{60}P_{60}K_{60}$. Для оценки интенсивности поглощения световой энергии использовали показатели содержания хлорофилла А, хлорофилла В и каротина, которые служат фоторецепторами-пигментами фотосинтеза у высших растений. Наиболее активный период поглощения ФАР листьями клевера лугового отмечали с фазы стеблевания до цветения, сумма хлорофилла А и В в листьях составляла 11,08...14,32 мг/г сухой массы, каротина – 2,2...3,3 мг/г сухой массы. В процессе фотосинтеза содержание углерода в листьях клевера варьировало в интервале 40,4...45,5 %. Содержания основных продуктов фотосинтеза – сахаров снижались с 9,8 % в фазе стеблевания до 3,4 % в период формирования семян. Наиболее интенсивно процесс фотосинтеза яровой пшеницы проходил в период от фазы кушения до начала созревания, содержание хлорофилла составляло 9,14...11,90 мг/г сухой массы, каротина было в 2,5...4,3 раза ниже. Больше всего сахаров отмечали в начале выхода в трубку: без удобрений – 15,3 %, при внесении NPK по 60 кг д.в./га – 17,2 %. Количество углерода, поглощенного посевами клевера лугового в процессе фотосинтеза за вегетационный период в зависимости от вариантов опыта, составляло 2,26...2,42 т/га (8,09...8,66 т/га CO_2), яровой пшеницы – 1,49...1,93 т/га (5,33...6,90 т/га CO_2).

PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY OF CROPS AND SEQUESTRATION OF ATMOSPHERIC CARBON BY MEADOW CLOVER AND SPRING WHEAT IN CROP ROTATION**N. E. Zavyalova, D. G. Shishkov, D. R. Safullina***Perm Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences,
614532, Permskii krai, s. Lobanovo, ul. Kul'tury, 12
E-mail: nezavyalova@gmail.com*

The purpose of the research is to estimate the intensity of absorption of light energy by crop rotation crops during the growing season and determine the amount of atmospheric carbon absorbed during photosynthesis. In a long-term stationary experiment, the absorption of photosynthetically active radiation (FAR) by crops of meadow clover for 2 years of use and spring wheat in variants without fertilizers and when applying $N_{60}P_{60}K_{60}$ was studied. Chlorophyll A, chlorophyll B and carotene, which serve as photoreceptors-pigments of photosynthesis in higher plants, were used to assess the intensity of absorption of light energy. The most active period of absorption of HEADLIGHTS by meadow clover leaves was noted from the stalking phase to flowering, the amount of chlorophyll A and B in the leaves was 11.08...14.32 mg/g dry weight, carotene – 2.2...3.3 mg/g dry weight. During photosynthesis, the carbon content in clover leaves varied in the range of 40.4...45.5 %. The content of the main products of photosynthesis, sugars, decreased from 9.8 % in the stalking phase to 3.4 % during seed formation. The most intensive process of photosynthesis of spring wheat took place during the period from the tillering phase to the beginning of maturation, the chlorophyll content was 9.14...11.90 mg/g dry weight, carotene was 2.5...4.3 times lower. Most sugars were noted at the beginning of entering the tube: without fertilizers – 15.3 %, when applying NPK of 60 kg d.v./ha – 17.2 %. The amount of carbon absorbed by meadow clover crops during photosynthesis during the growing season, depending on the experimental options, was 2.26...2.42 t/ha (8.09...8.66 t/ha CO_2), spring wheat – 1.49...1.93 t/ha (5.33...6.90 t/ha CO_2).

Ключевые слова: хлорофилл, каротин, органический углерод, элементы минерального питания, клевер луговой, яровая пшеница.

Key words: chlorophyll, carotene, organic carbon, elements of mineral nutrition, meadow clover, spring wheat.

Фотосинтез – это единственный процесс, в результате которого углекислый газ из атмосферы связывается и вовлекается в природный кругооборот. При этом ежегодно аккумулируется 200 млрд т CO_2 [1]. Зеленые растения в процессе фотосинтеза образуют органические соединения (углеводы) из углекислого газа и воды с использованием энергии света, которые включаются в процессы жизнедеятельности растений. Это дает возможность управлять секвестрацией углерода [2]. Увеличение фотосинтетической активности растений приводит к наращиванию их биомассы, при этом из атмосферы удаляются излишние объемы CO_2 , повышается урожайность сельскохозяйственных культур, создаются

условия для длительного запасаания (депонирования) углерода почвой. Поглощение атмосферного углерода растениями зависит от интенсивности фотосинтеза, который активнее протекает у культур с большей ассимиляционной поверхностью листьев [3]. Изучение продуктивности и содержания углерода в тканях растений позволяет оценить их секвестрационный потенциал [4].

Уровень секвестрации углерода во многом зависит от фотосинтетической способности трав. Например, объемы секвестрации естественным травостоем варьируют в пределах 2,2...2,5 т/га в год [5]. Примерно 40 % территории суши покрыто травянистыми растениями, в них содержится до 30 % глобальных запасов

почвенного углерода [6]. Для травянистой растительности и сельскохозяйственных культур продукционная эффективность хлорофилла составляет 300 кг С/кг хлорофилла в год [2]. С учетом урожайных данных Росстата первичная продукция фотосинтеза посевов сельскохозяйственных культур, выраженная через углерод, в среднем составляет 5,25 т С/га/год [6].

Карбоновая тематика связана со снижением темпов роста концентрации парниковых газов в приземном слое атмосферы [4]. Одно из направлений смягчения парникового эффекта – накопление и депонирование атмосферного углерода в почве. В связи с этим большой интерес представляет изучение возможностей бобовых и злаковых трав аккумулировать углерод из атмосферы и накапливать его в почве.

Цель исследований – выявить фотосинтетическую и углерод секвестрирующую способность яровой пшеницы и клевера лугового в севообороте.

Методика. Исследования проводили в длительном стационарном эксперименте, заложенном на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве опытного поля «Пермского НИИСХ» – филиала ПФИЦ УрО РАН в 1978 г. в восьмипольном севообороте со следующим чередованием культур: чистый пар, озимая рожь, картофель, пшеница, клевер 1 г. п., клевер 21 г. п., ячмень, овес. Агрохимическая характеристика пахотного слоя опытного участка: рН_{KCl} – 5,6; гидролитическая кислотность по Каппену – 2,0, сумма поглощенных оснований по Каппену – 21,0 смоль(экв)/100 г почвы, содержание гумуса по Тюрину – 2,12 %, подвижных форм фосфора и калия (по Кирсанову) – соответственно 175 и 203 мг/кг почвы. Минеральные удобрения вносили под зерновые культуры и картофель, на клевере изучали последствие. В опыте использовали мочевину или аммиачную селитру, суперфосфат и хлористый калий. Известь вносили перед закладкой опыта в дозе 1,0 Нг. Органические удобрения не использовали. Общая площадь делянки – 120 м², учетная – 76,4 м². Опыт заложен в 2-х полевых закладках, размещение вариантов рендомизированное.

Фотосинтетическую активность клевера лугового и пшеницы яровой изучали в шестой ротации восьмипольного севооборота в 2023 г. в двух закладках полевого опыта в следующих вариантах: без удобрений – контроль; N₆₀P₆₀K₆₀. Содержание C_{орг} в почве определяли методом бихроматного окисления с титриметрическим окончанием, углерода в растительных образцах – на элементном анализаторе Elementary Vario ElCub.

Поскольку интенсивность фотосинтеза зависит от количества хлорофилла в листьях, то в качестве универсального показателя для оценки потенциальной возможности культур поглощать фотосинтетически активную радиацию (ФАР) использовали содержание хлорофилла А, хлорофилла В и каротина – фоторецепторных пигментов фотосинтеза у высших растений.

Растительные образцы отбирали в шестикратной полевой повторности. Содержание хлорофилла в листьях растений определяли по действующей методике [7], легкодоступные углеводы (сахара) – по ГОСТ 26176-2019, клетчатку – по ГОСТ 31675-2-12, жир – по ГОСТ 13496.15-1016, каротин – по ГОСТ 13496.17. Количество азота, фосфора и калия в растениях определяли в воздушно-сухих размолотых образцах после мокрого озelenения: общего азота – по методу Кьельдаля (ГОСТ 13496.4-93), общего фосфора – спектрофотометрическим методом (ГОСТ 28902-91), общего калия – пламенно-

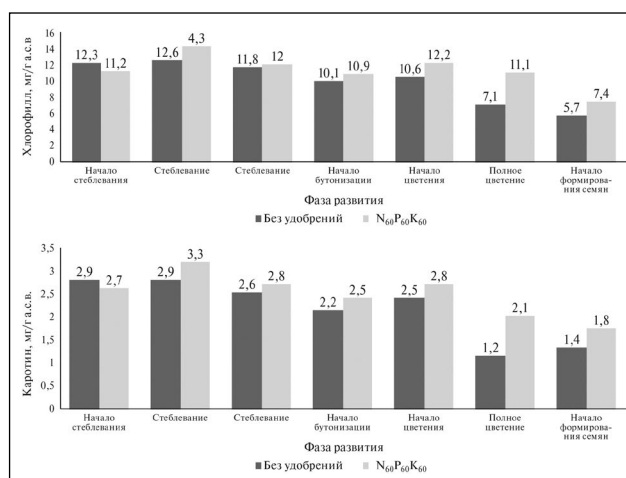


Рис. 1. Содержание хлорофилла и каротина в листьях клевера лугового.

фотометрическим методом (ГОСТ 30504-97). Урожайность яровой пшеницы учитывали сплошным методом, клевера – площадочным методом.

Результаты и обсуждение. Поглощение атмосферного углерода растениями зависит от интенсивности процессов фотосинтеза, который более активно протекает у бобовых культур с высокой ассимиляционной поверхностью листьев [8, 9]. Интенсивность накопления хлорофилла в его листьях составила 11,08...14,32 мг/г сухой массы (рис. 1). Наличие клубеньков на корневой системе бобовых способствует не только поглощению молекулярного азота, но и усиливает процесс аккумуляции растениями углекислого газа из атмосферы [8]. Высокая облиственность бобовых культур способствует увеличению ассимилирующей поверхности и сопровождается усилением процесса фотосинтеза. Площадь листовой поверхности клевера лугового в межфазный период бутонизация-цветение составляет 89 тыс. м²/га [10].

Табл. 1. Массовая доля жира, клетчатки и сахара в листьях, %

Фаза отбора	Вариант	Жир	Клетчатка	Сахар
Клевер луговой				
Начало стеблевания	без удобрений	3,7±0,6	12,5±1,6	9,8±1,2
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	3,6±0,6	8,8±1,4	9,4±1,2
Стеблевание	без удобрений	4,4±0,6	11,3±1,5	5,7±0,9
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	4,6±0,6	11,1±1,5	4,5±0,8
Стеблевание	без удобрений	4,4±0,6	10,3±1,4	5,9±0,9
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	4,6±0,6	11,4±1,5	6,8±1,0
Начало бутонизации	без удобрений	4,3±0,6	10,3±1,4	7,0±1,0
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	4,3±0,6	9,7±1,4	6,1±0,9
Начало цветения	без удобрений	4,3±0,6	10,5±1,4	5,3±0,9
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	4,4±0,6	11,5±1,5	5,7±0,9
Полное цветение	без удобрений	4,2±0,6	13,2±1,6	3,9±0,8
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	4,3±0,6	13,9±1,6	4,3±0,8
Начало формирования семян	без удобрений	4,0±0,6	11,7±1,5	4,1±0,8
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	4,0±0,6	9,5±1,4	3,4±0,7
Пшеница				
Кущение	без удобрений	3,9±0,6	18,0±1,8	14,2±1,6
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	3,8±0,6	18,0±1,8	12,4±1,4
Начало выхода в трубку	без удобрений	3,6±0,6	19,5±1,9	15,3±1,7
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	4,1±0,6	18,7±1,9	17,2±1,8
Выход в трубку	без удобрений	5,8±0,7	20,5±1,9	14,9±1,6
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	6,3±0,7	19,7±1,9	10,7±1,3
Колошение	без удобрений	6,9±0,7	21,2±2,0	8,3±1,1
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	7,5±0,7	21,2±2,0	7,2±1,0
Начало созревания	без удобрений	8,6±0,9	19,8±1,9	10,0±1,2
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	8,3±0,8	22,4±2,0	10,4±1,2
Молочная спелость	без удобрений	8,6±0,8	38,4±2,8	4,3±0,8
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	7,4±0,7	35,2±2,7	4,1±0,8

Со вступления в фазу стеблевания и до начала цветения клевера содержание хлорофилла в листьях находилось примерно на одном уровне, затем наблюдалось его снижение до 5,7 мг/г сухой массы. Аналогичная тенденция выявлена для вспомогательного пигмента – каротина, содержание которого в период стеблевания – цветения было максимальным в опыте и составило 2,2...3,3 мг/г сухой массы. Содержание углерода в листьях клевера практически не менялось в течение всего периода вегетации и находилось на уровне 40,4...45,5 %.

Содержание основных продуктов фотосинтеза – сахаров в листьях клевера лугового снижалось с 9,8 % в период стеблевания до 3,4 % к началу формирования семян (табл. 1). В процессе биосинтеза в растениях происходит трансформация простых углеводов в более сложные соединения. Содержание клетчатки в период вегетации в листьях клевера изменялось незначительно от 8,8 до 13,93 %, что связано с их постоянным обновлением. Количество жира в листьях клевера практически не менялось в зависимости от фазы развития растений.

Площадь листовой поверхности листьев пшеницы яровой намного ниже, чем у клевера лугового, и составляет по данным [11] от 6,1 до 29, 7 тыс. м²/га. Наиболее интенсивно накопление хлорофилла листьями пшеницы происходило с фазы кущения до начала созревания и составляло 9,14...11,90 мг/г сухой массы (рис. 2). Вертикальное расположение листьев пшеницы способствовало поглощению ФАР на уровне близком к посевам клевера лугового. Резкое падение содержания хлорофилла отмечали в фазе молочной спелости. Количество каротина в листьях пшеницы в течение вегетационного периода было в 2,5...4,3 раза ниже, чем сумма хлорофилла А и В. Содержание углерода практически не менялось и находилось на уровне 40,4...43,9 %.

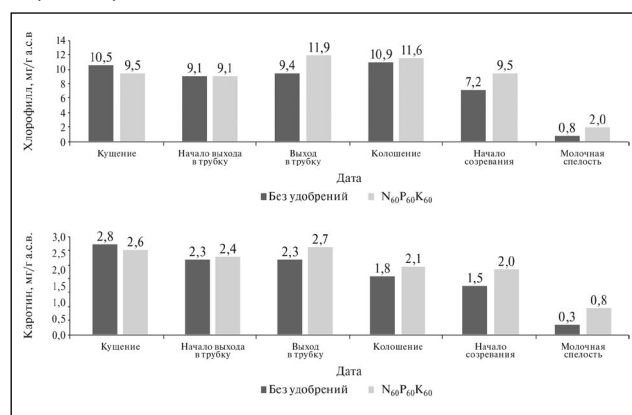


Рис. 2. Содержание хлорофилла и каротина в листьях яровой пшеницы.

Уровень минерального питания растений влияет на содержание фотосинтетических пигментов и вследствие этого на интенсивность фотосинтеза и аккумуляцию CO₂. Проведенные в полевых условиях исследования на клевере луговом и яровой пшенице выявили несущественные различия между содержанием хлорофилла и каротина в вариантах с внесением минеральных удобрений и без их использования, что связано с засушливым периодом вегетации культур и последствием удобрений на клевере.

Наибольшее суммарное содержание сахаров отмечали в фазе начала выхода в трубку пшеницы: без удобрений – 15,3 %, при внесении NPK по 60 кг д.в./га – 17,2 % (см. табл. 1). При этом другие исследователи

отмечали максимальное содержание сахаров в растениях пшеницы в фазе кущения [12].

Растения используют сахара для синтеза высокомолекулярных органических соединений, в частности, белков, жиров и углеводов. Резкое снижение содержания сахара в листьях пшеницы в фазе молочной спелости (в 2,3...2,5 раз), по сравнению с началом созревания, свидетельствует об использовании сахаров на формирование трудногидролизуемых углеводов (клетчатка) и жиров. Внесение минеральных удобрений в дозе N₆₀P₆₀K₆₀ привело к снижению содержания сахара в листьях пшеницы во все фазы ее роста, кроме фазы «начало выхода в трубку». Количество клетчатки в листьях пшеницы к фазе формирования зерна возросло, по сравнению с началом созревания, в 2,1 раза, жира – в 2,3 раза. Минеральные удобрения не оказали значимого влияния на величины этих показателей, различия по вариантам опыта наблюдали только в фазе молочной спелости зерна.

Наибольшее содержание азота в листьях клевера лугового (2,9...3,9 %) отмечали в период стеблевания – полное цветение (рис. 3а). Достоверные различия по вариантам опыта отмечали только в фазе полного цветения клевера: N₆₀P₆₀K₆₀ – 3,4 %, без удобрений – 2,9 %. Содержание фосфора в листьях клевера постепенно убывало с 0,7 % в фазе начала стеблевания до 0,3 % при формировании семян. Достоверных различий по вариантам опыта не выявлено. Для калия наблюдали аналогичную тенденцию постепенного снижения к концу вегетации, при этом в варианте с применением минеральных удобрений содержание K₂O в листьях клевера лугового было несколько выше, чем без удобрений, однако различия не всегда были доказуемы.

Листья яровой пшеницы до фазы молочной спелости характеризовались высоким содержанием азота (2,6...3,4 %), при этом значимые различия между вариантами были выявлены только в начале выхода в трубку, когда на фоне внесения N₆₀P₆₀K₆₀ оно было

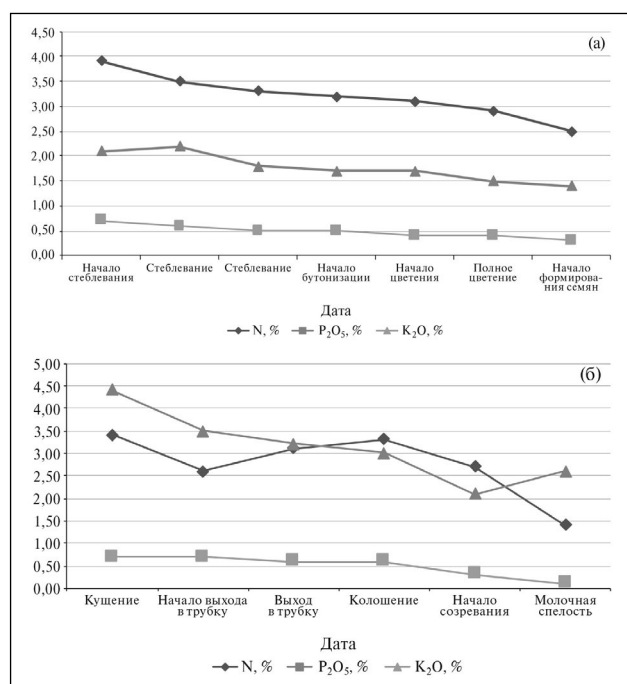


Рис. 3. Содержание элементов минерального питания в листьях, % от воздушно сухой массы: а) клевер луговой; б) яровая пшеница.

больше, чем в варианте без удобрений, на 0,4 %. Содержание калия в листьях пшеницы при использовании минеральных удобрений варьировало от 2,3 до 5,3 %, без удобрений – от 2,1 до 4,4 %. Значимые различия были выявлены в фазы кущение – выход в трубку. В фазе начала созревания пшеницы отмечали наименьшее содержание калия по вариантам опыта – 2,1...2,7 %. Содержание фосфора по вариантам опыта и фазам развития растений изменялось незначительно и находилось в интервале 0,5...0,7 % (рис. 3б).

Концентрация основных элементов минерального питания в сухой биомассе изучаемых культур перед уборкой зависела от анализируемой части и вида растения (табл. 2). Содержание азота в зеленой массе клевера не зависело от условий минерального питания и находилось на уровне 1,95...2,16 %. в пожнивно-корневых остатках клевера оно было в 1,4...1,6 раза меньше, чем в зеленой массе. По количеству фосфора в зеленой массе и ПКО растения клевера по вариантам опыта практически не различались. Содержание калия в зеленой массе было в 1,4...1,6 раз выше, чем в ПКО, а в варианте $N_{60}P_{60}K_{60}$ – в 1,3 больше, чем без удобрений.

Табл. 2. Элементы питания в различных частях растений перед уборкой, % от воздушно сухой массы

Вариант	Часть растения	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Клевер луговой, без удобрений	зеленая масса	1,95±0,17	0,31±0,06	1,70±0,19
	ПКО	1,38±0,22	0,25±0,04	1,24±0,15
Клевер луговой, $N_{60}P_{60}K_{60}$	зеленая масса	2,16±0,49	0,31±0,12	2,21±0,33
	ПКО	1,35±0,11	0,28±0,06	1,40±0,15
Пшеница яровая, без удобрений	солома	1,31±0,16	0,34±0,05	1,64±0,17
	ПКО	0,53±0,09	0,13±0,02	1,10±0,24
Пшеница яровая, $N_{60}P_{60}K_{60}$	зерно	1,70±0,12	0,29±0,04	0,52±0,04
	солома	1,57±0,11	0,33±0,04	2,00±0,47
	ПКО	0,67±0,15	0,17±0,04	1,39±0,22
	зерно	2,20±0,38	0,37±0,06	0,60±0,05

Результаты анализа различных частей пшеницы свидетельствуют, что максимальное в опыте содержание азота в зерне накапливалось при внесении минеральных удобрений – 2,20 %, калия было больше в соломе, фосфора – в зерне и соломе. Использование минеральных удобрений способствовало увеличению содержания азота и калия в зерне, соломе и ПКО пшеницы. Накопление азота в зеленой массе клевера было выше, чем в соломе яровой пшеницы, в 1,4...1,5 раз, в пожнивно-корневых остатках клевера – в 2,0...2,6 раза больше, по сравнению с ПКО пшеницы.

Табл. 3. Урожайность (среднее по двум закладкам за 6 ротаций севооборота) и аккумуляция углерода за вегетационный период

Вариант	Часть растения	Урожайность, т/га	Содержание углерода, %	Накопление углерода, т/га	Аккумуляция углерода и CO ₂ , т/га	
					C	CO ₂
Клевер луговой						
Без удобрений	зеленая масса	2,3±0,4	42,0±0,19	0,97	2,26	8,09
	ПКО	3,2±0,6	40,4±0,35	1,29		
$N_{60}P_{60}K_{60}$	зеленая масса	2,4±0,7	43,5±0,33	1,05	2,42	8,66
	ПКО	3,4±0,5	40,6±0,26	1,37		
Пшеница яровая						
Без удобрений	солома	1,3±0,7	44,3±0,28	0,57	1,49	5,33
	ПКО	0,9±0,6	41,7±0,60	0,36		
	зерно	1,3±0,8	42,8±0,38	0,56		
$N_{60}P_{60}K_{60}$	солома	1,9±0,9	42,0±0,30	0,80	1,93	6,90
	ПКО	1,1±0,5	40,4±0,72	0,44		
	зерно	1,6±0,6	42,0±0,56	0,69		

Фотосинтез – ведущий фактор формирования урожая возделываемых культур. Основной показатель продуктивности растений – накопление сухой массы. С учетом средней урожайности культур за шесть ротаций восьмипольного севооборота посевы клевера лугового аккумулировали за вегетационный период в варианте $N_{60}P_{60}K_{60}$ 2,42 т/га углерода, или 8,66 т/га углекислого газа, что в 1,07 раза больше, чем без применения удобрений. Улучшение условий минерального питания оказывало большее влияние на секвестрацию атмосферного углерода посевами яровой пшеницы: аккумуляция углекислого газа из атмосферы достигала 1,93 т/га углерода, или 6,90 т/га CO₂ при 1,49 т/га C (5,33 т/га CO₂) в варианте без удобрений (табл. 3).

В варианте без удобрений содержание органического углерода в почве к концу 5 ротации севооборота уменьшилось на 13 %, внесение $N_{60}P_{60}K_{60}$ способствовало поддержанию величины этого показателя на уровне близком к исходному (1,28 %) [13]. Минеральные удобрения в последствии на клевере луговом не оказали значимого влияния на урожайность культуры и накопление пожнивно-корневых остатков, количество ПКО после уборки клевера лугового 2 года пользования составило в среднем за год 3,2...3,4 т/га. Урожайность зерна яровой пшеницы в варианте $N_{60}P_{60}K_{60}$ составила в среднем 1,6 т/га, соломы – 1,9 т/га, что соответственно в 1,2 и 1,5 раз выше, чем в варианте без удобрений. По количеству ПКО различия были несущественными.

Выводы. Наиболее активно процесс фотосинтеза в посевах клевера лугового протекает в период стеблевания – начало цветения, содержание хлорофилла составило 11,1...14,3 мг/г сухой массы. Для яровой пшеницы сумма хлорофилла А и В в период кущения – начало созревания составила 9,1...11,9 мг/г сухой массы. Содержание каротина в листьях растений было в 3...4 раза ниже, чем хлорофилла, динамика его изменения в различные периоды роста культур была аналогичной динамике хлорофилла.

Содержание углерода в листьях растений в период вегетации практически не менялось и составляло 40,4...43,5 %. Концентрация сахаров в листьях клевера лугового уменьшилась с 9,4 в фазе стеблевания до 3,4 % в фазе формирования семян, яровой пшеницы – с 15,3 в фазе выхода в трубку до 4,1 % в фазе молочной спелости, уровень клетчатки в листьях возрастал соответственно от 8,8 до 13,2 % и с 18,0 до 38,4 %. Содержание жира в листьях клевера и пшеницы имело тенденцию к росту с увеличением биологической продуктивности растений.

Содержание азота, фосфора и калия в листьях клевера лугового и яровой пшеницы в процессе вегетации растений снижалось. Действие и последствие минеральных удобрений ($N_{60}P_{60}K_{60}$) не оказывало значимого влияния на накопление основных минеральных элементов. Максимальное в опыте содержание азота в листьях клевера (3,1...3,9 %) отмечено в период стеблевания – начало цветения, высокое количество калия (3,0...4,4 %) в листьях яровой пшеницы в период кущения – колошение, содержание фосфора в течение вегетации изменялось незначительно.

Наибольшее количество углерода, поглощенного в процессе фотосинтеза за вегетационный период, отмечено в варианте $N_{60}P_{60}K_{60}$. Для клевера лугового оно составило 2,42 т/га (8,66 т/га CO₂), для яровой пшеницы – 1,93 т/га (6,90 т/га CO₂).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета «Пермского НИИСХ»-филиала ПФИЦ УрО РАН.

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. Кудеяров В. Н., Заварзин Г. А., Благодатский С. А. и др. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
2. Шарков И. Н., Антипина П. В. Некоторые аспекты углерод-секвестрирующей способности пахотных почв // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. № 2. С. 1–7. doi: 10.7868/S0002188118020011
3. Никитин С. Н. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах и динамика ростовых процессов при применении биологических препаратов // Успехи современного естествознания. 2017. № 1. С. 33–38.
4. Перспективы выращивания высокотравных растений в качестве углероддепонирующих культур / Е. П. Артемьева, В. В. Валдайских, Т. А. Радченко и др. // Аграрный вестник Урала. 2022. № 12(227). С. 2–10. doi:10.32417/1997-4868-2022-227-12-2-10.
5. Сычев В. Г., Шевцова Л. К., Мерзлая Г. Е. Исследование динамики и баланса гумуса при длительном применении систем удобрения на основных типах почв // Агрохимия. 2018. № 2. С. 3–16. doi:10.7868/S0002188118020011.
6. Кудеяров В. Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (Аналитический обзор) // Почвоведение. 2018. № 6. С. 643–658. doi:10.1134/S1064229318060091.
7. Лобков В. Т., Наполова Г. В. Способ определения хлорофилла в растениях гречихи: Пат. 2244916 РФ. 2005. № 2. С. 1–4.
8. Эседулаев С. Т. Многолетние травы и их смеси – важнейший фактор повышения плодородия почв и продуктивности пашни в Верхневолжье // Плодородие. 2022. № 6. С. 59–63. doi: 10.25680/S19948603.2022.129.16
9. Благовещенский Г. В., Конанчук В. В., Тимошенко С. М. Углеродная секвестрация в травяных экосистемах // Кормопроизводство. 2019. № 9. С. 17–21.
10. Касанкина Н. И. Особенности фотосинтетической деятельности клевера лугового тетраплоидного в условиях Среднего Предуралья // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (65). С. 58–60.
11. Сульдин Д. А., Еряшев А. П., Камарихин В. Е. Фотосинтетическая деятельность и продуктивность яровой пшеницы в зависимости от сроков и кратности применения регуляторов роста и гуминовых удобрений // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 31 (37). С. 49–53. doi: 10.18286/1816-4501-2018-1-49-53
12. Пасынкова Е. Н., Завалин А. А., Пасынков А. В. Содержание сахаров и общего азота в яровой пшенице по фазам вегетации как диагностических показателей функционального состояния растений // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 1. С. 8–10.
13. Васбиева М. Т., Завьялова Н. Е., Шишков Д. Г. Изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы при длительном применении азотных, фосфорных и калийных удобрений в условиях Предуралья // Почвоведение. 2022. № 11. С. 1415–1425. doi: 10.31857/S0032180X22110132.

Поступила в редакцию 23.01.2024
 После доработки 14.02.2024
 Принята к публикации 22.03.2024

Зоотехния и ветеринария

УДК 636.03:575

DOI 10.31857/S2500262724020108 EDN GSPFUU

ОЦЕНКА ГЕНЕТИЧЕСКОГО СХОДСТВА НОВОАЛТАЙСКОЙ ПОРОДЫ ЛОШАДЕЙ С ИСХОДНЫМИ ПОРОДАМИ ПО МИКРОСАТЕЛЛИТНЫМ ЛОКУСАМ ДНК**А. В. Дубровин, Н. В. Блохина**, доктор сельскохозяйственных наук,
А. В. Борисова, кандидат сельскохозяйственных наук*Всероссийский научно-исследовательский институт коневодства,
391105, Рязанская обл., Рыбновский р-н, пос. Дивово, п/о Институт коневодства
E-mail: alexander.dubrovin45@yandex.ru*

Исследования проводили с целью сравнительной оценки аллелофонда новоалтайской породы лошадей и пород, участвовавших в её создании. В экспериментальную выборку было включено 5736 лошадей, в том числе 363 новоалтайской породы, 39 алтайской, 159 литовской тяжелоупряжной, 617 русской тяжеловозной, 288 советской тяжеловозной, 4177 орловской рысистой, 93 будённовской. Выполняли генетико-популяционный анализ с определением следующих показателей: общее число аллелей в 17 локусах, среднее число аллелей на locus, уровень полиморфности, наблюдаемая и ожидаемая гетерозиготность, коэффициенты внутрипопуляционного инбридинга, генетического сходства и генетических дистанций. Наибольшим уровнем генетического разнообразия (154 аллеля) и полиморфности ($A_e=4,909$) характеризовались лошади новоалтайской породы. Анализ генетической дифференциации показал отсутствие внутрипопуляционного инбридинга в группах алтайской, литовской тяжелоупряжной и будённовской пород. Когорты животных новоалтайской, орловской рысистой, русской и советской тяжеловозных пород отличались незначительным дефицитом гетерозигот. Для лошадей новоалтайской и тяжеловозных пород характерна высокая частота встречаемости аллеля HTG6 O, алтайской породы – HTG4 M. У новоалтайской лошади выявлен ряд локусов, идентичных по спектру аллелей с алтайской, русской и советской тяжеловозными породами. Кластерный анализ продемонстрировал высокий уровень генетического сходства лошадей новоалтайской породы с русской тяжеловозной (0,903) и алтайской (0,899) породами. с использованием новых сведений о лошадях изученных семи пород, позволяющих контролировать биоразнообразие и генетическое сходство популяций, сохранение оригинальности и гетерогенности аллелофонда лошадей разных пород, можно усовершенствовать селекционные программы в коневодстве.

ASSESSMENT OF THE GENETIC SIMILARITY BETWEEN THE NOVOALTAISKAYA HORSE BREED AND THE ORIGINAL BREEDS BY MICROSATELLITE DNA LOCI**A. V. Dubrovin, N. V. Blohina, A. V. Borisova***The All-Russian Research Institute for Horsebreeding
391105, Ryazanskaya obl., Rybnovskij r-n, pos. Divovo, p/o Institut konевodstva
E-mail: alexander.dubrovin45@yandex.ru*

The research was carried out for the purpose of a comparative assessment of the allele pool of the Novoaltayskaya horse breed and the breeds that participated in its creation. The experimental sample included 5736 horses, including: Novoaltayskaya breed – 363, Altai – 39, Lithuanian Heavy Draft – 159, Russian Heavy Draft – 617, Soviet d Heavy Draft – 288, Orlov trotter – 4,177, Budenny – 93. Population genetic analysis was performed using generally accepted methods. The following indicators were determined: the total number of alleles at 17 loci, the average number of alleles per locus, the level of polymorphism, observed and expected heterozygosity, coefficients of intrapopulation inbreeding, genetic similarity and genetic distances. It was established that horses of the Novo-Altai breed had the highest level of genetic diversity (154 alleles) and polymorphism ($A_e = 4,909$). Analysis of genetic differentiation showed the absence of intrapopulation inbreeding in the groups of Altai, Lithuanian Heavy Draft and Budenny breeds. Groups of horses of the Novoaltayskaya, Orlov trotter, Russian Heavy Draft and Soviet Heavy Draft breeds were distinguished by a slight deficiency of heterozygotes. It has been established that horses of the Novoaltayskaya and Heavy Draft breeds are characterized by a high frequency of occurrence of the HTG6 O allele, and the Altai breed is characterized by a high frequency of occurrence of the HTG4 M allele. A number of loci of alleles identical in spectrum to those of the Altai, Russian Heavy Draft and Soviet Heavy Draft breeds were identified in the Novoaltayskaya horse. Cluster analysis demonstrated a high level of genetic similarity of horses of the Novoaltayskaya breed with the Russian Heavy Draft (0,903) and Altai (0,899) breeds. As part of the study, using molecular genetic markers, new data was obtained on horses of seven breeds, with the help of which it is possible to improve breeding programs in horse breeding, allowing to control the biodiversity and genetic similarity of populations, preserving the originality and heterogeneity of the allele pool of horses of different breeds.

Ключевые слова: лошади, новоалтайская порода, тяжело-возные породы, алтайская порода, аллелофонд, генетическое сходство, микросателлиты ДНК.

Key words: horses, Novoaltayskaya bree, heavy draft breeds, Altai breed, allele pool, genetic similarity, DNA microsatellites.

В последние годы наблюдается общемировая тенденция увеличения производства конины, обусловленная потребностью населения в экологически безопасных в медико-биологическом отношении продуктах [1]. Конина выгодно отличается от мяса других сельскохозяйственных животных, как легкоусвояемый продукт она обладает диетическими свойствами и практически не содержит аллергенные аминокислоты [2, 3].

В России одной из перспективных специализированных мясных пород лошадей считают новоалтайскую, выведенную коллективом сотрудников ВНИИ коневодства и специалистов хозяйств Алтайского края и Республики Алтай. В результате целенаправленной селекционной работы была сформирована генетическая структура породы, в значительной мере определяющая высокую продуктивность животных при их хорошей адаптации

к круглогодичному пастбищному содержанию [4, 5].

Генетическая структура породы первоначально обусловлена генофондом исходного материала и различными факторами породообразовательного процесса [6]. Оценку генного разнообразия и мониторинг генетической изменчивости популяций на современном этапе преимущественно осуществляют посредством молекулярно-генетических методов. Среди наиболее информативных методик анализа аллелофонда лошадей мировых пород современные публикации рассматривают следующие: полногеномное и таргетное секвенирование генома на платформе Illumina, использование SNP-чипов, анализ микросателлитов, секвенирование D-петли митохондриальной ДНК, анализ Y-хромосомы [7, 8].

Микросателлиты относят к первому поколению ДНК-маркеров [9]. Высокополиморфный характер и менделеевский тип наследования делает их идеальными ДНК-маркерами генома сельскохозяйственных животных [10].

На сегодняшний день микросателлиты – наиболее популярные маркеры в исследованиях генетических характеристик лошадей, что можно объяснить простотой применения и высокой информативностью [11, 12, 13]. Они служат эффективным средством изучения особенностей генофонда, генетического полиморфизма, филогенеза, получения данных о породообразовании и эволюции пород лошадей [14, 15]. Оценка генетического разнообразия внутри отдельных породных групп и целых пород позволяет создавать и совершенствовать как селекционные программы, так и программы по сохранению генофонда этих пород [8].

Полиморфизм лошадей различных заводских и аборигенных пород описан в многочисленных работах отечественных и зарубежных исследователей. Первоначально внимание учёные обращали на местные малочисленные породы лошадей. Так, российскими исследователями посредством анализа микросателлитов ДНК был изучен генофонд, состав популяций и филогенетические связи таких уникальных отечественных аборигенных пород лошадей, как тувинская [17], якутская [18], мезенская [19], кабардинская [20], вятская [21] и др.

Учитывая, что новоалтайская порода лошадей выведена методом сложного воспроизводительного скрещивания улучшенных местных алтайских кобыл с жеребцами ряда тяжеловозных пород, цель нашего исследования – определить индекс генетического сходства между исходными и новой породами на основе сравнительного анализа их аллелофонда по микросателлитным локусам ДНК, что позволит в дальнейшем усовершенствовать метод линейного разведения в породе, включая генетическую оценку степени дифференциации генеалогической структуры породы, и определить генетическое сходство с родоначальником.

Методика. Исследования проводили на базе лаборатории генетики ФГБНУ «ВНИИ коневодства». Объект исследования – лошади новоалтайской, алтайской, орловской рысистой, будённовской, литовской тяжёлоупряжной, русской и советской тяжеловозных пород. Материалом для исследования послужили пробы волосяных луковиц 5736 лошадей, в том числе 363 новоалтайской породы, 39 алтайской, 159 литовской тяжёлоупряжной, 617 русской тяжеловозной, 288 советской тяжеловозной, 4177 орловской рысистой, 93 будённовской.

Выделение ДНК из волосяных луковиц проводили с использованием реагентов «ExtraGene™ DNA Prep 200» (ООО «Лаборатория Изоген», Россия). Образцы ДНК генотипировали по 17 микросателлитным локусам: *VHL20*, *HTG4*, *AHT4*, *HMS7*, *HTG6*, *AHT5*, *HMS6*, *ASB23*, *ASB2*,

HTG10, *HTG7*, *HMS3*, *HMS2*, *ASB17*, *LEX3*, *HMS1*, *CA425*. Амплификацию ДНК осуществляли методом полимеразной цепной реакции (ПЦР) с использованием 17-плексного набора праймеров для генотипирования лошадей StockMarks® в амплификаторе 2720 Thermal Cycler в соответствии с рекомендациями производителя. Разделение и детекцию продуктов амплификации выполняли методом капиллярного электрофореза на секвенаторах «ABI 3130» (Applied Biosystems) и «НАНОФОР 05» (ООО «Синтол», г. Москва). Идентификацию результатов проводили с использованием профиля контрольной ДНК и данных международных сравнительных испытаний (Horse Comparison Test). Генетико-популяционный анализ выполняли с использованием общепринятых методик и программного обеспечения Microsoft Excel 2010. Определяли следующие показатели: общее число аллелей в 17 локусах (Na), среднее число аллелей на локус (Nv), уровень полиморфности (Ae), наблюдаемая (Ho) и ожидаемая (He) гетерозиготность, коэффициенты внутривидового инбридинга (Fis), генетического сходства и генетических дистанций. Кластерный анализ проводили с использованием программы Statistica 12.

Результаты и обсуждение. Сравнительный анализ аллелофонда новоалтайской породы с породами, участвовавшими в её создании, по основным генетико-популяционным характеристикам показал (табл. 1), что лошади этой породы обладают наибольшим уровнем генетического разнообразия (154 аллеля), наименьшим оно было у будённовской породы (119 аллелей). Остальные породы характеризуются относительно близкими величинами этого показателя, которые варьировали от 127 до 138 аллелей.

Сравнение обобщающих показателей продемонстрировало лидерство новоалтайской породы и по эффективному числу аллелей (Ae=4,909). На близком уровне она была у лошадей алтайской породы (Ae=4,750). Наименьший уровень полиморфности отмечен у русской тяжеловозной породы (Ae=3,667).

Табл. 1. Характеристика новоалтайской породы лошадей и пород, участвовавших в её создании, по 17 локусам микросателлитов ДНК

Порода	n ¹	Na	Nv	Ae	He	Ho	Fis
Новоалтайская	363	154	9,059	4,909	0,756	0,754	0,005
Алтайская	39	134	7,882	4,750	0,759	0,772	-0,020
Литовская	159	134	7,882	3,960	0,724	0,728	-0,004
тяжёлоупряжная							
Русская	617	138	8,118	3,667	0,689	0,674	0,015
тяжеловозная							
Советская	288	129	7,588	3,871	0,697	0,694	0,004
тяжеловозная							
Орловская	4177	127	7,471	3,748	0,702	0,700	0,003
рысистая*							
Будённовская*	93	119	7,000	3,793	0,713	0,722	-0,013

¹n – количество голов; Na – общее число аллелей в 17 локусах; Nv – среднее число аллелей на локус; Ae – уровень полиморфности; Ho – наблюдаемая гетерозиготность; He – ожидаемая гетерозиготность; Fis – коэффициент внутривидового инбридинга; *породы лошадей, использованные в соответствии с планом породного районирования в качестве улучшителей местных лошадей Алтая.

Наибольшая степень ожидаемой гетерозиготности установлена у алтайской (He=0,759) и новоалтайской пород (He=0,756), наименьшая – у русской тяжеловозной (He=0,689). В алтайской, литовской тяжёлоупряжной и будённовской породах наблюдаемая гетерозиготность превышала ожидаемую, что свидетельствует о преобладании гетерозиготных генотипов и отсутствии внутривидового инбридинга. Коэффициент Fis у лошадей новоалтайской, орловской рысистой, русской

Табл. 2. Спектр аллелей 17 локусов микросателлитов ДНК лошадей новоалтайской породы и пород, участвовавших в её создании

Локус	Новоалтайская порода		Алтайская порода		Тяжеловозные породы					
	p>0,05	p<0,05	p>0,05	p<0,05	советская		русская		литовская	
					p>0,05	p<0,05	p>0,05	p<0,05	p>0,05	p<0,05
VHL20	I, M, N, O, P, Q, R	J, L	I, L, M, N, P, Q, R	O	I, M, N, O, P, Q, R	J, L	I, J, M, O, P, Q, R	L, N	I, L, M, N, O, P	H*, J, Q, R
HTG4	K, L, M, O, P	N, Q	K, L, M, O	N, P, Q	L, M, P	K, N, O	L, M, O, P	K, R*	K, L, M, O, P	
АНТ4	H, I, J, K, O	L, M, N, P, R	H, J, K, N, O	I, L	H, J, K, O	I, L, M, N, P	H, J, K, O	I, L, M, N, P, R	H, J, O	I, K, R
HMS7	J, L, M, O	I*, K, Q	J, K, L, N, O	M, Q	K, L, M, N	J, O, Q	J, L, M, N, O, Q	G*, K, P*	J, L, M, N	K, O, Q
HTG6	G, J, O	I, M, N, P	G, J, O	I, M, P	O	G, I, J, N	I, O	G, J, N	G, J, O, P	I, L*, M, N
АНТ5	J, K, L, M, N, O	I, P	J, K, L, M, N, O	P	J, K, M, O	I, L, N	J, K, L, M, N, O	I	J, K, N, O	I, L, M
HMS6	K, L, M, O, P	N	K, L, M, O, P	N	L, M, P	K, N, O	L, O, P	K, M, Q	L, M, O, P, Q	I*, K, N
ASB23	I, J, K, L, S, U	G, H*, M, Q*, R, T, V*	I, J, K, L, S, U	M, R, T	J, K, L, S, U	I, T	K, S, U	G, I, J, L, R	I, K, L, S, T, U	G, J
ASB2	I, K, M, N, Q	B, J*, O, P, R, T*	B, C, K, M, N, O, Q	I, L*, P, R	I, K, M, N, O, Q	C, P, R	I, K, M, N	O, P, Q	I, K, M, N, Q	
HTG10	K, L, M, N, O, R	I, J, P, Q, S, T	I, K, L, M, O, R, S	N, Q	L, M, N, O	I, K, Q, R, S	K, M, N, O	I, J, L, P, Q, R, S, T	K, L, M, O, R	I, P, Q, S
HTG7	K, M, N, O		K, M, N, O		K, M, N, O	P	K, M, N, O		K, M, N, O	L*, P, R*
HMS3	I, M, N, O, P, Q, R		I, M, N, O, P, Q	R	P, Q	I, M, N, O, R	N, P, Q, R	H*, I, M, O	M, P, Q, R	L*, N, O
HMS2	H, I, K, L, P, R, S*	J, M, N, O	H, I, K, L, R	M, O, T*	H, I, K, L, R	J, M	H, I, K, M	J, L, N, O, P, R	H, K, R	F*, I, J, L, M, N, Q*
ASB17	F, I, M, N, P, Q, R, S	D*, G, H, J, K, L, O, T	G, H, I, N, Q, R, W*	F, K, L, M, O, P, S, V*	I, M, N, P, Q, R	F, G, H, J, K, L, O, S	F, L, M, N, Q, R	G, H, I, J, K, P, S, T	F, M, N, P, R, T	I, J, K, L, O, Q, S
LEX3	F, H, I, L, M, N, O, P	G*, K	F, H, K, L, M, N	I, J, O	F, H, L, M, O, P	I, K, N	L, M, N, O, P	F, H, I, K	F, I, L, M, N, P	H, J, K, O
HMS1	I, J, M	K, L, N, O, Q*	J, L, M, N	I, O	J, K, M	I, L, N	J, K, M	I, L, N	I, J, L, M	K, N
CA425	J, L, M, N, O	F, G, I, K	F, G, M, N, O	I, L	J, L, M, N, O	G, I	J, M, N	G, I, K, L, O, J, L, M, N, O	F, G, K	

* аллели, отсутствующие у исследованного поголовья других анализируемых пород.

и советской тяжеловозных пород имел положительное значение близкое к равновесию по Харди-Вайнбергу (HWE), что указывает на незначительное смещение генетического баланса в сторону избытка гомозигот. в целом полученные данные свидетельствуют об эффективности селекционных мероприятий по поддержанию генетического разнообразия в исследованных породах.

Результаты анализа генетической структуры новоалтайской породы и пород, непосредственно участвовавших в её создании, свидетельствуют о том, что каждая из них отличается спектром, частотой встречаемости аллелей и набором аллелей, отсутствующих у лошадей других анализируемых пород (табл. 2). При этом следует отметить, что в некоторых локусах животных новоалтайской породы обнаружен одинаковый набор аллелей с алтайскими лошадьми (HTG4, HMS6, HTG7, HMS3), русскими (VHL20, АНТ4, HTG10, HTG7) и советскими (VHL20, HMS6, HMS3) тяжеловозами.

Генетическая структура новоалтайской и изученных тяжеловозных пород включает аллели, которые не встречаются у лошадей алтайской породы: VHL20 J, HTG6 N, АНТ5 I, HMS2J, LEX3 P, HMS1 K, CA425 J. Кроме того, эти породы характеризуются высокой частотой встречаемости аллеля HTG6 O: у новоалтайской – 0,793, у литовской тяжёлоупряжной – 0,626, у советской тяжёлоупряжной – 0,956, у русской тяжёлоупряжной – 0,782. У представителей алтайской породы наиболее часто встречается аллель HTG4 M (0,667). Генетическая структура алтайской и новоалтайской пород включает такие аллели, отсутствующие у всего исследованного поголовья тяжеловозных пород, как АНТ5 P, ASB23 M, ASB2 B, HMS1 O.

В локусе LEX3 у лошадей новоалтайской породы было выявлено 10 аллелей, при этом 9 из них обнару-

жены у всех анализируемых пород, что указывает на их общую материнскую основу. При этом новоалтайская порода выделялась наличием аллеля LEX3 G (0,020).

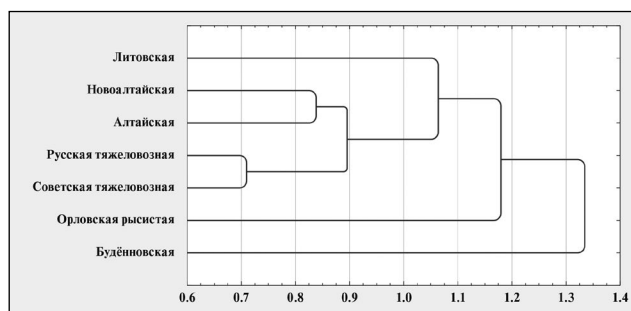
Коэффициенты генетического сходства между новоалтайской породой и породами, участвовавшими в её создании, варьировали в интервале 0,709...0,903 (табл. 3). Самые высокие коэффициенты генетического сходства отмечены с русской тяжёлоупряжной (0,903) и алтайской (0,899) породами, наименьший – с будённовской породой (0,709).

Табл. 3. Коэффициенты генетического сходства и генетических дистанций у новоалтайской породы лошадей с породами, участвовавшими в её создании

Порода	Коэффициент	
	генетического сходства	генетических дистанций
Русская тяжеловозная	0,903	0,097
Алтайская	0,899	0,101
Советская тяжеловозная	0,871	0,129
Литовская тяжёлоупряжная	0,852	0,148
Орловская рысистая	0,815	0,185
Будённовская	0,709	0,291

Генетические различия между изученными породами лошадей по 17 STR-локусам подтверждают генетические расстояния, которые варьировали в диапазоне 0,097...0,291. Дендрограмма демонстрирует отчётливое разделение кластеров (см. рисунок). Самые близкие генетические дистанции отмечены для лошадей русской и советской тяжеловозных пород, что объясняется участием советского тяжеловоза в качестве улучшающей породы при совершенствовании русского тяжеловоза. Во второй кластер входят новоалтайская и алтайская породы. Оба кластера связаны генетическим родством.

Наиболее удалена от новоалтайской породы литовская тяжёлоупряжная, что вызвано менее широким использованием жеребцов этой породы (19 голов), по сравнению с жеребцами русской тяжеловозной (57 голов) при создании новоалтайской породы [22], а также отказом от прилития их крови при дальнейшем совершенствовании новой породы в виду низких приспособительных качеств к суровым условиям экстенсивного содержания на территории Западной Сибири. Наибольшей генетической дивергенцией, по отношению к новоалтайской породе, отличаются группы лошадей орловской рысистой и будённовской пород. Объяснением этому факту служит то, что жеребцов этих пород использовали в соответствии с планом породного районирования в качестве улучшателей местных лошадей Алтая, но непосредственно в создании новоалтайской породы не задействовали.



Дендрограмма генетических дистанций между лошадьми новоалтайской породы и породами, участвовавшими в её создании.

Близкие к нашим результатам были получены другими исследователями [23], выявившими по полиморфным системам крови, что новоалтайская порода имеет наиболее высокую степень генетического сходства с русской тяжеловозной породой (0,970).

Л. А. Храброва и Н. В. Блохина [24] в результате сравнительной оценки аллелофонда новоалтайской лошади с породами, участвовавшими в её создании, по 17 локусам микросателлитов ДНК, как и мы, установили, что новоалтайская порода обладает более широким спектром аллелей и уровнем полиморфности, а также характеризуется наиболее высокими показателями генетического сходства с алтайской лошадью (0,879) и русским тяжеловозом (0,876). При этом между результатами исследований имеются расхождения по всем основным генетико-популяционным характеристикам, рассчитанным для анализируемых пород (табл. 4).

Результаты сравнения данных различных авторов наглядно демонстрируют минимальное расхождение по уровню наблюдаемой гетерозиготности для лошадей русской тяжеловозной породы (0,30 %). Близкое к этому значение получено по уровню ожидаемой гетерозиготности у новоалтайской породы (0,40 %). Наиболее высокой расхождение зафиксировано по общему числу аллелей, идентифицированных в 17 локусах, у лошадей литовской тяжёлоупряжной породы (30,10 %). Кроме того, в этой породе отмечены наибольшие различия по всем остальным параметрам, за исключением среднего числа аллелей на один локус. Во многом это объясняется тем, что сопоставляемые исследования проводили на животных территориально разобщённых популяций и в разные временные периоды с промежутком около 20 лет. Кроме этого, R. Juras, E. G. Cothran изучали генетическую характеристику литовской тяжёлоупряжной породы на малом количестве лошадей и по 15, а не по 17 микросателлитным локусам ДНК.

Табл. 4. Генетико-популяционные параметры пород лошадей по микросателлитам ДНК, полученные разными авторами

Параметр	Коллектив авторов	Новоалтайская порода	Алтайская порода	Тяжеловозные породы		
				русская	советская	литовская
n	I*	-	-	-	-	24
	II	98	29	71	51	-
	III	363	39	617	288	159
Na	I	-	-	-	-	103
	II	146	126	121	121	-
	III	154	134	138	129	134
Расхождение, %						
Nv	I	-	-	-	-	7,250
	II	8,590	7,410	7,120	7,120	-
	III	9,294	7,882	8,118	7,588	7,882
Расхождение, %						
Ae	I	-	-	-	-	4,725
	II	4,780	4,447	3,753	4,001	-
	III	4,909	4,750	3,667	3,871	3,960
Расхождение, %						
He	I	-	-	-	-	0,795
	II	0,753	0,745	0,705	0,720	-
	III	0,756	0,759	0,689	0,697	0,724
Расхождение, %						
Ho	I	-	-	-	-	0,792
	II	0,773	0,749	0,676	0,723	-
	III	0,754	0,772	0,674	0,694	0,728
Расхождение, %						
Fis	II	-0,026	-0,004	0,036	-0,003	-
	III	0,005	-0,020	0,015	0,004	-0,004

*I – R. Juras, E. G. Cothran (2004) [25]; II – Л. А. Храброва, Н. В. Блохина (2019) [24]; III – А. В. Дубровин, Н. В. Блохина, А. В. Борисова (2024).

Выводы. Новоалтайская порода лошадей обладает самобытной генетической структурой, присущим ей аллелофондом и характеризуется высоким уровнем генетического разнообразия ($A_e=4,909$). Результаты филогенетического анализа продемонстрировали высокий уровень генетического сходства лошадей новоалтайской породы с русской тяжеловозной (0,903) и алтайской (0,899) породами и наибольшую отдалённость от будённовской (0,709) породы. Полученные данные обладают высокой значимостью для планирования селекционной работы с новоалтайской породой лошадей, направленной на дальнейшее её совершенствование, с вариантами реализации как методом чистопородного, так и межпородного разведения с прилитием крови родственных пород.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075–15–2021–1037 (внутренний № 15.БРК.21.0001).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

Протокол исследований на животных одобрен Комиссией по контролю за содержанием и использованием экспериментальных животных (Комиссией по биоэтике) Всероссийского научно-исследовательского института коневодства (номер протокола: 2023/12/15).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

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

Литература.

1. Хатамов А. У., Женихова Н. И. Ветеринарно-санитарная экспертиза конины // Молодёжь и на-

- ука. 2021. № 3. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46358321> (дата обращения: 15.01.2024)
2. Зеленченкова А. А. Мясная продуктивность лошадей башкирской породы, выращенных в условиях настбищного содержания тверской области // *Коневодство и конный спорт*. 2016. № 2. С. 30–32.
 3. Stanislawczyk R., Rudy M., Gil M. Quality characteristics of horse meat as influence by the age of horse // *International Journal of Food Properties*. 2020. Vol. 23. No. 1. P. 864–877. doi: 10.1080/10942912.2020.1764579.
 4. Никонова А. И. Генеалогическая структура и методы разведения новоалтайской породы // *Коневодство и конный спорт*. 2012. № 4. С. 4–7.
 5. Дубровин А. В., Гавриличева И. С. Генетическая характеристика линий новоалтайской породы лошадей // *Коневодство и конный спорт*. 2023. № 5. С. 23–25. doi: 10.25727/HS.2023.5.60152.
 6. Genetic structure and genome-wide association study of the traditional Kazakh horses / A. Pozharskiy, A. Abdrakhmanova, I. Beishova, et al. // *Animal*. 2023. Vol. 17. No. 9. P. 100926. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731123002239?via%3Dihub> (дата обращения: 15.01.2024). doi: 10.1016/j.animal.2023.100926.
 7. A review on SNP and other types of molecular markers and their use in animal genetics / A. Vignal, D. Milan, M. SanCristobal, et al. // *Genetics Selection Evolution*. 2002. No. 34. P. 275–305. doi: 10.1051/gse:2002009.
 8. The Genetic Diversity of Horse Native Breeds in Russia. / M. Atroshchenko, N. Dementieva, Y. Shcherbakov, et al. // *Genes*. 2023. Vol. 14. No. 12. P. 2148. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4425/14/12/2148> (дата обращения: 15.01.2024). doi:10.3390/genes14122148.
 9. ДНК маркеры и «микросателлитный код» / В. И. Глазко, Г.Ю Косовский, Т. Т. Глазко и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2023. Т. 58. № 2. С. 223–248. doi: 10.15389/agrobiolgy.2023.2.223rus.
 10. Генетическая характеристика лошадей тракененской породы с использованием данных полиморфизма микросателлитных локусов ДНК / А. Н. Рудак, А. И. Герман, Ю. И. Герман и др. // *Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства*. 2022. № 25–1. С. 23–30.
 11. Вдовина Н. В., Юрьева И. Б. Мониторинг генетической структуры мезенской породы лошадей по микросателлитам ДНК // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021. Т. 25. № 2. С. 202–207.
 12. Калашикова Л. А., Новиков А. А., Семак М. С. Развитие генетической экспертизы племенной продукции в животноводстве // *Зоотехния*. 2022. № 11. С. 25–28.
 13. Додохов В. В., Павлова Н. И., Калашикова Л. А. Полиморфизм микросателлитных локусов ДНК у оленей чукотской породы // *Аграрный научный журнал*. 2020. № 9. С. 49–53. doi: 10.28983/asj.y2020i9pp49-53.
 14. Галинская Т. В., Щенетов Д. М., Лысенков С. Н. Предубеждения о микросателлитных исследованиях и как им противостоять // *Генетика*. 2019. Т. 55. № 6. С. 617–632. doi: 10.1134/S0016675819060043.
 15. Зайцева М. А. Особенности полиморфизма сателлитной ДНК у лошадей заводских и местных пород // *Вестник Рязанского государственного агро-технологического университета им. П. А. Костычева*. 2011. № 2 (10). С. 9–12.
 16. Why and how to switch to genomic selection: lessons from plant and animal breeding experience / A. Fugerey-Scarbel, C. Bastien, M. Dupont-Nivet, et al. // *Frontiers in Genetics*. 2021. Vol. 12. doi:10.3389/fgene.2021.629737. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/genetics/articles/10.3389/fgene.2021.629737/full> (дата обращения: 25.01.2024).
 17. Оценка генетического разнообразия в популяциях тувинских лошадей по локусам систем крови и микросателлитным ДНК / Р. Б. Чысыма, Л. А. Храброва, А. М. Зайцев и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. № 4. С. 679–685. doi: 10.15389/agrobiolgy.2017.4.679rus.
 18. Калинкова Л. В., Зайцев А. М., Иванов Р. 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/agrobiolgy.2022.2.272rus.
 19. Генетическое разнообразие мезенской породы лошадей (*Equus Ferus Caballus*) по микросателлитной ДНК / И. Б. Юрьева, Г. Р. Свищёва, Н. В. Вдовина и др. // *Генетика*. 2018. Т. 54. № 13. С. 64–69. doi: 10.1134/S0016675818130210.
 20. Genetic Characterization of Mangalarga Marchador Breed Horses Based on Microsatellite Molecular Markers / M. M. Baena, S. Diaz, R. S. Moura, et al. // *J. Equine Vet Sci*. 2020. Vol. 95. P. 103231. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0737080620303221?via%3Dihub>. (дата обращения: 25.01.2024). doi: 10.1016/j.jevs.2020.103231.
 21. Анализ ассоциаций полиморфных вариантов генов MSTN, CAST, PRLR с хозяйственно-полезными качествами лошадей вятской породы / Н. Ф. Белоусова, С. П. Басс, С. А. Зиновьева и др. // *Международный вестник ветеринарии*. 2023. № 1. С. 234–247. doi: 10.52419/issn2072-2419.2023.1.234.
 22. Никонова А. И. Новая порода лошадей // *Коневодство и конный спорт*. 2000. № 6. С. 6–8.
 23. Блохина Н. В., Царёва М. А. Анализ генетической структуры новоалтайской породы лошадей с учётом аллелофонда базовых пород // *АгроЗооТехника*. 2019. Т. 2. № 2. С. 4–12. doi: 10.15838/alt.2019.2.2.4.
 24. Храброва Л. А., Блохина Н. В. Сравнительная оценка аллелофонда новоалтайской лошади с породами, участвовавшими в её создании // *Коневодство и конный спорт*. 2019. № 4. С. 20–22. doi: 10.25727/HS.2019.4.34285.
 25. Juras R., Cothran E. G. Microsatellites in Lithuanian native horse breeds: Usefulness for parentage testing // *Biologija*. 2004. No. 4. P. 6–9.

Поступила в редакцию 01.03.2024
 После доработки 24.03.2024
 Принята к публикации 09.04.2024

МИКОТОКСИНЫ В ВЕГЕТИРУЮЩИХ РАСТЕНИЯХ КУКУРУЗЫ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОНОПОСЕВА

Г. П. Кононенко¹, доктор биологических наук, П. Ф. Васильков², аспирант,
А. А. Буркин¹, кандидат медицинских наук, Л. В. Мосина², доктор биологических наук

¹Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии – филиал Федерального научного центра «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии имени К. И. Скрябина и Я. Р. Коваленко Российской академии наук»

123022, Москва, Звенигородское ш., 5

E-mail: kononenkogp@mail.ru

²Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева

127550, Москва, Тимирязевская ул., 49

E-mail: mosina.l.v@yandex.ru

Исследования проводили с целью выявления характера контаминации микотоксинами вегетирующих растений кукурузы (*Zea mays* L.) в периоды листообразования и выметывания метелки. Раннеспелые гибриды Краснодарский 194 МВ, Ладозжский 175 МВ и Компетенс®, устойчивые к грибным заболеваниям, выращивали в весенне-летний период в условиях Московской области на участке с дерново-подзолистой почвой и внесении удобрений НРК 16:16:16. Для микотоксикологического анализа наземные части растений отбирали еженедельно от фазы формирования 3-го листа (через 18 дней после посева). Образцы всходов, листьев и стеблей (общее число – 172) после высушивания измельчали и экстрагировали смесью ацетонитрила и воды в объемном соотношении 84:16 с расходом 10 мл на 1 г навески. В экстрактах после 10-кратного разбавления фосфатно-солевым буферным раствором рН 7,5 определяли содержание микотоксинов методом непрямого конкурентного иммуноферментного анализа. Т-2 токсин, дезоксиниваленол, диацетоксисцирпенол, роридин А, стеригматоцистин и PR-токсин отсутствовали. Всходы и листья кукурузы содержали циклопиазонную кислоту (ЦПК), эмодин (ЭМО), микофеноловую кислоту (МФК), альтернариол (АОЛ), эргоалкалоиды (ЭА), афлатоксин В₁ (АВ₁) и единичные образцы – зеараленон (ЗЕН), охратоксин А (ОА) и цитринин (ЦИТ) в концентрациях от 16 до 35 мкг/кг. Фумонизины группы В найдены только в ранних всходах. Постоянным контаминантом стеблей была МФК, тогда как ЭА и ЦИТ отсутствовали. Во всходах и листьях у всех гибридов при смене фаз развития обнаружение АОЛ и ЭА оставалось стабильным, как и средние содержания ЦПК (около 100 мкг/кг), АОЛ (от 17 до 27 мкг/кг), ЭМО (35...58 мкг/кг), МФК (28...41 мкг/кг), ЭА (6...18 мкг/кг) и АВ₁ (2 мкг/кг). В стеблях растений, находящихся в фазах 7...9 листа и выметывания, отмечено варьирование случаев детектирования ЦПК, ЭМО, АОЛ, АВ₁ и ОА в зависимости от генотипа.

MYCOTOXINS IN VEGETATING CORN PLANTS FROM EXPERIMENTAL MONO-SOWING

G. P. Kononenko¹, P. F. Vasilkov², A. A. Burkin¹, L. V. Mosina²

¹All-Russian Research Institute of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology – Branch of Federal Scientific Center Skryabin and Kovalenko All-Russian Research Institute of Experimental Veterinary Russian Academy of Sciences

123022, Moskva, Zvenigorodskoe sh., 5

E-mail: kononenkogp@mail.ru

²Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev

127550, Moskva, Timiryazevskaya ul., 49

E-mail: mosina.l.v@yandex.ru

The aim of present study was to reveal the mycotoxin contamination of vegetative maize (*Zea mays* L.) plants during the periods of leaf formation and panicle emergence. Early maturing hybrids of the varieties Krasnodarsky 194 MV, Ladozhsky 175 MV and Competence®, resistant to fungal diseases, were grown in the spring-summer period of 2023 on the experimental field of the Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy (Moscow) with sod-podzolic soil and the application of NPK fertilizers 16:16:16. For mycotoxicological analysis, aerial parts of plants were collected weekly from the phase of formation of the 3rd leaf (18 days after sowing). Samples of seedlings, leaves and stems (total number – 172), after drying, were ground in a laboratory mill and extracted with a mixture of acetonitrile and water in a volumetric ratio of 84:16 with a consumption of 10 ml per 1 g of sample. Mycotoxin content was determined in extracts after 10-fold dilution with phosphate-salt buffer solution pH 7.5 by indirect competitive enzyme immunoassay. T-2 toxin, deoxynivalenol, diacetoxiscirpenol, roridin A, sterigmatocystin and PR toxin were absent in the samples. Corn seedlings and leaves contained cyclopiazonic acid (CPA), emodin (EMO), mycophenolic acid (MPA), alternariol (AOL), ergot alkaloids (EA), aflatoxin B₁ (AB₁) and single samples – zearalenone (ZEN), ochratoxin A (OA) and citrinin (CIT) in concentrations from 16 up to 35 µg/kg. Fumonisin of group B are found only in early seedlings. The permanent contaminant of the stems was MPA, whereas EA and CIT were absent. In the seedlings and leaves of all hybrids, the detection of AOL and EA remained stable during the change of development phases, as did the average concentrations of CPA (about 100 µg/kg), AOL (from 17 to 27 µg/kg), EMO (35–58 µg/kg), MPA (28–41 µg/kg), EA (6–18 µg/kg) and AB₁ (2 µg/kg). In the stems of plants in phases 7–9 of leaf and sweeping, variation in cases of detection of CPA, EMO, AOL, AB₁ and OA was noted by varieties.

Ключевые слова: кукуруза, всходы, листья, стебли, микотоксины, иммуноферментный анализ.

Key words: corn, seedlings, leaves, stems, mycotoxins, ELISA.

Для кукурузы, зернофуражной культуры многоцелевого использования, особая опасность связана с ситуациями, которые приводят к множественной контаминации микотоксинами зерна [1, 2] и силосованной зеленой массы [3, 4]. Инфицирование растений токсигенными грибами,

которое нередко принимает характер эпифитотий и приводит к накоплению микотоксинов в зерне, возникает из-за смещения экологического равновесия под воздействием причин абиотической и биотической природы [5, 6, 7]. При консервировании урожая путем уплотнения и герметизации

Табл. 1. Встречаемость и содержание микотоксинов во всходах, листьях и стеблях кукурузы гибрида Краснодарский 194 МВ по периодам роста I–III

Микотоксин	Число проб, содержащих микотоксин, шт. / количество токсина (мин.–среднее–макс.), мкг/кг					
	всходы, листья			стебли		
	I–III* (n=35)	I (n=12)	II (n=13)	III (n=10)	II (n=3)	III (n=7)
ЗЕН	1/19	–	1/19	–	–	–
ФУМ	1/2600	1/2600	–	–	–	–
АОЛ	30/13–23–40	7/16–21–29	13/13–21–40	10/15–27–40	1/12	3/26–29–32
ОА	3/19–45–71	1/71	2/19	–	–	–
ЦИТ	–	–	–	–	–	–
АВ	25/1–2–2	6/2	11/1–2–2	8/1–2–2	–	1/1
ЦПК	10/63–90–174	1/63	2/82	7/66–108–174	2/82	–
МФК	18/21–32–50	9/21–36–50	2/28	7/23–32–44	1/38	6/25–32–40
ЭА	8/7–13–21	2/10	3/7–11–20	3/16–18–21	–	–
ЭМО	22/32–43–76	1/35	11/32–39–62	10/35–55–76	1/38	7/26–40–47

*здесь и в остальных таблицах: период I – фазы 3-го и 5-го листа, период II – фазы 7-го и 9-го листа; период III – фаза выметывания метелки; среднее содержание микотоксина по выборке определяли как среднее арифметическое величин, полученных для положительных образцов; n – число исследованных проб; прочерк – микотоксин не обнаружен.

в зеленой массе формируется особая по составу микобиота с участием микроаэрофильных грибов, наделенных токсинообразующей способностью, а в местах отбора корма и в пристеночных участках закладки возможно развитие высокотоксигенных видов свободноживущих микромицетов [8, 9]. Для оценки роли неблагоприятных факторов важно располагать информацией о собственном микотоксикологическом статусе растений, к формированию которого причастны обширные сообщества микроскопических грибов, обитающих внутри организма [10, 11]. Сведения о комплексе микотоксинов, свойственном растению, могут быть получены на экспериментальных монопосевах с соблюдением оптимальных агротехнических приемов и контролем фитосанитарного состояния. Результаты такого обследования недавно стали известны для вегетирующего ячменя, пшеницы и овса [12].

Цель исследования – выявление характера контаминации микотоксинами вегетирующих растений кукурузы (*Zea mays* L.) в периоды листообразования и выметывания метелки.

Методика. Кукурузу (*Zea mays* L.) выращивали на участке опытного поля лаборатории агроэкологического мониторинга кафедры экологии РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева. Почва на делянках – дерново-подзолистая с внесением удобрений NPK 16:16:16, закладку и проведение опыта выполняли в соответствии с установленными правилами, полив и прополку – регулярно ручным способом. В опыте выращивали раннеспелые и устойчивые к грибным заболеваниям гибриды Краснодарский 194 МВ, Ладожский 175 МВ и Компетенс® (KWS SAAT AG, Германия). Содержание микотоксинов в их семенах определяли по ГОСТ 31653-2012. После проверки на всхожесть проводили посев и через 18 дней (после массового формирования у растений 3-го листа) начинали регулярные отборы образцов для микотоксикологического анализа до завершения фазы выметывания метелки. Для этого еженедельно надземные части растений срезали на высоте 3...5 см от поверхности почвы. Первые сборы (14.06, 23.06, 28.06) проводили в фазах 3-го и 5-го листа (I период), следующие (5.07, 12.07,

21.07) – 7-го и 9-го листа (II период), далее (31.07, 9.08) – в фазе выметывания метелки (III период). В I период для анализа использовали надземные части, во II их разделяли на листовые пластинки и стебли, в III – на листовые пластинки и стебли с метелками. Каждый образец (общее число – 172 шт.) разрезали на фрагменты по 1,0...1,5 см, выдерживали в интенсивно вентилируемом боксе до воздушно-сухого состояния и затем мелко измельчали в лабораторной мельнице. Экстракцию проводили смесью ацетонитрила и воды в объемном соотношении 84:16 с расходом 10 мл на 1 г навески. Экстракты после 10-кратного разбавления фосфатно-солевым буферным раствором pH 7,5 использовали для непрямого конкурентного иммуноферментного анализа. Концентрацию T-2 токсина (T-2), дезоксиниваленола (ДОН), зеараленона (ЗЕН), фумонизинов группы В (ФУМ), эргоалкалоидов (ЭА), альтернариола (АОЛ), роридина А (РОА), афлатоксина В₁ (АВ₁), стеригматоцистина (СТЕ), циклопиазоновой кислоты (ЦПК), эмодаина (ЭМО), ократоксина А (ОА), цитринаина (ЦИТ), микофеноловой кислоты (МФК), PR-токсина (PR) определяли с использованием аттестованных коммерческих и исследовательских иммуноферментных тест-систем (СТО 00494143.01–2015). Нижние пределы количественных измерений соответствовали 85 %-ному уровню связывания антител и составляли 1 (АВ₁, ЭА), 2 (T-2, ОА, СТЕ), 5 (РОА), 10 (АОЛ, МФК, ЗЕН, ЭМО, ЦИТ, ЦПК), 40 (ДОН, ФУМ) и 100 (ДАС, PR) нг/г.

Результаты и обсуждение. Общим для растений кукурузы в нашем исследовании было отсутствие фузариотоксинов (T-2, ДОН, ДАС), а также СТЕ, PR и токсина трихотеценового ряда РОА во все изученные фазы. Во всходах и листьях гибридов кукурузы к группе часто выявляемых микотоксинов относились ЦПК, ЭМО, МФК, АОЛ, ЭА, АВ₁ и в единичных образцах обнаружены ЗЕН, ОА и ЦИТ в концентрациях, близких к пределам обнаружения метода (табл. 1-3). Количества типичных микотоксинов в среднем по гибридам были следующими: ЦПК – 106 мкг/кг, ЭМО – 45, МФК – 35, АОЛ – 23, ЭА – 12 и АВ₁ – 2 мкг/кг.

О направленности изменений в контаминации растений при смене фаз развития можно составить лишь общее

Табл. 2. Встречаемость и содержание микотоксинов во всходах, листьях и стеблях кукурузы гибрида Ладожский 175 МВ по периодам роста I–III

Микотоксин	Число проб, содержащих микотоксин, шт. / количество токсина (мин.–среднее–макс.), мкг/кг					
	всходы, листья			стебли		
	I–III (n=50)	I (n=18)	II (n=20)	III (n=12)	II (n=6)	III (n=8)
ЗЕН	2/15	–	–	2/15	–	–
ФУМ	2/198	2/198	–	–	–	–
АОЛ	41/9–22–40	16/18–23–29	13/9–17–27	12/16–26–40	–	3/22–27–30
ОА	1/8	–	–	1/8	1/25	–
ЦИТ	3/33–35–40	–	2/33	1/40	–	–
АВ	33/1–2–2	11/2–2–2	14/1–2–2	8/1–2–2	–	–
ЦПК	27/63–119–243	12/67–99–132	9/79–128–224	6/63–130–243	–	–
МФК	20/20–32–51	7/25–40–51	8/23–28–33	5/20–29–38	4/20–25–33	1/20
ЭА	31/5–12–45	11/5–12–24	15/6–12–45	5/8–13–20	–	–
ЭМО	26/28–40–62	3/33–37–46	13/28–39–62	10/32–44–62	–	4/25–30–52

Табл. 3. Встречаемость и содержание микотоксинов во всходах, листьях и стеблях кукурузы гибрида Компетенс® по периодам роста I–III

Микотоксин	Число проб, содержащих микотоксин, шт. / количество токсина (мин.–среднее–макс.), мкг/кг					
	всходы, листья			стебли		
	I–III (n=50)	I (n=20)	II (n=19)	III (n=11)	II (n=6)	III (n=7)
ЗЕН	3/14–15–16	–	–	3/14–15–16	–	–
ФУМ	3/224–245–228	3/224–245–228	–	–	–	–
АОЛ	39/14–23–40	9/14–20–25	19/16–25–35	11/15–25–40	2/12,13	1/19
ОА	3/6–8–11	–	1/11	2/6, 7	–	–
ЦИТ	–	–	–	–	–	–
АВ ₁	36/1–2–3	10/2–2–3	17/1–2–3	9/2–2–3	–	1/2
ЦПК	22/63–119–251	–	15/63–84–122	7/81–153–251	–	2/87
МФК	22/20–41–62	9/28–41–62	7/22–39–51	6/20–31–42	4/24–42–67	3/20–28–37
ЭА	24/6–11–37	2/6	16/7–12–28	6/10–16–37	–	–
ЭМО	26/32–51–81	–	15/32–43–62	11/40–58–81	–	4/25–29–33

представление. У всех гибридов во всходах и листьях частота обнаружения АОЛ, ЭА, как и средние содержания большинства компонентов оставались стабильными: ЦПК – около 100 мкг/кг, АОЛ – 17...27 мкг/кг, ЭМО – 35...58 мкг/кг, МФК – 28...41 мкг/кг, ЭА – 6...18 мкг/кг, АВ₁ – фоновое. При этом ЭМО в I период выявляли только у Краснодарского 194МВ и Ладожского 175 МВ, хотя и редко (см. табл. 1, 2), а у Компетенс® его не обнаружили (см. табл. 3). У гибрида Краснодарский 194 МВ МФК детектировали только в двух образцах во II периоде, ЦПК – в единичных случаях в I и II периодах (см. табл. 1), а во всходах Компетенс® ЦПК найти не удалось (см. табл. 3). ЗЕН был определен в образцах более поздних сборов: у Краснодарского 194 МВ – в фазе 7-го и 9-го листа, у Ладожского 175 МВ и Компетенс® в фазе выметывания. ОА находили в разных фазах: у Ладожского 175 МВ – в фазе выметывания, у Компетенс® – в фазе 7-го и 9-го листа, у Краснодарского 194 МВ – в первые два периода. ЦИТ обнаруживали только у Ладожского 175МВ во II и III периодах.

У всех гибридов состав контаминантов в стеблях и стеблях с метелками был значительно беднее, чем в листьях, ЭА и ЦИТ отсутствовали. В период II стебли содержали МФК как постоянный компонент в сочетании с АОЛ, ЦПК и ЭМО у Краснодарского 194 МВ (см. табл. 1), ОА у Ладожского 175 МВ (см. табл. 2) и АОЛ у Компетенс® (см. табл. 3). В стеблях с метелками (в период III) присутствовали АОЛ, МФК и ЭМО, у Краснодарского 194 МВ совместно с АВ₁, у Компетенс® – с АВ₁ и ЦПК.

Полученные результаты указывают на вовлеченность токсигенных эндофитных грибов в физиологические процессы растений и причастность к смене его онтогенетических состояний, однако поиск каких-либо соответствий с составом микобиоты пока не представляется возможным из-за недостатка базовых сведений. Судя по характеру контаминации, эндофитами кукурузы, способными к токсинообразованию, могут быть микромицеты родов *Fusarium*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Alternaria* и других. Недавно среди эндофитов листьев этого растения идентифицированы *Fusarium oxysporum*, *F. equiseti*, *Gibberella moniliformis* (= *F. verticillioides*), *F. sacchari* (= *F. moniliforme* var. *subglutinans*), а также *Eupenicillium javanicum* (= *P. javanicum*), представители родов *Penicillium*, *Acremonium* и *Rhizomucor*, сордариомицеты (*Sarocladium zeae*, *Eutypella scoparia*) и плесневый гриб (Pleosporales), в стеблях – *F. oxysporum*, *F. concentricum*, *F. andiyazi*, *F. succisae*, *Gibberella circinata* (= *F. circinatum*), *Fusarium* sp., *Aspergillus carneus*, *Trichoderma koningiopsis* и *Sarocladium zeae* [13]. В стеблях кукурузы, отобранной на полях в разных штатах США, более чем в половине образцов были идентифицированы *F. oxysporum*, *F. equiseti*, *F. semitectum*, *F. acuminatum*, *F. solani* [14]. В составе эндофитов взрослых растений из графства Девон (Великобритания) доминировали *Alternaria alternata* (в листьях) и *Acremonium strictum* (в стеблях) [15]. Известно, что

F. semitectum, который входит в комплекс морфологически близких видов *F. ncarinatum-equiseti*, продуцирует ЗЕН [16], вид *A. alternata* – АОЛ [17]. Возможно, к эндогенной контаминации кукурузы ЦПК и МФК причастны и отдельные виды грибов рода *Penicillium* [18]. Судя по данным, полученным для других растений, среди метаболитов эндофита *P. citrinum* из цветков базилика тонкоцветного (*Ocimum tenuiflorum*) найдены АОЛ и ЦИТ [19], из стеблей бругиеры голокорневой (*Bruguiera gymnorhiza*) – ЭМО [20], *P. oxalicum* из листьев растений рода *Coffea* продуцировал ОА [21]. Грибы *Aspergillus* также способны к эндофитному обитанию и, наряду с типичными для них ЭА [22], образуют и несвойственные метаболиты, например, АОЛ [23].

У вегетирующей кукурузы на ранних фазах развития установлена слабо выраженная контаминация микотоксинами с регулярной встречаемостью ЦПК, АОЛ, МФК, ЦПК, ЭМО, ЭА, АВ₁ и редкие случаи обнаружения ЗЕН, ОА, ЦИТ. Такая «норма» позволяет оценивать степень возможных отклонений под воздействием антропогенных и биотических факторов при хозяйственном использовании культуры. Для выяснения причин накопления микотоксинов в консервированных кукурузных кормах в дальнейшем, безусловно, границы наблюдений за статусом растения следует расширить до оптимального срока заготовки на силос в начале молочно-восковой спелости зерна.

У всех изученных генотипов в I период при самом раннем сборе (14.06) были обнаружены единичные образцы, содержащие ФУМ. При следующих сборах (23.06 и 28.06) в тот же период, как и во II и III периоды, такие образцы отсутствовали. Семена гибридов Краснодарский 194 МВ и Ладожский 175 МВ, проанализированные перед посевом, содержали ФУМ и соответствие их количеств (6000 и 400 мкг/кг) с найденным во всходах (2600 и 198 мкг/кг) позволяет предположить возможность переноса этих токсинов в надземную часть в начале роста.

Выводы. Вегетирующим растениям гибридов кукурузы (Краснодарский 194 МВ, Ладожский 175 МВ и Компетенс®) в периоды листообразования и выметывания метелки свойственна слабовыраженная эндогенная контаминация такими микотоксинами, как ЦПК, АОЛ, МФК, ЭМО, ЭА, АВ₁, редкие случаи обнаружения ЗЕН, ОА и ЦИТ, отсутствие фузариотоксинов (Т-2, ДОН, ДАС), а также СТЕ, PR и РОА. Среднее содержание ЦПК, АОЛ, ЭМО, ЭА и АВ₁ во всходах и листьях всех изученных гибридов при смене фаз развития оставалось сходным. Выявлены межсортовые различия по компонентному составу микотоксинов во всходах, листьях и стеблевой массе при смене фаз развития растения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета организаций: Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной

ветеринарии имени К. И. Скрябина и Я. Р. Коваленко Российской академии наук» и Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева. 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. Микотоксикологическое исследование кормового зерна кукурузы (1998–2018 гг.) / Г. П. Кононенко, А. А. Буркин, Е. В. Зотова и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2019. № 3. С. 28–31. doi: 10.31857/S2500-26272019328-31.
2. Кононенко Г. П., Буркин А. А., Зотова Е. В. Микотоксикологический мониторинг. Сообщение 2. Зерно пшеницы, ячменя, овса, кукурузы // *Ветеринария сегодня*. 2020. № 2(33). С. 139–145. doi: 10.29326/2304-196X-2020-2-33-139-145.
3. Silage review: Mycotoxins in silage: occurrence, effects, prevention, and mitigation / I. M. Ogunade, C. Martinez-Tupia, O. C. M. Queiroz, et al. // *Journal of Dairy Science*. 2018. Vol. 101(5). P. 4034–4059. doi: 10.3168/jds.2017-13788.
4. Occurrence of mycotoxins and mycotoxigenic fungi in silage from the north of Portugal at feed-out / J. M. Gonzalez-Jartin, V. Ferreira, I. Rodriguez-Cañás, et al. // *International Journal of Food Microbiology*. 2022. Vol. 365. Article 109556. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168160522000277?via%3DIihub> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109556.
5. Czembor E., Stepień Ł., Waśkiewicz A. Effect of environmental factors on *Fusarium* species and associated mycotoxins in maize grain grown in Poland // *PLoS ONE*. 2015. Vol. 10(7). Article e0133644. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0133644> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.1371/journal.pone.0133644.
6. Mycotoxin occurrence in maize produced in northern Italy over the years 2009–2011: focus on the role of crop related factors / M. Camardo, Leggieri, T. Bertuzzi, A. Pietry, et al. // *Phytopathologia Mediterranea*. 2015. Vol. 54. P. 212–221. doi: 10.14601/Phytopathol_Mediterr-14632.
7. Mycotoxins in Flanders' fields: Occurrence and correlations with *Fusarium* species in whole-plant harvested maize / J. Vandicke, K. De Visschere, S. Croubels, et al. // *Microorganisms*. 2019. Vol. 7. Article 571. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2607/7/11/571> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.3390/microorganisms7110571.
8. Co-occurrence of regulated and emerging mycotoxins in corn silage: relationships with fermentation quality and bacterial communities / A. Gallo, F. Ghilardelli, A. S. Atzori, et al. // *Toxins*. 2021. Vol. 13. Article 232. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6651/13/3/232> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.3390/toxins13030232.
9. Mixtures of mycotoxins, phytoestrogens, and other secondary metabolites in whole-plant corn silages and total mixed rations of dairy farms in central and northern Mexico / F. Penagos-Tabares, M. Sulyok, J.-I. Artavia, et al. // *Toxins*. 2023. Vol. 15. Article 153. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6651/15/2/153> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.3390/toxins15020153.
10. Understanding the biodiversity and biological applications of endophytic fungi: A review / Y. Mishra, A. Singh, A. Batra, et al. // *Journal of Microbial & Biochemical Technology*. 2014. Vol. 8. Article 004. URL: <https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/understanding-the-biodiversity-and-biological-applications-of-endophytic-fungi-a-review-1948-5948.S8-004.pdf> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.4172/1948-5948.S8-004.
11. Yadav A. N. Biodiversity and biotechnological applications of endophytic fungi for sustainable agriculture and allied sectors // *Acta Scientific Microbiology*. 2018. Vol. 1(5). P. 01–05. URL: <https://actascientific.com/ASMI/pdf/ASMI-01-0044.pdf> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.31080/ASMI.2018.01.0044.
12. Кононенко Г. П., Зотова Е. В., Буркин А. А. Опыт микотоксикологического обследования зернофуражных культур // *Сельскохозяйственная биология*. 2021. Т. 56(5). С. 958–967. doi: 10.15389/agrobiology.2021.5.958 rus.
13. Functional characterization of endophytic fungal community associated with *Oryza sativa* L. and *Zea mays* L. / M. Potshangbam, S. I. Devi, D. Sahoo, et al. // *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8. Article 325. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2017.00325/full> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.3389/fmicb.2017.00325.
14. *Fusarium* spp. from corn, sorghum, and soybean fields in the central and eastern United States / J. F. Leslie, C. A. S. Pearson, P. E. Nelson, et al. // *Phytopathology*. 1990. Vol. 80(4). P. 343–350. doi: 10.1094/phyto-80-343.
15. Fisher P. J., Petrini O., Lapin-Scott H. M. The distribution of some fungal and bacterial endophytes in maize (*Zea mays* L.) // *New Phytologist*. 1992. Vol. 122. P. 299–305. doi: 10.1111/j.1469-8137.1992.tb04234.x.
16. Characterization of Italian isolates of *Fusarium semitectum* from alfalfa (*Medicago sativa* L.) by AFLP analysis, morphology, pathogenicity and toxin production / M. Zaccardelli, V. Balmas, C. Aldomare, et al. // *Journal of Phytopathology*. 2006. Vol. 164. P. 454–460. doi: 10.1111/j.1439-0434.2006.01128.x.
17. Toxigenic *Alternaria* species: impact in cereals worldwide / S. M. Tralamazza, K. C. Piacentini, C. H. T. Iwase, et al. // *Current Opinion in Food Science*. 2018. Vol. 23. P. 57–63. doi: 10.1016/j.cofc.2018.05.002.
18. Frisvad J. C., Samson R. A. Polyphasic taxonomy of *Penicillium* subgenus *Penicillium*, A guide to identification of food and airborne terverticillate *Penicillia* and their mycotoxins // *Studies in Mycology*. 2004. Vol. 49. P. 1–174.
19. Bioactive polyketides and alkaloids from *Penicillium citrinum*, a fungal endophyte isolated from *Ocimum tenuiflorum* / D. Lai, H. Broetz-Oesterheld, W. E. G. Mueller, et al. // *Fitoterapia*. 2013. Vol. 91. P. 100–106. doi: 10.1016/j.fitote.2013.08.017.
20. Endophytic fungus strain ZD6 isolated from the stem of *Bruguiera gymnorrhiza* and antibacterial activity of its metabolites / M. Li, M. Chang, Q. Zhang, et al. // *Junwu Xuebao (Mycosystema)*. 2010. Vol. 29. P. 739–745.
21. *Penicillium* species endophytic in coffee plants and ochratoxin A production / F. E. Vega, F. Posada, S. W. Peterson, et al. // *Mycologia*. 2006. Vol. 98(1). P. 31–42. doi: 10.3852/mycologia.98.1.31.
22. Natural product diversity from the endophytic fungi of the genus *Aspergillus* / S. S. El-hawary, A. S. Moawad, H. S. Bahr, et al. // *RSC Advances*. 2020. Vol. 10. P. 22058–22079. doi: 10.1039/d0ra04290k.
23. Cytotoxic secondary metabolites from the endophytic fungus *Aspergillus versicolor* KU258497 / S. S. Ebada, M. El-Neketi, W. Ebrahim, et al. // *Phytochemistry Letters*. 2018. Vol. 24. P. 88–93. doi: 10.1016/j.phytol.2018.01.010.

Поступила в редакцию 11.02.2024
После доработки 15.03.2024
Принята к публикации 09.04.2024

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

УДК 637.115:637.11

DOI 10.31857/S2500262724020128 EDN GSIZFQ

РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДОИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ КАРУСЕЛЬ НА ПРИНЦИПАХ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ**Я. П. Лобачевский**, доктор технических наук, академик РАН, **В. В. Кирсанов**, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, **С. В. Кирсанов**, аспирантФедеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5
E-mail: lobachevsky@yandex.ru; kirvv2014@mail.ru; sergejkirsanovv@gmail.com

Наиболее капиталоемкий и нагруженный узел доильной установки Карусель – вращающаяся платформа, которая несет на себе большую механическую нагрузку. Ее собственная масса в сумме с массой перемещаемых животных может достигать 1200 кг на одно доильное место и более. Для снижения трения в колесных системах высоконагруженных транспортных средств, крупногабаритных узлах и механизмах машин и оборудования, в том числе в сельскохозяйственных машинах и агрегатах, перспективно использование технологии магнитного подвеса. Исследование проводили с целью разработки новой технологической схемы левитирующей вращающейся доильной платформы Карусель на принципах магнитной левитации. Создание принципиально новой ресурсосберегающей конструкции доильной платформы Карусель на принципах магнитной левитации с целью повышения ее надежности и снижения эксплуатационных затрат из-за исключения износа движителей системы «рельс–колесо» возможно. Предложена новая схема вращающейся доильной платформы Карусель с использованием технологии магнитного подвеса на постоянных магнитах без применения колесных движителей. Выполнен ее силовой расчет в основном режиме установившегося движения при полном заполнении платформы животными и частичном заполнении в начале и конце цикла доения животных с получением основных уравнений для определения необходимых сил отталкивания в горизонтальных и вертикальных магнитных сборках, обеспечивающих магнитную левитацию (подвес) и боковую стабилизацию (центрирование) вращающейся платформы.

DEVELOPMENT OF A NEW TECHNOLOGICAL SCHEME OF THE CAROUSEL MILKING PLATFORM BASED ON THE PRINCIPLES OF MAGNETIC LEVITATION**Ya. P. Lobachevsky, V. V. Kirsanov, S. V. Kirsanov**Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
109428, Moskva, 1-i Institutskii proezd, 5
E-mail: lobachevsky@yandex.ru; kirvv2014@mail.ru; sergejkirsanovv@gmail.com

The Carousel, the most capital-intensive and loaded milking unit, is a rotating platform that carries a large mechanical load. Its own weight, combined with the weight of the animals being moved, can reach 1200 kg per milking place or more. To reduce friction in the wheeled systems of high-loaded vehicles, large-sized assemblies and mechanisms of machinery and equipment, including agricultural machinery and aggregates, the use of magnetic suspension technology is promising. The research was carried out in order to develop a new technological scheme of a levitating rotating milking platform Carousel based on the principles of magnetic levitation. The creation of a fundamentally new resource-saving design of the Carousel milking platform based on the principles of magnetic levitation in order to increase its reliability and reduce operating costs due to the exclusion of wear on the propellers of the rail-wheel system is possible. A new scheme of a rotating milking platform Carousel using permanent magnet magnetic suspension technology without the use of wheel thrusters is proposed. Its force calculation was performed in the main mode of steady motion with the platform fully filled with animals and partially filled at the beginning and end of the milking cycle of animals, obtaining basic equations for determining the necessary repulsive forces in horizontal and vertical magnetic assemblies providing magnetic levitation (suspension) and lateral stabilization (centering) of the rotating platform.

Ключевые слова: доильная установка Карусель, технологическая схема, магнитная левитация, магнитные сборки, постоянные магниты, силы отталкивания, массив Хальбаха.

Key words: milking machine Carousel, flow chart, magnetic levitation, magnetic assemblies, permanent magnets, repulsive forces, Halbach array.

Автоматизированные доильные залы Карусель – наиболее эффективное технологическое решение для обслуживания животных на крупных молочных фермах (1200 голов и более), использование которых обеспечивает высокую производительность труда благодаря поточности и автоматизации выполнения технологических операций, рационализации рабочей позы операторов и др. [1]. К наиболее капиталоемким и нагруженным узлам доильной установки Карусель относится вращающаяся платформа, несущая на себе большую механическую нагрузку. Ее собственная масса в сумме с массой перемещаемых животных составляет 1200 кг на одно доильное место и более [2]. Карусель работает практически в безостановочном круглосуточном режиме (24×7), что сопровождается

значительным расходом электроэнергии, повышенным износом движителей системы «рельс–колесо» и приводных колес фрикционных передач электроприводов вращения платформы. Для снижения трения в колесных системах высоконагруженных транспортных средств, крупногабаритных узлах и механизмах машин и оборудования перспективно использование технологии магнитного подвеса [3]. К ее преимуществам относится практически полное отсутствие силы трения при перемещении грузовой платформы или вращающегося ротора, значительное снижение потребляемой мощности на передвижение, плавность и бесшумность хода, существенное уменьшение эксплуатационных затрат, связанных с необходимостью замены опорных катков, направляющих рельс, смазывания подшипников и др.

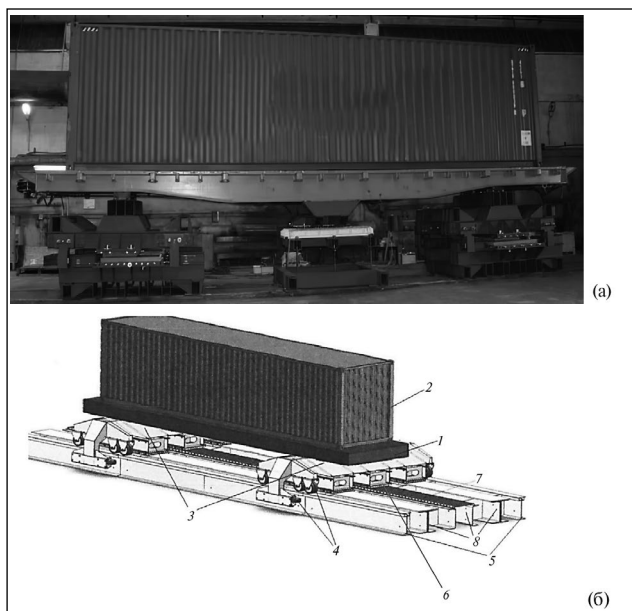


Рис. 1. Грузовая магнито-левитирующая платформа ПГУПС: а) общий вид, б) технологическая схема.

Еще в 1979 г. в городе Раменское Московской области был построен экспериментальный опытный участок для ходовых испытаний вагонов на магнитном подвесе в виде эстакады длиной 600 м. С конца 1970-х по 1980-е годы было создано пять опытных образцов вагонов, получивших обозначения серий от ТП-01 до ТП-05 [4]. К сожалению, эти работы были прекращены и возобновились только в XXI в. В других странах они активно продолжались, что позволило создать действующие конструкции высокоскоростных поездов на магнитном подвесе, которые эксплуатируют в Германии, Китае, Японии, США и Великобритании и развивают скорость порядка 400...600 км/ч. В качестве систем подвеса в них используют электромагнитный, электродинамический и подвес на постоянных магнитах [5]. В Германии подвес на постоянных магнитах нашел применение также во внутризаводском транспорте [6]. При этом уменьшаются затраты на строительство и эксплуатацию, улучшается экология, существенно экономится электроэнергия. Элементы пути могут располагаться над, на или в полу, что также позволяет снизить материальные затраты. На сегодняшний день в России учеными Петербургского государственного университета путей сообщения Александра I (г. Санкт-Петербург) при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и ОАО «Российские железные дороги» разработана технология, которая позволяет формировать магнитное поле, обеспечивающее левитацию грузовой платформы массой 32 т. На ее основе планируется создание высокоскоростного транспортного коридора для перевозки грузовых морских контейнеров [7]. Предлагаемая грузовая магнито-левитационная транспортная система (рис. 1) содержит платформу 1 с морским контейнером 2, установленную на двух тележках 3, снабженных для страховки опорными колесами 4, расположенными по бокам тележек 3 и взаимодействующими с продольными путевыми балками 5. На несущих тележках 3 попарно установлены магнитные модули (по два на каждую тележку), которые состоят из бортового магнитного полюса 6 и путевого магнитного полюса 7 левитации. Путевой магнитный полюс 7 установлен на активной путевой структуре 8, бортовой магнитный полюс 6 – на соответствующей несущей теле-

жке 3. Платформа снабжена тяговым линейным электродвигателем, выполненным в виде линейного синхронного двигателя со сверхпроводниковой обмоткой возбуждения и системой питания, статор которого уложен вдоль активной путевой структуры 8.

Исходя из изложенного, цель исследования – разработка новой технологической схемы левитирующей вращающейся доильной платформы Карусель на принципах магнитной левитации.

Методика. Методологической основой для исследований послужили работы А. А. Зайцева, Ю. Ф. Антонова, Е. М. Фришмана, В. Г. Горелова, Г. Н. Талашкина, Я. В. Соколова и др., выполненные в СССР и современной России по расчету сил в системах магнитного подвеса при создании высокоскоростных транспортных средств. Ожидаемый всплеск интереса к подобным исследованиям и разработкам связан с определенной цикличностью развития техники и технологий [8]. Наш взгляд использование технологии магнитного подвеса может быть перспективно, в том числе в сельском хозяйстве, в частности, в крупногабаритных высоконагруженных системах, узлах и механизмах для перемещения различных грузов, материалов и самих животных, а также для повышения ресурса быстрознашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин [9]. Так, в доильных установках типа Карусель вращающаяся платформа, по существу, представляет собой один большой роликовый подшипник, внешний диаметр которого может достигать 25 м и более. Для снижения потерь на трение качения, уменьшения нагрузки на привод, снижения материалоемкости, повышения эксплуатационной надежности, сокращения затрат на техническое обслуживание и ремонт вместо традиционной системы «рельс-колесо» предлагается применить технологию магнитного подвеса на постоянных магнитах. При этом перспективным направлением может быть использование постоянных неодимовых магнитов, обладающих сильным магнитным полем и значительным сроком службы (до 100 лет) без размагничивания.

Результаты и обсуждение. На основе проведенного анализа была разработана технологическая схема левитирующей доильной платформы на постоянных магнитах и выполнен ее магнитостатический силовой расчет (рис. 2).

При установившемся движении на левитирующую платформу и расположенных на ней животных в плоскости ZOY действуют следующие силы:

$F_{ц}$ – центробежная сила инерции, действующая на животное, Н;

$m_{ж}g$ – сила тяжести животного (коровы), Н;

$m_{пл}g$ – масса платформы, приходящаяся на 1 доильное место, Н;

$F_{тр1}$, $F_{тр2}$ – силы трения, действующие соответственно на передние и задние конечности животных, Н;

$F_{м1-2}$ – сила отталкивания вертикального подвеса платформы, действующая между горизонтальными магнитными сборками 1 и 2 подвижной и неподвижной частей, приходящаяся на одно доильное место, Н;

$F_{мвг3-4}$ – сила отталкивания горизонтальной боковой стабилизации платформы, действующая между вертикальными магнитными сборками подвижной и неподвижной частей, приходящаяся на одно доильное место, Н;

$F_{мвв3-4}$ – вертикальная подъемная сила боковой магнитной сборки, Н.

Согласно законам теоретической механики, для обеспечения условий равновесия платформы в установившемся режиме и расчета действующих на платформу

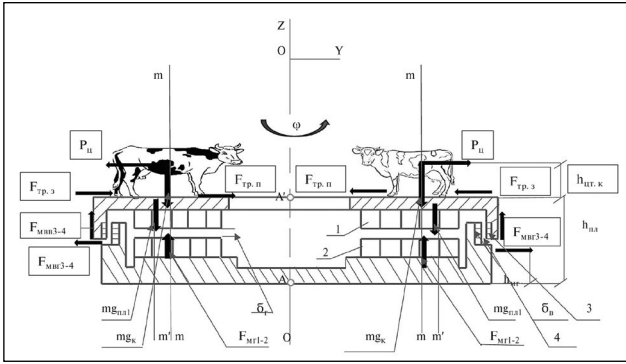


Рис. 2. Схема сил, действующих на левитирующую доильную платформу Карусели с животными при ее полном заполнении: 1 – подвижная горизонтальная магнитная сборка левитации; 2 – неподвижная горизонтальная магнитная сборка левитации; 3 – подвижная вертикальная магнитная сборка боковой стабилизации; 4 – неподвижная вертикальная магнитная сборка боковой стабилизации; $R_{пл}$ – радиус платформы, м; σ_z – воздушный левитационный зазор между горизонтальными магнитными сборками, м; σ_v – воздушный левитационный зазор между вертикальными магнитными сборками, м; $h_{ит.к}$ – расстояние от подвижной части платформы до центра тяжести животного по вертикали, м; $h_{плл}$ – высота платформы, м; $L_{оо-мм}$ – расстояние от оси вращения платформы до центра тяжести животного по вертикали, м; $l_{м-м'}$ – расстояние от центра тяжести животного до центра тяжести доильного места платформы по вертикали, м; $h_{мз}$ – расстояние от нижнего основания платформы до боковой вертикальной магнитной сборки (3–4); точка «А» находится на оси вращения платформы О-О.

сил, необходимо составить три уравнения проекций сил по осям (x, y, z) и три уравнения моментов сил (относительно точки А: знак «+» по часовой стрелке, «-» – против, рис. 2):

$$\begin{cases} \sum F_{zi} = 0, \\ \sum F_{yi} = 0, \\ \sum F_{xi} = 0, \\ \sum M_{zoy} = 0, \\ \sum M_{zox} = 0, \\ \sum M_{xoy} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Рассмотрим действующие на рис. 2 силы и подставим их в уравнения системы (1):

$$\begin{cases} \sum F_{zi} = 2 \cdot m_k \cdot g + 2 \cdot m_{плл} \cdot g - \\ - 2 \cdot F_{мг1-2} - 2 \cdot F_{мвв3-4} = 0, \\ \sum F_{yi} = (F_{трп} - F_{трз}) - (F_{трп} + F_{трз}) + \\ + P_{ц} - P_{ц} + F_{мвг3-4} - F_{мвг3-4} = 0, \\ \sum F_{xi} (+90^\circ) = (F_{трп} + F_{трз}) - (F_{трп} + F_{трз}) + \\ + P_{ц} - P_{ц} + F_{мвг3-4} - F_{мвг3-4} = 0, \\ \sum M_{zoy} = P_{ц} \cdot (h_{ит.к} + h_{плл}) + m_k \cdot g \cdot L_{оо-мм} + \\ + m_{плл} \cdot g \cdot (L_{оо-мм} + l_{м-м'}) + (F_{трп} + F_{трз}) \times \\ \times h_{плл} + F_{мвг3-4} \cdot h_{мг} + F_{мг1-2} \times L_{оо-мм} + \end{cases}$$

$$\begin{aligned} & + F_{мвв3-4} \times R_{плл} - P_{ц} \times (h_{ит.к} + h_{плл}) - m_k \cdot g \times \\ & \times L_{оо-мм} - m_{плл} \cdot g \cdot (L_{оо-мм} + l_{м-м'}) - \\ & - (F_{трп} + F_{трз}) \cdot h_{плл} - F_{мвг3-4} \cdot h_{мг} - F_{мг1-2} \times \\ & \times L_{оо-мм} - F_{мвв3-4} \times R_{плл} = 0, \\ & \sum M_{zox} (+90^\circ) = P_{ц} \cdot (h_{ит.к} + h_{плл}) + m_k \cdot g \times \\ & \times L_{оо-мм} + m_{плл} \cdot g \cdot (L_{оо-мм} + l_{м-м'}) + \\ & + (F_{трп} + F_{трз}) \cdot h_{плл} + F_{мвг3-4} \cdot h_{мг} + F_{мг1-2} \times \\ & \times L_{оо-мм} + F_{мвв3-4} \cdot R_{плл} - P_{ц} \cdot (h_{ит.к} + h_{плл}) - \\ & - m_k \cdot g \cdot L_{оо-мм} - m_{плл} \cdot g \cdot (L_{оо-мм} + l_{м-м'}) - \\ & - (F_{трп} + F_{трз}) \cdot h_{плл} - F_{мвг3-4} \cdot h_{мг} - F_{мг1-2} \times \\ & \times L_{оо-мм} - F_{мвв3-4} \cdot R_{плл} = 0, \\ & \sum M_{xoy} = m_k \cdot g \cdot L_{оо-мм} + m_{плл} \cdot g \times \\ & \times (L_{оо-мм} + l_{м-м'}) + F_{мг1-2} \cdot L_{оо-мм} + \\ & + F_{мвв3-4} \cdot R_{плл} - m_k \cdot g \cdot L_{оо-мм} + m_{плл} \cdot g \times \\ & \times (L_{оо-мм} + l_{м-м'}) - F_{мг1-2} \cdot L_{оо-мм} - \\ & - F_{мвв3-4} \cdot R_{плл} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

Решая первое уравнение из системы (2), получим уравнение левитации:

$$F_{мг1-2} + F_{мвв3-4} = g \cdot (m_k + m_{плл}). \quad (3)$$

Остальные уравнения естественным образом обрабатываются в «0», в силу симметричности нагрузок.

Рассмотрим аналогичную систему уравнений при частичном заполнении платформы в первом и последних циклах работы установки. В качестве допущения примем, что платформа заполнена на 50 % и все животные находятся на одной ее стороне (рис. 3).

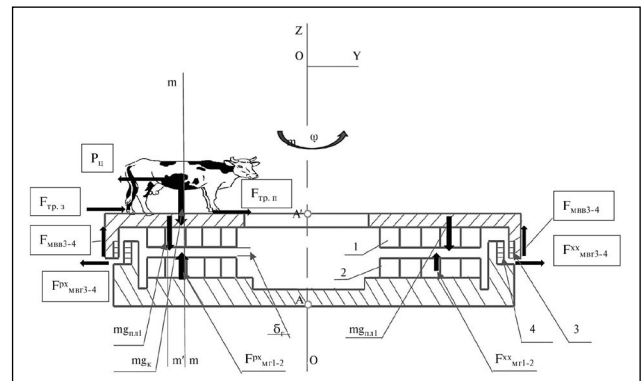


Рис. 3. Схема сил, действующих на левитирующую доильную платформу Карусели при ее частичном заполнении: $F_{мг1-2}^x$ и $F_{мг1-2}^{xx}$ – силы отталкивания вертикального подвеса платформы, действующие между горизонтальными магнитными сборками 1 и 2 соответственно на нагруженной стороне (рабочий ход) и противоположной стороне (холостой ход), Н; $F_{мв3-4}^x$ и $F_{мв3-4}^{xx}$ – силы отталкивания вертикальных боковых магнитных сборок для горизонтальной боковой стабилизации платформы соответственно на нагруженной стороне (рабочий ход) и противоположной стороне без нагрузки (холостой ход), Н.

Особенность работы левитирующей платформы при ее частичном заполнении в начале и конце дойки заключается в возникновении несимметричной одно-сторонней нагрузки (см. рис. 3), которая может вызвать перекося платформы с уменьшением левитационного зазора на нагруженной стороне и его увеличением на противоположной стороне без животных в вертикальной плоскости, а также вызвать дисбаланс платформы в горизонтальной плоскости, вследствие увеличения центробежной силы из-за массы животных, сосредоточенных на нагруженной стороне платформы [10]. Для компенсации этого явления в конструкции платформы могут быть использованы магнитные вертикальные боковые сборки Хальбаха разной ширины [11], что позволит обеспечить как боковую (горизонтальную), так и дополнительную вертикальную стабилизацию (платформы) благодаря созданию дополнительной подъемной силы $F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{xx}}$. Учитывая, что горизонтальный левитационный зазор (25...50 мм) намного меньше радиуса платформы (10...15 м), его изменением и влиянием на конфигурацию сил можно пренебречь. Для предварительного анализа, полагая с небольшим допущением равенство значений $m_{\text{к}} = m_{\text{пл1}}$ и учитывая, что нагруженное доильное место (с коровой) создает удвоенную нагрузку, по отношению к ненагруженному, аналогично будут соотноситься уравнивающие их силы магнитного отталкивания:

$$F_{\text{МГ1-2}}^{\text{px}} = 2 \cdot F_{\text{МГ1-2}}^{\text{xx}} \quad (4)$$

По оси «У» также произойдет перераспределение сил между нагруженной и холостой сторонами, при этом соотношение будет обратным. Сила отталкивания на нагруженной стороне (рабочий ход) будет меньше силы на противоположной стороне (холостой ход) $F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{px}} < F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{xx}}$ из-за увеличения бокового воздушного зазора на нагруженной стороне вследствие действия большей центробежной силы и соответствующего его уменьшения на ненагруженной (холостой) стороне. Для идентификации этих сил запишем такое перераспределение, введя коэффициент неравномерности боковой силы « k », определяемый экспериментально:

$$F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{xx}} = k \cdot F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{px}} \quad (5)$$

Рассмотрим условие равновесия платформы при частичном ее заполнении в соответствии со схемой на рис. 3 в плоскости ZOY:

$$\left\{ \begin{aligned} \sum F_{zi} &= m_{\text{к}} \cdot g + 2 \cdot m_{\text{пл1}} \cdot g - F_{\text{МГ1-2}}^{\text{px}} - \\ &- F_{\text{МГ1-2}}^{\text{xx}} - 2 \cdot F_{\text{МВВ3-4}} = 0, \\ \sum F_{yi} &= F_{\text{трп}} + F_{\text{трз}} + F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{xx}} - F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{px}} - P_{\text{ц}} = 0, \\ \sum M_{\text{зоу}} &= P_{\text{ц}} \cdot (h_{\text{цт.к}} + h_{\text{пл}}) + m_{\text{к}} \cdot g \cdot (L_{\text{oo-mm}}) + \\ &+ m_{\text{пл1}} \cdot g \cdot (L_{\text{oo-mm}} + l_{\text{m-m}}) + F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{xx}} \cdot h_{\text{МГ}} + F_{\text{МГ1-2}}^{\text{xx}} \times \\ &\times L_{\text{oo-mm}} + F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{xx}} \times R_{\text{пл}} - m_{\text{пл1}} \cdot g \cdot (L_{\text{oo-mm}} + l_{\text{m-m}}) - \\ &- (F_{\text{трп}} + F_{\text{трз}}) \cdot h_{\text{пл}} - F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{px}} \cdot h_{\text{МГ}} - F_{\text{МГ1-2}}^{\text{px}} \times \\ &\times L_{\text{oo-mm}} - F_{\text{МВВ3-4}} \cdot R_{\text{пл}} = 0 \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Упрощая и решая систему уравнений (6), с учетом выражения (4), запишем первое уравнение левитации при частичном заполнении платформы:

$$3 \cdot F_{\text{МГ1-2}}^{\text{xx}} + 2 \cdot F_{\text{МВВ3-4}} = m_{\text{к}} \cdot g + 2 \cdot m_{\text{пл1}} \cdot g \quad (7)$$

Аналогично решаем второе уравнение системы боковой стабилизации (6), вводя соответствующую замену:

$$f \cdot m_{\text{к}} \cdot g + k \cdot F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{px}} - \\ - F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{px}} - m_{\text{к}} \cdot \omega^2 \cdot L_{\text{oo-mm}} = 0$$

или

$$F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{px}} = \frac{m_{\text{к}} \cdot (\omega^2 \cdot L_{\text{oo-mm}} - f \cdot g)}{k - 1} \quad (8)$$

Учитывая соотношение (5), запишем:

$$F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{xx}} = \frac{k \cdot m_{\text{к}} \cdot (\omega^2 \cdot L_{\text{oo-mm}} - f \cdot g)}{k - 1} \quad (9)$$

С учетом известного выражения для центробежной силы $P_{\text{ц}} = m_{\text{к}} \cdot \omega^2 \cdot r$ аналогичным образом получим выражение для суммы моментов сил. Полагая, что $r = L_{\text{oo-mm}}$ и с небольшим допущением $F_{\text{трп}} = F_{\text{трз}} = \frac{f \cdot m_{\text{к}} \cdot g}{2}$, а также учитывая выражения (4), (5), (8), (9), запишем:

$$\sum M_{\text{зоу}} = m_{\text{к}} \cdot \omega^2 \cdot L_{\text{oo-mm}} \cdot (h_{\text{цт.к}} + h_{\text{пл}}) + \\ + m_{\text{к}} \cdot g \cdot L_{\text{oo-mm}} + F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{xx}} \cdot h_{\text{МГ}} - F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{px}} \cdot h_{\text{МГ}} - \\ - f \cdot m_{\text{к}} \cdot g \cdot h_{\text{пл}} - F_{\text{МГ1-2}}^{\text{xx}} \cdot L_{\text{oo-mm}} = 0.$$

Решая это уравнение относительно $F_{\text{МГ1-2}}^{\text{xx}}$ с учетом замены и упрощения по ранее приведенным формулам, получим:

$$F_{\text{МГ1-2}}^{\text{xx}} = \frac{m_{\text{к}} \cdot \omega^2 \cdot L_{\text{oo-mm}} \cdot (h_{\text{цт.к}} + h_{\text{пл}}) + m_{\text{к}} \cdot g \cdot L_{\text{oo-mm}} + \\ + \frac{m_{\text{к}} \cdot (\omega^2 \cdot L_{\text{oo-mm}} - f \cdot g) \cdot h_{\text{МГ}} - f \cdot m_{\text{к}} \cdot g \cdot h_{\text{пл}}}{L_{\text{oo-mm}}} \quad (11)$$

Подставляя это выражение в первое уравнение системы (6) и решая относительно $F_{\text{МВВ3-4}}^{\text{xx}}$ с учетом необходимых упрощений, получим выражение для вертикальной подъемной силы боковой магнитной сборки:

$$F_{\text{МВВ3-4}} = \frac{4 \cdot m_{\text{пл1}} \cdot g \cdot L_{\text{oo-mm}} - 3 \cdot m_{\text{к}} \cdot \omega^2 \cdot L_{\text{oo-mm}} \cdot (h_{\text{цт.к}} + h_{\text{пл}} + h_{\text{МГ}}) + \\ + \frac{m_{\text{к}} \cdot g \cdot [3 \cdot f \cdot (h_{\text{МГ}} - h_{\text{пл}} - L_{\text{oo-mm}})]}{2 \cdot L_{\text{oo-mm}}} \quad (12)$$

Угловую скорость можно определить по известной зависимости:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (13)$$

полагая известным число оборотов n (платформа делает за 1 час 5...6 оборотов, или 0,09 об/мин).

Выводы. На основе проведенного анализа транспортных систем с магнитным подвесом обособлена возможность создания принципиально новой конструкции левитирующей вращающейся доильной платформы Карусель на постоянных магнитах.

Разработана технологическая схема ресурсосберегающей конструкции доильной платформы Карусель с использованием горизонтальных левитирующих (подъемных) и вертикальных магнитных сборок боковой стабилизации платформы, исключая необ-

ходимость использования колесных движителей типа «рельс-колесо».

Получены основные уравнения, позволяющие определить необходимые силы магнитной левитации и боковой стабилизации вращающейся платформы на основе постоянных магнитов в основном режиме установившегося движения при полном заполнении платформы животными и частичном ее заполнении в начале и конце цикла доения животных.

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. Научно-технические достижения агроинженерных научных организаций в условиях цифровой трансформации сельского хозяйства / Я. П. Лобачевский, Ю. Ф. Лачуга, А. Ю. Измайлов и др. // *Техника и оборудование для села*. 2023. № 3 (309). С. 2–12.
2. Куртемани А. Патент 2551565. Вращающаяся доильная станция, комплект для ее монтажа и способы ее монтажа и эксплуатации. Опубликовано 27.05.2015 в бюлл. № 15.
3. Зайцев А. А., Соколова Я. В., Пантина Т. А. Инновационное развитие транспортной системы с применением технологии магнитной левитации // *Мир транспорта*. 2019. Т. 17. № 4 (83). С. 36–45.
4. Киселенко А. Н., Сундуков Е. Ю., Тарабукина Н. А. Методы прогнозирования развития транспортных систем в современных условиях // *Мир транспорта*. 2022. Т. 20. № 3. С. 40–49.
5. Vandalaele V., Lambert P., Delchambre A. Non-contact handling in microassembly: acoustical levitation // *Precision Engineering*. 2005. Vol. 29. No. 4. P. 491–505.
6. Антонов Ю. Ф. Устройство левитации и боковой стабилизации на базе ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения // *Транспортные системы и технологии*. 2019. Т. 5. № 4. С. 115–123.
7. Зайцев А. А. Грузовая транспортная платформа на магнитнолевитационной основе: опыт создания // *Инновационные транспортные системы и технологии*. 2015. Т. 1. № 2. С. 5–15. doi: 10.17816/transsyst2015125-15.
8. Лачуга Ю. Ф., Кирсанов В. В. Анализ цикличности развития техники и технологий в различных технологических укладах на примере молочного животноводства // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2021. № 2. С. 54–58.
9. Лобачевский Я. П., Миронов Д. А., Миронова А. В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. № 1. С. 41–50.
10. Пятаков М. А., Поляков П. А., Русакова Н. Е. Изучение взаимодействия ферромагнетиков и расчет меры этого взаимодействия // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2020. Т. 84. № 5. С. 719–722.
11. Брюханов С. В. Патент РФ № 2683122. Устройство магнитной левитации и поперечной стабилизации на постоянных магнитах. Опубл. 26.03.2019. Бюлл. № 9.

Поступила в редакцию 27.02.2024
 После доработки 13.03.2024
 Принята к публикации 02.04.2024

Хранение и переработка

УДК 633.14 «324»: 581.192: 664.6

DOI 10.31857/S2500262724020139 EDN GSAXZJ

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УГЛЕВОДНО-АМИЛАЗНОГО КОМПЛЕКСА И СОДЕРЖАНИЯ БЕЛКА В ЗЕРНЕ НА ХЛЕБОПЕКАРНОЕ КАЧЕСТВО ОЗИМОЙ РЖИ**Е. Н. Шаболкина**, кандидат сельскохозяйственных наук, **С. Н. Шевченко**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН, **А. А. Бишарев**, кандидат сельскохозяйственных наук, **Н. В. Анисимкина**

Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. Н. М. Тулайкова – филиал Самарского федерального исследовательского центра РАН,
446254, Самарская обл., п. Безенчук, ул. Карла Маркса, 41
E-mail: samniish@mail.ru

Исследования проводили в 2018–2022 гг. в Самарской области с целью выявления влияния параметров углеводно-амилазного комплекса и содержания белка в зерне на хлебопекарные свойства для использования наиболее информативных показателей в селекции озимой ржи. Материалом служили 4 сорта – Саратовская 7, Безенчукская 87, Безенчукская 110, Антарес, и 3 перспективные линии – ГК-80, ГКНП-3, ГКНП-4. Почва – чернозем обыкновенный, среднемоощный, среднесуглинистый, предшественник – чистый пар. Величины основных параметров, влияющих на реологические свойства ржаного теста и хлебопекарную оценку, достигали следующих значений: «число падения» – 188...255 с, максимальная вязкость на амилографе – 424...570 е.ам. Связь между высотой аммилограммы и «числом падения» в 2019, 2020 и 2022 гг. была тесная положительная ($r=0,89...0,95$). В 2020 и 2021 гг. наблюдали положительную корреляцию между высотой амилограммы и объемным выходом хлеба ($r=0,82...0,82$), а число падения положительно коррелировало с объемным выходом хлеба ($r=0,65; r=0,76$). Наибольшее содержание водорастворимых пентозанов в зависимости от сорта отмечали в 2019 г. – 2,70...3,55%, в этот год так же наблюдали самый высокий объем хлеба (520...655 см³) и положительную связь между величинами этих показателей ($r=0,72$). Взаимосвязь между содержанием пентозанов и «числом падения» была положительной в 2019, 2020 и 2022 гг. ($r=0,70...0,80$). Содержание белка положительно коррелировало с объемным выходом хлеба ($r=0,75...0,80$) только в 2018 и 2019 гг. Установлена отрицательная корреляционная зависимость между содержанием белка и высотой амилограммы ($r=-0,82...-0,78$). Между содержанием белка и числом падения в 2019, 2020 в 2022 гг. связь была отрицательной ($r=-0,84...-0,67$). При стабилизации белка на приемлемом уровне 12,0...12,8% отбор сортов озимой ржи на хлебопечение необходимо вести сопряженную селекцию по высоте амилограммы и «числу падения».

INFLUENCE OF PARAMETERS OF THE CARBOHYDRATE-AMYLASE COMPLEX AND PROTEIN CONTENT IN GRAIN ON THE BAKING QUALITY OF WINTER RYE**E. N. Shabolkina, S. N. Shevchenko, A. A. Bisharev, N. V. Anisimkina**

Tulajkov Samara Research Agricultural Institute, Samara Federal Research Center, Russian Academy of Sciences,
446254, Samarskaya obl., Bezenchukskii r-n, pos. Bezenchuk, ul. K. Marks, 41,
E-mail: samniish@mail.ru

The studies were carried out in 2018–2022. in the Samara region in order to identify the influence of the parameters of the carbohydrate-amylase complex and protein content in grain on baking properties in order to use the most informative indicators in the selection of winter rye for baking in the conditions of the Middle Volga region. The material was 4 varieties and 3 promising lines – Saratovskaya 7 (standard), Bezenchukskaya 87, Bezenchukskaya 110, Antares and lines GK-80, GKNP-3, GKNP-4. The soil is ordinary chernozem, medium deep, medium loamy, predecessor is pure fallow, repeated four times. The main parameters that determine the state of starch and influence the rheological properties of rye dough and baking evaluation reached: the «falling number» indicator – 188...255 s, the maximum viscosity on the amylograph – 424...570 u.a. The relationship between the height of the amylogram and the «falling number» in 2019, 2020 and 2022. was strongly positive ($r=0,95; r=0,89; r=0,92$). In 2020 and 2021 There was a positive correlation between the height of the amylogram and the volumetric yield of bread ($r=0,86; r=0,82$), the falling number also in these years was significantly positively correlated with the volumetric yield of bread ($r=0,65; r=0,76$). On average, over the years of research, the content of water-soluble pentosans, depending on the variety, varied from 2.46 to 3.00%. In 2019, the highest values of this indicator were noted – 2.70...3.55%, the volume of bread was also the highest – 520...655 cm³, and only this year a positive relationship was noted between the values of these indicators ($r=0,72$). The relationship between pentosans and the «falling number», which is also responsible for the baking properties of winter rye, was significantly positive in 2019, 2020 and 2022. ($r=0,80; r=0,78; r=0,70$). Protein content was positively correlated with bread volume yield ($r=0,80; r=0,75$) only in 2018 and 2019. A negative correlation was established between protein content and amylogram height in 2019, 2020, 2021, 2022. ($r=-0,80; r=-0,80; r=-0,82; r=-0,78$). There is also a negative relationship between protein content and the number of falls in 2019, 2020 and 2022 ($r=-0,84; r=-0,80; r=-0,67$). When selecting varieties of winter rye for baking, it is necessary to carry out conjugate selection based on the height of the amylogram and the «falling number» while stabilizing the protein at an acceptable level of 12.0...12.8%.

Ключевые слова: рожь озимая (*Secale cereale*), крахмал, ферментативная активность, пентозаны, хлебопекарная оценка, коэффициенты корреляции.

Key words: winter rye (*Secale cereale*), starch, enzymatic activity, pentosans, baking assessment, correlation coefficients.

Правильное питание – ключевой компонент здорового образа жизни, в качестве неотъемлемого атрибута которого можно рассматривать ежедневный прием ржаных и ржано-пшеничных продуктов с высоким содержанием клетчатки, минеральных веществ и витаминов.

Озимая рожь продовольственного назначения занимает значимый сегмент современного рынка и расширение разнообразия хлебобулочных изделий с добавлением сеяной, обдирной и обойной муки из зерна ржи очень перспективно. Белки ржаной муки отличаются высоким

содержанием незаменимых аминокислот, в том числе дефицитного лизина и по питательной ценности превосходят белки пшеничной муки, наличие биологически активных, ароматических веществ делают ржаные хлебобулочные изделия не только вкусными, но и полезными [1, 2]. Такая продукция пользуется широким спросом среди населения, поэтому необходимость в сортах ржи с высокими технологическими и хлебопекарными качествами зерна значительно повышается.

При оценке хлебопекарных достоинств ржаной муки наибольшее значение традиционно отводят углеводно-амилазному комплексу: состоянию крахмала, ферментативной активности зерна, пентозанам, особенно водорастворимой фракции, влияющей на структурно-механические свойства теста, а именно на вязкостные и реологические показатели. При тестоведении водорастворимые пентозаны связывают воду, набухают, взаимодействуют с водо- и солерастворимыми белками ржи, увеличивая тем самым водопоглощительную способность муки и образуя очень вязкие коллоидные растворы [3, 4].

На состояние крахмала ржаной муки оказывает влияние высокая амилолитическая активность зерна, которая способствует большей «атакуемости» крахмальных зерен ферментами и быстрому расщеплению крахмала на декстрины, которые снижают качество мучных изделий, придавая липкость мякишу. Пентозаны, выполняющие роль клейковинного каркаса, при низкой ферментативной активности зерна способствуют повышению вязкости при тестообразовании, улучшению формоустойчивости теста, уменьшению влажности мякиша, а также заминаемости и липкости [5, 6]. Такие показатели как крупность зерна, доля водорастворимых пентозанов и хлебопекарные качества ржаной муки тесно взаимосвязаны – чем меньше масса 1000 зерен, тем больше содержание водорастворимых пентозанов в зерне и выше хлебопекарные достоинства [7].

Пентозаны, с одной стороны, играют положительную роль в хлебопечении, с другой – отрицательную в кормопроизводстве: высоковязкие пентозаны нарушают процессы пищеварения и усвоения питательных веществ в организме животных. Кроме того, их высокое содержание нежелательно при производстве этилового спирта, сахара, крахмала [8, 9, 10].

Цель исследований – оценка влияния параметров углеводно-амилазного комплекса и содержания белка в зерне озимой ржи на его хлебопекарные свойства для использования наиболее информативных показателей в селекции культуры на хлебопечение в условиях Среднего Поволжья.

Методика. Работу проводили в 2018–2022 гг. в Самарском научно-исследовательском институте сельского хозяйства им. Н. М. Тулайкова (Самарская обл.). В качестве экспериментального материала были взяты образцы зерна 4 сортов (Саратовская 7, Безенчукская 87, Безен-

чукская 110, Антарес) и 3 перспективных линий (ГК-80, ГКНП-3, ГКНП-4) озимой ржи. Стандартом служил сорт Саратовская 7. Опыты закладывали на полях севооборота лаборатории селекции серых хлебов в питомниках конкурсного испытания. Предшественник – чистый пар, площадь учетной делянки – 20 м², повторность – четырехкратная, размещение – систематическое, агротехника общепринятая для зоны [11].

Почва опытного участка – чернозем обыкновенный, среднемошный, среднесуглинистый. Агробиохимические показатели пахотного слоя почвы: содержание гумуса (по методу Тюрина в модификации ЦИНАО) – 4,2...4,5 %, легкогидролизуемого азота (по Тюрину и Кононовой) – 4,6...4,9 мг/100 г почвы, подвижного фосфора и калия (по Чирикову) – соответственно 22,8...25,0 мг/100 г и 18,7...20,0 мг/100 г почвы, рН солевой вытяжки – 6,5.

В 2018 и 2019 гг. условия осеннего периода были неблагоприятными для роста и развития озимой ржи. Вегетация проходила при повышенном температурном режиме и недостатке влаги (в 2018 г. температура воздуха была на 1,0...5,0 °С выше среднесезонной, осадков выпало 37...42 % от нормы; в 2019 г. – температура на 2,6...4,6 °С выше среднесезонной, сумма осадков на 13,7...15,5 мм меньше нормы). Условия перезимовки были благоприятными, в летний период наблюдали жаркую погоду: в 2018 г. – засухе в течение 3 дней, в 2019 г. – атмосферная засуха в июне, высокая температура 37,7 °С в июле. В 2020 и 2021 гг. осенний период и условия перезимовки в целом были удовлетворительными, но вегетация в 2020 г. сопровождалась значительными колебаниями температурного режима: от 8 °С ниже среднесезонной до засухе в течение 4...6 дней в период налива и созревания зерна. В 2021 г. недостаток осадков в летний период и повышенный температурный режим (атмосферная засуха в июле и низкий гидротермический коэффициент 0,39) способствовали снижению продуктивности зерна. Вегетация в 2022 г. проходила при благоприятных условиях: достаточное количество осадков (135...176 % от нормы) и пониженный температурный режим (на 0,4...4,9 °С ниже среднесезонных значений) способствовали росту и развитию растений, но наблюдали интенсивное полегание.

Оценку качества зерна проводили в соответствии с методиками национальных стандартов Российской Федерации и методов ИСО: содержание белка в зерне – по ГОСТ 10846-91; вязкость водно-мучной суспензии (высота амилограммы, время клейстеризации, температура клейстеризации) – ГОСТ ISO 7973-2013 на амилографе Брабендера; «число падения» – по Хагбергу-Пертену (ГОСТ 30498-97); содержание пентозанов в зерне – орцинол-хлоридным методом в модификации Hashimoto S. [12]; массу 1000 зёрен – по ГОСТ 10842-76. Пробные лабораторные выпечки осуществляли безопар-

Табл. 1. Биохимические и технологические показатели качества зерна сортов озимой ржи (среднее за 2018–2022 гг.)

Параметр	Саратовская 7	Безенчукская 87	Безенчукская 110	Антарес	ГК-80	ГКНП-3	ГКНП-4	НСР ₀₅	CVF*
Содержание, %:									
белка	11,7	12,0	12,6	12,0	12,2	12,8	12,8	0,8	7,5
водорастворимых пентозанов	2,46	2,51	2,96	2,80	2,92	2,74	3,00	0,21	6,9
Масса 1000 зерен, г	31,4	33,4	33,2	31,7	32,5	29,6	30,3	1,6	10,9
Высота амилограммы, е.а.	462	478	494	566	570	424	510	29	28,9
Время клейстеризации, мин	17,7	18,6	19,8	21,6	22,9	21,0	21,0	2,3	3,9
Температура клейстеризации, °С	51,7	53,0	54,7	57,3	59,3	56,5	56,8	-	5,1
Число падения, с	188	201	241	251	244	198	255	39	30,3
Объемный выход хлеба, см ³	457	492	472	500	504	482	495	17	9,2
Общая хлебопекарная оценка, балл	4,1	4,2	4,0	4,1	4,3	4,0	4,2	-	2,5

*коэффициент вариации.

ным методом по методике государственного сортоиспытания. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием дисперсионного и корреляционного анализа по Б. А. Доспехову [13].

Результаты и обсуждение. Программы селекционных исследований, направленные на создание сортов озимой ржи с улучшенными хлебопекарными свойствами, предусматривают изучение большого комплекса биохимических, технологических и хлебопекарных показателей, величины которых зависят от генотипа, погодных условий, зоны выращивания [14]. В наших экспериментах содержание белка, водорастворимых пентозанов, масса 1000 зерен, время клейстеризации, температура клейстеризации, объем хлеба и хлебопекарная оценка демонстрировали слабую изменчивость под влиянием фенотипических факторов $C_{vf} = 2,5...10,9\%$ (табл. 1). Параметры, отвечающие за стабильность углеводно-амилазного комплекса, а именно «число падения» и вязкость водно-мучной суспензии, под воздействием аналогичных факторов варьировали более значительно $C_{vf} = 30,3$ и $28,9\%$ соответственно. Сорты озимой ржи с высокой изменчивостью показателей качества в различных условиях произрастания менее экологически стабильны и пластичны, поэтому требуются новые подходы к ведению селекции по этим признакам.

Известно, что хорошо растворимые и набухающие в воде компоненты (белки, крахмал, пентозаны) оказывают основное влияние на улучшение хлебопекарных свойств озимой ржи. По многолетним данным содержание белка в зерне изучаемых сортов озимой ржи в зависимости от сорта и внешних условий варьировало от $10,1\%$ до $14,5\%$ [15], а за 2018–2022 гг. – от $11,7\%$ до $12,8\%$ (см. табл. 1). Максимальная величина этого показателя в среднем за время проведения исследований отмечена в зерне линий ГКНП-3 и ГКНП-4 – $12,8\%$, у которых белковость зерна превышала средние значения по выборке независимо от метеоусловий. Наибольшее содержание белка в зерне озимой ржи зафиксировано в 2018 г. (Безенчукская 110– $14,5\%$)

и 2019 г. (Безенчукская 110 и линия ГК-80– $13,9\%$). Этому способствовали погодные условия вегетационных периодов, которые вызвали сокращение продолжительности фаз налива и созревания зерна на $6...7$ дней, по сравнению со среднеголетними значениями.

Большая часть ржаных белков водорастворима. В условиях обычного тестоведения они не образуют клейковину, а слизи мешают слипанию клейковинных белков в единый комплекс [1]. При этом белки интенсивно набухают и пептизируются, что в сочетании с их высокой гидратацией и образованием вязких каллоидов (гидратация белков ржи, выше, чем у пшеничных и ячменных в $2...3$ раза) способствует формированию прочного упругого каркаса теста и улучшению хлебопекарных качеств. Содержание белка положительно достоверно коррелировало с объемным выходом хлеба ($r = 0,80...0,75$ при $p < 0,05$) только в 2018 и 2019 гг., когда была отмечена и положительная связь ($r = 0,88$ при $p < 0,01$; $r = 0,79$ при $p < 0,05$) между объемным выходом хлеба и хлебопекарной оценкой (табл. 2). Отрицательную корреляционную зависимость между содержанием белка и высотой амилограммы наблюдали в 2019 г. – $r = -0,80$ (при $p < 0,05$), 2020 г. – $r = -0,80$ (при $p < 0,05$), 2021 г. – $r = -0,82$ (при $p < 0,05$) и 2022 г. – $r = -0,78$ (при $p < 0,01$). Кроме того, в 2019, 2020 и 2022 гг. отмечена отрицательная связь между содержанием белка и «числом падения» ($r = -0,84$; $r = -0,80$; $r = -0,67$ соответственно при $p < 0,05$).

При оценке хлебопекарных достоинств ржи основная роль отводится углеводно-амилазному комплексу: состоянию крахмала, степени поврежденности крахмальных зерен, амилолитической активности зерна, в совокупности все эти факторы оказывают значимое влияние на реологические свойства ржаного теста [4, 6]. Результаты наших исследований свидетельствуют о высоком уровне устойчивости зерна к прорастанию: в среднем величина показателя число падения составляла $188...255$ с, максимальная вязкость на амилографе (высота амилограммы) – $424...570$ е.а., что свидетельствует о низкой ферментативной активности. Наибольшие величины этих показателей отмечены у сорта Антарес, линий

Табл. 2. Значимые коэффициенты корреляции между биохимическими и технологическими показателями качества зерна озимой ржи

Показатель качества	Содержание, %		Масса 1000 зерен, г	Высота амилограммы, е.а.	Клейстеризация		Число падения, с	Объемный выход хлеба, см ³	Общая хлебопекарная оценка, балл
	белка	водорастворимых пентозанов			время, мин	температура, °С			
2018 г.									
Масса 1000 зерен, г	-	-0,86*	-	-	-	-	-	-	-
Температура клейстеризации, °С	-	-	-	-	-	0,90**	-	-	-
Объемный выход хлеба, см ³	0,80*	-	-0,83*	-	-	-	0,68*	-	0,88**
2019 г.									
Высота амилограммы, е.а.	-0,80*	-	-	-	-	-	0,95**	-	-
Число падения, с	-0,84*	0,80*	-	-	-	0,80**	-	-	-
Температура клейстеризации, °С	-	-	0,75**	-	0,95**	-	-	-	-
Объемный выход хлеба, см ³	0,75*	0,72*	-	-	-	-	-	-	0,79*
2020 г.									
Содержание белка, %	-	-	-0,65*	-	-	-	-	-	-
Высота амилограммы, е.а.	-0,80*	-	-	-	-	-	0,75*	-	0,72*
Число падения, с	-0,80*	0,78*	-	0,89**	-	0,87*	-	-	-
Температура клейстеризации, °С	-	-	-	-	0,95**	-	-	-	-
Объемный выход хлеба, см ³	-	-	-	0,86*	-	-	0,65*	-	-
2021 г.									
Масса 1000 зерен	-	-0,79*	-	-	-	-	-	-	-
Высота амилограммы, е.а.	-0,82*	-	-	-	-	0,92*	0,75*	-	0,62*
Температура клейстеризации, °С	-	-	-	-	0,90**	-	-	-	-
Объемный выход хлеба, см ³	-	-	-	0,82*	-	-	0,76*	-	-
2022 г.									
Высота амилограммы, е.а.	-0,78**	0,76*	-	-	-	0,79*	-	-	-
Время клейстеризации, мин	-	-	-	0,86*	-	-	-	-	-
Число падения, с	-0,67*	0,70*	-	0,92**	0,96**	0,95**	-	-	-

*корреляция значима на уровне $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$.

ГК-80 и ГКНП-4, у которых число падения было выше, чем у стандарта Саратовская 7, на 56...67 с, высоте амилограммы – на 48...108 е.ам.

Летний период вегетации в 2020 и 2021 гг. был неблагоприятным для роста и развития культуры, что отразилось на ее зерновой продуктивности. Но в эти годы изучаемые сорта сформировали зерно с максимально высокими в опыте показателями амилографической вязкости (590...870 е.ам.) и числа падения (252...360 с), что можно объяснить очень низкой амилолитической активностью зерна, хлебопекарная оценка подтвердила такие результаты (мякиш хлеба сухой и растрескивающийся). Муку сортов озимой ржи с крепким крахмалом (с вязкостью более 650 е.ам. и числом падения выше 300 с) необходимо использовать в смеси со слабой мукой в качестве улучшителя, чтобы сохранить образовавшийся остов хлеба и одновременно обеспечить растяжение теста под действием пузырьков газа.

Для хлебопекарных свойств ржи характерна определенная специфичность, а именно структура ржаного хлеба при выпечке поддерживается вязкостью большого количества растворенных слизистых веществ. При хлебопечении чрезвычайно важны вязкостные свойства ржаного теста, но его реологические характеристики должны находиться в оптимальных пределах: амилографическая вязкость – 350...650 е.ам., число падения – более 200 с (рожь 1 класса, группа А) [16]. В зерне урожая 2019, 2020 и 2022 гг. выявлена тесная положительная корреляционная зависимость между признаками высота аммилограммы и число падения ($r = 0,89...0,95$ при $p < 0,01$). В 2020 и 2021 гг. отмечена положительная корреляция между высотой амилограммы и объемным выходом хлеба ($r = 0,82...0,86$ при $p < 0,05$), числом падения и объемным выходом хлеба ($r = 0,65...0,76$ при $p < 0,05$).

В технологии приготовления ржаного теста особое положение занимают водорастворимые пентозаны, которые при относительно низком содержании обеспечивают образование высоковязких водных растворов, влияющих на структурно-механические и реологические показатели теста [4, 8]. В среднем за 2018–2022 гг. их содержание в зерне изучаемых образцов ржи варьировало в пределах от 2,46 до 3,00%. Наибольшие величины этого показателя отмечали у сорта Безенчукская 110 (2,96%) и линии ГКНП-4 (3,00%). За годы исследований самыми высокими они были в 2019 г. – 2,70...3,55% (больше, чем в другие годы, на 0,25...0,93%), при этом максимальное содержание водорастворимых пентозанов наблюдали так же у сорта Безенчукская 110 и линии ГКНП-4 – 3,30...3,55%.

По результатам пробных лабораторных выпечек наибольший объемный выход хлеба изучаемых сортов озимой ржи отмечали в 2019 г. – 520...655 см³, что на 80...185 см³ выше, чем в другие годы, и только в этом году установлена достоверная положительная связь между содержанием водорастворимых пентозанов и объемным выходом хлеба ($r = 0,72$ при $p < 0,05$). Можно предположить, что эти признаки коррелируют положительно только в те годы, когда содержание водорастворимых пентозанов в зерне выше средних значений. Кроме того, содержание водорастворимых пентозанов в 2019, 2020 и 2022 гг. положительно коррелировал с числом падения, которое так же характеризует хлебопекарные достоинства озимой ржи ($r = 0,70...0,80$ при $p < 0,05$).

Между содержанием водорастворимых пентозанов и массой 1000 зерен существует достоверная обратная корреляция [7]. Результаты наших исследований свидетельствуют, что в отдельные годы между величинами

этих показателей существовала тесная отрицательная зависимость (в 2018 г. $r = -0,86$ при $p < 0,05$; в 2021 г. $r = -0,79$ при $p < 0,05$), в другие такая связь отсутствовала. Учитывая коэффициенты корреляции, в нашем случае, невозможно объяснить повышение массы водорастворимых пентозанов только уменьшением размера зерна, возможно, существуют другие факторы, которые влияют на такую зависимость, что требует полного анализа и оценки состояния всех параметров качества.

Низкая активность альфа-амилазы в зерне положительно влияла на реологические свойства теста и процесс тестоведения. Результаты анализа данных по качеству хлеба свидетельствуют, что наибольшим объемным выходом хлеба отличались сорт Антарес, линии ГК-80 и ГКНП-4 – 495...504 см³ (на 19 см³ выше среднegrupпового величины). При этом высота амилограммы в образцах муки составляла 510...570 е.ам., число падения – 244...251 с. Форма выпеченных хлебцев была полуовальной, поверхность – гладкой, мякиш характеризовался сравнительно мелкой равномерной пористостью, не заминался, вкус – кисловатый, соответствующий ржаному хлебу. Наименьший объем хлеба 457 см³ отмечен у сорта озимой ржи Саратовская 7 (стандарт), что на 38...47 см³ меньше, чем у остальных исследуемых образцов.

При оценке хлебопекарных достоинств сортов озимой ржи необходимо учитывать такой фактор, как крупность и целостность крахмальных зерен [16], поскольку мелкие и поврежденные зерна легче поддаются действию амилолитических ферментов, это ведет к снижению вязкости и увеличению содержания сахаров при приготовлении теста, что в свою очередь уменьшает объем хлеба и качество мякиша. В 2018 и в 2019 гг. отмечена положительная связь между общей хлебопекарной оценкой и объемным выходом хлеба ($r = 0,79$ при $p < 0,05$; $r = 0,88$ при $p < 0,01$ соответственно). В 2020 и 2021 гг. хлебопекарная оценка достоверно положительно коррелировала с амилографической вязкостью ($r = 0,62...0,72$ при $p < 0,05$).

Важными критериями активности амилаз при оценке состояния крахмала считают температуру и время клейстеризации крахмала [17, 18]. За годы исследований наиболее высокие величины этих показателей наблюдали у сорта Антарес, линий ГК-80 и ГКНП-4. Максимальную в исследуемой выборке температуру (59,3 °C) и время клейстеризации (22,9 мин) отмечали у линии ГК-80, что выше, чем у других сортов, соответственно на 2,0...7,6 °C и 1,9...5,2 мин. Высокая температура клейстеризации [1] необходима для сортов муки, содержащих крахмальные зерна из наружных слоев эндосперма, которые более устойчивы к «амилазной атаке».

Во все годы исследования установлена высокозначимая положительная корреляция между временем и температурой клейстеризации ($r = 0,90...0,96$ при $p < 0,01$). Кроме того, в 2021 и 2022 гг. выявлены значимые положительные связи между температурой клейстеризации и высотой амилограммы ($r = 0,92$; $r = 0,79$ при $p < 0,01$), а в 2019, 2020 и 2022 гг. – с числом падения ($r = 0,80$, $r = 0,87$, $r = 0,95$ при $p < 0,05$).

Выводы. Результаты биохимических и технологических исследований показали высокий уровень устойчивости зерна изученных сортов озимой ржи к прорастанию. Величины основных параметров, определяющих состояние крахмала, которое влияет на реологические свойства ржаного теста и хлебопекарную оценку, находились на следующем уровне: число падения – 188...255 с, максимальная вязкость на амилографе – 424...570 е.ам. Наилучшие величины этих

показателей и качество хлеба (наибольший объёмный выход 495...504 см³) отмечены у сорта Антарес, линий ГК-80 и ГКНП-4. В 2019, 2020 и в 2022 гг. установлена тесная положительная корреляция между признаками высота аммилограммы и число падения ($r = 0,89...0,95$ при $p < 0,01$). В 2020 и 2021 гг. отмечена тесная положительная связь между высотой аммилограммы и объёмным выходом хлеба ($r = 0,82...0,86$ при $p < 0,05$), а также числом падения и объёмным выходом хлеба ($r = 0,65...0,76$ при $p < 0,05$).

Содержание водорастворимых пентозанов в среднем за годы исследований варьировало от 2,46 до 3,00%. Наибольшие величины этого показателя (2,70...3,55%) наблюдали в 2019 г., когда был отмечен и самый высокий объём хлеба (520...655 см³). Одновременно только в этом году установлена достоверная положительная связь между содержанием водорастворимых пентозанов и объёмным выходом хлеба ($r = 0,72$ при $p < 0,05$). В 2019, 2020 и 2022 гг. отмечена значимая положительная взаимосвязь между содержанием пентозанов и числом падения, которое так же характеризует хлебопекарные достоинства озимой ржи ($r = 0,70...0,80$ при $p < 0,05$).

Содержание белка положительно значимо коррелировало с объёмным выходом хлеба только в 2018 и 2019 гг. – $r = 0,80$ и $0,75$ соответственно. Во все годы исследования установлена отрицательная корреляционная зависимость между содержанием белка и высотой аммилограммы ($r = -0,82...-0,78$), а в 2019, 2020 и 2022 гг. и с числом падения ($r = -0,84$; $-0,80$; и $-0,67$ соответственно).

При отборе сортов озимой ржи для использования зерна на хлебопекарные цели необходимо вести сопряжённую селекцию по высоте аммилограммы и числу падения при стабилизации белка на приемлемом уровне 12,0...12,8%.

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. Бушук В., Кэмпбелл У. П., Древис Э. М. Рожь: производство, химия, технология. М.: Колос, 1980. 247с.
2. Методы исследования качества цельносмолотой муки из зерна ржи / М. Л. Пономарева, С. Н. Пономарев, Г. С. Маннапова и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 4. С. 13–21.
3. Henry R. J. A comparison of the non-starch carbohydrates in cereal grains // J. Sci. Food and Agris. 1985. Vol. 36. No. 12. P. 1243–1253.

4. Многопараметрическая оценка качества зерна популяций озимой ржи с различной вязкостью водного экстракта / А. А. Гончаренко, В. А. Черных, А. В. Макаров и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 1. С. 31–37.
5. Гончаренко А. А. Новые направления в селекции озимой ржи на целевое использование // Зернобобовые и крупяные культуры. 2016. № 2 (18). С. 25–31.
6. Влияние водорастворимых пентозанов на хлебопекарные свойства озимой ржи / Е. Н. Шаболкина, А. А. Бишарев, Н. В. Анисимкина и др. // Зерновое хозяйство России. 2019. № 1 (61). С. 49–51.
7. Исмагилов Р. Р., Гайсина Л. Ф. Содержание водорастворимых пентозанов в зерне ржи разной фракции // Пиво и напитки. 2015. № 3. С. 44–46.
8. Генотипическая изменчивость содержания пентозанов в зерне озимой ржи / М. Л. Пономарева, С. Н. Пономарев, М. Ш. Тагиров и др. // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. № 5. С. 1041–1048.
9. Перспективы использования низкопентозановой ржи для хлебопекарных целей / В. Д. Кобылянский, Л. И. Кузнецова, О. В. Солодوخина и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2018. № 6. С. 3–6.
10. Исмагилов Р. Р., Алимгафаров Р. Р., Савина А. А. Применение ферментных препаратов – эффективный прием снижения содержания пентозанов в зерне озимой ржи // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 1. С. 46–50.
11. Горянин О. И. Возделывание полевых культур в Среднем Заволжье. Самара: СамНЦ РАН, 2018. 345 с.
12. Hashimoto S., Shogren M. D., Pomeranz Y. Cereal pentosans Their ensimatin and significance. I. Pentosans in wheat and milled wheat products // Cereal Chem. 1987. Vol. 64. P. 30.
13. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2014. 351с.
14. Урбан Э. П. Влияние погодных условий на формирование хлебопекарных свойств озимой ржи в связи селекцией на целевое использование // Земледелие и защита растений. 2015. № 5 (102). С. 8–11.
15. Перспективы селекции озимой ржи на хлебопекарные цели / Е. Н. Шаболкина, А. А. Бишарев, Н. В. Анисимкина и др. // Зерновое хозяйство России. 2018. № 6. С. 59–63.
16. Беркутова Н. С. Методы оценки и формирования зерна. М.: Росагропромиздат, 1991. 206 с.
17. Динамика признаков качества зерна озимой ржи в зависимости от выхода муки и вязкости водного экстракта / А. А. Гончаренко, А. В. Осипова, С. А. Ермаков и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 4. С. 3–9.
18. Пономарева М. Л., Пономарев С. Н. Оптимизация параметров качества зерна для селекции озимой ржи // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2019. Т. 23. № 3. С. 320–327.

Поступила в редакцию 27.02.2024

После доработки 12.03.2024

Принята к публикации 02.04.2024