

ISSN 2500-2627

Номер 3

Май - Июнь 2023



РОССИЙСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ НАУКА

www.sciencejournals.ru

Научно-теоретический журнал



Подготовка научных кадров

Ю.С. Ценч

Подготовка новой генерации молодых исследователей в научных учреждениях 3

Растениеводство, защита и биотехнология растений

С.И. Лаврентьева, О.Н. Бондаренко, А.А. Блинова, А.А. Пензин, Е.М. Фокина, Л.Е. Иваченко

Характеристика морфологических и хозяйственно ценных признаков форм дикой и сортов культурной сои ВНИИ сои и их идентификация методом микросателлитного анализа 9

Л. А. Косых

Исходный материал для создания сортов ярового ячменя в лесостепной зоне Среднего Поволжья 14

Т.Я. Прахова, Н.Р. Таишев

Сортовые особенности и приемы повышения продуктивности горчицы белой 19

А.М. Миронов, М.Ю. Акимов, В.А. Кольцов, Р.Е. Богданов

Исследование комплекса фенольных соединений в плодах сливы домашней (*Prunus domestica* L.) в условиях Тамбовской области 25

О.П. Гаврилова, А.С. Орина, Т.Ю. Гагкаева

Разнообразие и патогенность грибов рода *Fusarium*, встречающихся в микобиоте сои 31

И.Э. Памирский, П.Д. Тимкин, Э.А. Тимофеев, Д.Д. Котельников, Л.Н. Алексейко, С.В. Климович, Е.А. Бородин, К.С. Голохваст

Исследование молекулярных механизмов связывания гербицидов с белками-мишенями сорных растений методами *in silico* 36

А.П. Савва, В.Д. Надыкта, Т.Н. Тележенко, В.А. Суворова

Отечественный трехкомпонентный гербицид Аризон для защиты посевов кукурузы центральной зоны Краснодарского края 44

Земледелие и мелиорация

О.А. Минакова, Л.В. Александрова, Т.Н. Подвигина

Потребление NPK гибридами сахарной свеклы отечественной и зарубежной селекции на различных фонах основного удобрения в ЦЧР 49

А.Д. Аленичева, О.А. Щуклина

Эффективность внесения различных доз азотного удобрения на яровой тритикале в условиях Московской области 55

Зоотехния и ветеринария

Н.Ю. Сафина, З.Ф. Фаттахова, Э.Р. Гайнутдинова, Ш.К. Шакиров

Ассоциация полиморфизма гена коэнзим Q9 (COQ9) с показателями репродуктивных качеств голштинских коров 59

Д.А. Баймуканов, О. А. Алиханов, С.Д. Монгуш, Ю.А.Юлдашбаев, В.А. Демин

Генетические параметры молочной продуктивности верблюдиц казахстанской популяции 63

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

А.И. Завражнов, А.В. Балашов, А.А. Завражнов, Н. Ю. Пустоваров

Управление процессом высева семян пропашных культур электрифицированными сеялками 67

Training of Academic Staff**Yu.S. Tsench**

Creation of young researchers new generation in scientific institutions 3

Plant Growing, Plant Protection and Biotechnology**S.I. Lavrent'yeva, O.N. Bondarenko, A.A. Blinova, A.A. Penzin, E.M. Fokina, L.E. Ivachenko**

Characteristics of morphological and economically valuable features of wild and cultivated soybean forms and varieties of the soybean research institute and their identification by microsatellite analysis 9

L. A. Kosykh

Source material for creating spring barley varieties in the forest-steppe zone of the Middle Volga region 14

T.Ya. Prakhova, N.R. Taishev

Variety features and methods of increasing the productivity of white mustard 19

M.A. Mironov, M.Yu. Akimov, V.A. Koltsov, R.E. Bogdanov

Investigation of the complex of phenolic compounds in fruits of the domestic plum (*Prunus domestica* L.) in conditions of Tambov region 25

O.P. Gavrilova, A.S. Orina, T.Yu. Gagkaeva

Diversity and pathogenicity of the *Fusarium* fungi occurred in soybean mycobiota 31

I.E. Pamirsky, P.D. Timkin, E.A. Timofeev, D.D. Kotelnikov, L.N. Alexeyko, S.V. Klimovich, E.A. Borodin, K.S. Golokhvast

Study of molecular mechanisms of herbicide binding to target proteins of weeds by in silico methods 36

A.P. Savva, V.D. Nadykta, T.N. Telezhenko, V.A. Suvorova

Domestic three-component herbicide Arizona for the protection of corn crops in the central zone of the Krasnodar territory 44

Farming and Amelioration**O.A. Minakova, L.V. Alexandrova, T.P. Podvigina**

Consumption of NPK by domestic and foreign sugar beet hybrids with different main fertilizer backgrounds in the Central Black-Earth region 49

A.D. Alenicheva, O.A. Shchukina

The effectiveness of applying various doses of nitrogen fertilizer on spring triticale in the conditions of the Moscow region 55

Animal Science and Veterinary Medicine**N.Yu. Safina, Z.F. Fattakhova, E.R. Gaynutdinova, Sh.K. Shakirov**

Association of coenzyme Q9 (COQ9) gene polymorphism with traits of reproductive qualities of holstein cows 59

D. A. Baimukanov, O. A. Alikhanov, S. D. Mongush, Yu. A. Yuldashbayev, V. A. Demin

Genetic parameters of milk productivity of camels of the Kazakh population 63

Mechanization, Electrification, Automation and Digitalization**A.I. Zavrazhnov, A.V. Balashov, A.A. Zavrazhnov, N. Yu. Pustovarov**

Control of sowing seeds of row crops with electrified seeders 67

Подготовка научных кадров

УДК 378.004.12

DOI: 10.31857/S2500262723030018, EDN: EYAONO

**ПОДГОТОВКА НОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ МОЛОДЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ
В НАУЧНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ****Ю.С. Ценч**, доктор технических наук, главный научный сотрудник*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
119334, Москва, 1-й Институтский проезд, 5
E-mail: vimasp@mail.ru*

В статье подчеркивается, что курс руководства нашей страны на технологическую независимость отечественной экономики предполагает в числе прочих задач обеспечение предприятий квалифицированными высоко профессиональными молодыми кадрами. В связи с этим задача существенного повышения эффективности подготовки научной молодежи является особо актуальной. Над разработкой этой проблемы вплотную занимаются многие коллективы исследователей, в том числе и профессорско-преподавательский состав ВИМ. В процессе решения этой задачи были использованы статистические методы, проводился анализ документов, архивных материалов, демографических факторов, возрастной структуры научных сотрудников. В результате исследования были выявлены возможность и необходимость организации непрерывной системы высшего профессионального образования, включающие подготовку молодых специалистов для научных учреждений на основе преемственности (магистратуры – аспирантуры – докторантуры). Важнейшими качествами молодых современных ученых-новаторов должны быть профессионализм, патриотизм, преемственность и высокая культура. Полученные результаты представляют практический интерес для подготовки передовых кадров в научных учреждениях, в частности, для становления каждого конкретного молодого ученого-исследователя.

**CREATION OF YOUNG RESEARCHERS NEW GENERATION
IN SCIENTIFIC INSTITUTIONS****Yu.S. Tsench***Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
119334, Moskva, 1-i Institutskii proezd, 5
E-mail: vimasp@mail.ru*

The article emphasizes that the course of the leadership of our country on the technological independence of the domestic economy involves, among other tasks, providing enterprises with qualified, highly professional young personnel. In this regard, the task of significantly improving the effectiveness of the training of scientific youth is particularly relevant. Many research teams, including the faculty of VIM, are closely engaged in the development of this problem. In the process of solving this problem, statistical methods were used, documents, archival materials, demographic factors, and the age structure of researchers were analyzed. As a result of the research, the possibility and necessity of organizing a continuous system of higher professional education were identified, including the training of young specialists for scientific institutions on the basis of continuity (master's – postgraduate – doctoral studies). The most important qualities of young modern scientists and innovators should be professionalism, patriotism, continuity and high culture. The results obtained are of practical interest for the training of advanced personnel in scientific institutions, in particular, for the formation of each particular young researcher.

Ключевые слова: генерация молодых исследователей, карьерный рост молодого ученого, целостная непрерывная система профессионального высшего образования, приоритетные направления, умное и интеллектуальное сельское хозяйство, ступени образования, ступени научной карьеры, наставник, научный руководитель, непрерывная система образования.

Key words: generation of young researchers, career growth of a young scientist, integral continuous system of professional higher education, priority areas, smart and intelligent agriculture, educational stages, stages of scientific career, mentor, supervisor, continuous education system.

В День российской науки 8 февраля 2023 года во время заседания Совета по науке и образованию Президент нашей страны В. В. Путин поздравил молодых исследователей с научными достижениями и отметил, что молодые люди нередко делают крупные научные открытия. При этом он определил курс на технологическую независимость отечественной экономики, обеспечить которую могут высокопрофессиональные кадры, способные в кратчайшие сроки создавать передовые продукты для ключевых отраслей.

За короткий срок России предстоит создать и вывести на новый уровень собственные критически важные технологии, обеспечить скорейшее внедрение новых, прорывных разработок, чтобы эти достижения способствовали укреплению суверенитета и безопасности страны, росту качества жизни наших людей. При этом необходимость разработки новых технологий и материалов в сельском хозяйстве, медицине и генетике

для создания качественных продуктов, медикаментов и лекарств особенно актуальна. В связи с этим нужно сконцентрировать все имеющиеся резервы, в том числе провести кадровые преобразования, особенно в научно-исследовательском секторе экономики.

Приоритетным направлением научно-технологического развития агропромышленного комплекса должен быть переход к передовым цифровым, интеллектуальным технологиям, роботизированным и биомашинным системам, инновационным материалам, новым способам конструирования, к применению искусственного интеллекта. Результатом этого должно быть создание «умного», или «интеллектуального» сельского хозяйства со значительным повышением эффективности производства сельскохозяйственной продукции, существенным расширением ассортимента продовольственных товаров, улучшением условий труда и безопасности людей и окружающей среды [1].

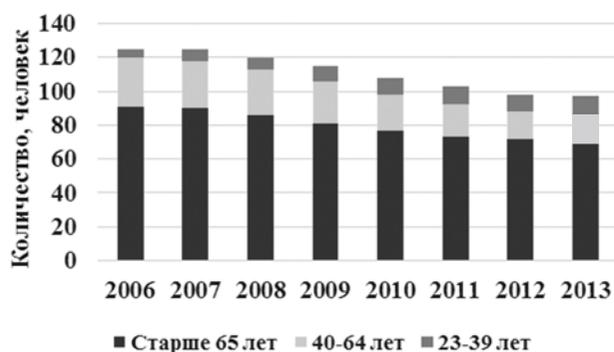


Рис. 1. Научные сотрудники ФНАЦ ВИМ по возрастным группам (2006-2013) годы.

Развитие новых научных направлений и инновационных технологий требует получения новых знаний, которые, в свою очередь, формируют новые ключевые компетенции.

В этой связи подготовка и адаптация к практической деятельности современных высококвалифицированных специалистов приобретает первостепенное значение.

Российской системе подготовки кадров предстоит приспособляться к неизбежным изменениям технологических инноваций, производственных и социальных отношений, что невозможно без смещения акцентов с традиционной системы получения знаний на современные технологии развития ключевых компетенций. С учетом стремительного развития новых технологий подготовка кадров должна сосредоточиться на трансляции новых знаний и формировании ключевых личностных, профессиональных качеств, которые будут критически необходимы специалистам с высокой квалификацией [2].

В настоящее время во всем мире во многих отраслях производства идет процесс «вымывания среднего». Цифровизация, роботизация, искусственный интеллект лишают работы специалистов со средним уровнем квалификации и знаний. Многими экспертами прогнозируется, что в недалеком будущем востребованными станут лишь элитные кадры и специалисты с новыми ключевыми компетенциями. Как отметил Председатель Правительства РФ М. В. Мишустин на недавнем выступлении в Государственной Думе – за квалифицированными кадрами предстоит серьезная борьба.

Таким образом, перед нами – представителями научного и образовательного сообщества – стоит задача существенного повышения эффективности подготовки молодых научных сотрудников для результативной исследовательской деятельности и продвижения инноваций [3].

Другой мотив – побуждение необходимости нахождения новых форм активной подготовки молодых научных кадров – базировался на анализе демографических факторов и возрастной структуры научных сотрудников. Анализ показал, что в первом десятилетии XXI века преобладающей возрастной группой в научных институтах сельскохозяйственного профиля была группа ученых с возрастом от 65 до 85 лет. Это славное ветеранское поколение ученых, создавшее фундамент отечественной сельскохозяйственной науки, но, к огромному сожалению, неуклонно сокращающееся по естественным причинам. Средняя возрастная группа также яркая и результативная, но немногочисленная. Вследствие причин, связанных с распадом Советского Союза, многие, тогда еще молодые ученые, ушли из науки, а другие – в науку не пошли. И совсем малочисленная группа молодых

ученых в возрасте от 23 до 39 лет, не способная заменить в перспективе специалистов старшего поколения. Ситуация, сложившаяся к середине второй десятилетки XXI века, выглядела, как светофор с горящим красным светом. Необходимо было осуществить принятие кардинальных решений для омоложения коллектива, количественного и качественного развития научной молодежи. Нужно было включить зеленый свет продвижению научной молодежи (рис. 1).

Методика. В 2012 году был принят Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации», благодаря которому аспирантура получила статус третьей ступени высшего образования. Наиболее глубокие изменения коснулись научно-исследовательских институтов, которые получили возможность существенно расширить сферу образовательной деятельности, а именно: аккредитовывать магистратуру и осуществлять программы магистерской подготовки (Федеральный закон от 29 декабря 2012 г. N 273-ФЗ).

Таким образом, для форсирования подготовки молодых научных сотрудников в научно-исследовательских институтах появилась законодательная база [2].

Первыми НИИ, которые открыли магистратуру, стали крупные Федеральные научные центры: Федеральный научный центр ВИМ, Медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова, Институт физики твердого тела. Далее эту инициативу подхватили Курчатовский центр, Федеральный центр биологических систем, Центр пищевых систем им. Горбатова и некоторые другие учреждения.

В этот же период в научном сообществе проходили бурные дискуссии по удалению аспирантуры с третьей ступени образования и возвращению ей прежнего статуса [5]. В 2022 году вступили в силу новые федеральные государственные требования к программам подготовки научных кадров в аспирантуре (Приказ Министерства науки и высшего образования РФ от 20 октября 2021 г. № 951 «Об утверждении федеральных государственных требований к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре)). Произошел переход от модели аспирантуры «Ступень образования» к новой модели «Первая ступень научной карьеры».

Это решение нацелено на увеличение количества аспирантов в коллективах научных организаций; количества аспирантов, направленных для целевого обучения; а также обязательной становится защита диссертации [4,5].

Таким образом, в результате инициативы крупных научных центров, с одной стороны, и своевременной законодательной базы, с другой стороны, появилась возможность организации непрерывной системы высшего профессионального образования как фактора подготовки молодых исследователей для научных учреждений на основе преемственности (магистратуры – аспирантуры – докторантуры), учитывающей специфику научного учреждения [1, 2].

В процессе преобразований был получен опыт Федерального научного центра ВИМ, в котором была создана уникальная система высшего профессионального образования.

Результативность этой системы определяется следующими факторами: наличием собственной стратегии развития подготовки кадров, которая нацелена на подготовку именно научных сотрудников; согласованием магистерских и аспирантских учебно-исследовательских программ; современной учебно-исследовательской инфраструктурой; ориентацией на инновационное состояние развития науки в агропромышленном комплексе и смежных отраслях [6, 7].



Рис. 2. Карьерная траектория становления молодого ученого.

Уже на стадии магистратуры молодежь вливается в научные коллективы лабораторий и совмещает освоение образовательных программ с исследовательской деятельностью.

Наш опыт показывает, что в научную магистратуру должны приходить выпускники бакалавриата с индивидуальными творческими способностями и сложившимся интересом к научной деятельности [8,9].

Для формирования и выявления этих качеств на этапе бакалавриата мы сотрудничаем с ведущими вузами страны. В первую очередь, с нашим ближайшим партнером – Российским государственным аграрным университетом МСХА имени К. А. Тимирязева, а также МГТУ имени Баумана [10].

Донским техническим университетом, Московским политехническим университетом и другими вузами страны.

Важнейшими критериями при этом являются формирование первичной мотивации и выявление индиви-

дуальных способностей к научной деятельности у старшеклассников через профориентацию и подготовку целевого обучения [11, 12].

Таким образом, нами выстроена целостная непрерывная Система профессионального образования подготовки научных кадров от общего образования до подготовки кадров высшей квалификации, которая позволяет сформировать карьерную траекторию развития молодого ученого (рис. 2).

Для реализации Системы непрерывной профессиональной подготовки научных кадров с 2016 года в Центре ВИМ создана и функционирует кафедра общенаучных и специальных дисциплин. Профессорско-преподавательский состав кафедры включает 2-х академиков РАН, 9 докторов наук и 5 кандидатов наук.

Под руководством профессорско-преподавательского состава студенты и аспиранты, помимо освоения учебно-исследовательской программы, ежегодно участвуют в научных конференциях, семинарах и выставках.



Рис. 3. Подготовка новой генерации молодых ученых для научных учреждений.

Лучшие аспиранты включаются в выполнение крупных грантов и научных проектов.

Члены профессорско-преподавательского состава кафедры являются наставниками, научными руководителями, принимают непосредственное участие в становлении и развитии молодых ученых, передавая им знания, традиции, культуру, этику, духовность. Опытные педагоги помогают талантливой молодежи в освоении особого мира науки, знаний, высокого профессионализма, нравственности и нашей самобытной культуры.

В Указе Президента РФ была подчеркнута огромная роль научного руководителя; в связи с этим 2023 год объявлен годом педагога и наставника (Указ Президента Российской Федерации от 27.06.2022 № 401 «О проведении в Российской Федерации Года педагога и наставника»). 2 марта этого года В. В. Путин лично дал ему старт, открыв программу Центра знаний «Машук» и подчеркнув, что Миссия Года это – признание особого статуса педагогов и ученых, выполняющих наставническую деятельность.

«Слово, мудрость наставников, – отметил опрезидент, вдохновляют учеников на научные, технологические триумфы, служат надёжным ориентиром в избранной профессии».

Традиции наставничества, десятилетиями формировавшиеся в нашей стране, сейчас крайне востребованы. В условиях стремительных технологических изменений именно такой личный контакт позволяет быстрее передавать от учителя к ученику лучший опыт и знания, вместе работать над решением нестандартных задач в системе образования и науки, во всех сферах жизни [13,14].

Наши педагоги – наставники, представители и последователи славной Горячкинской агроинженерной школы – руководители ключевых направлений и научных школ. Традиции наставничества, преемственности, передача знаний и опыта всегда были сильны в ВИМе. Они были заложены именно академиком В. П. Горячкиным, продолжены его последователями, поддерживаются и развиваются действующими учеными-наставниками [15].

Преподаватели кафедры обеспечивают реализацию образовательных и учебно-исследовательских программ магистратуры и аспирантуры, которые направлены на получение обучающимися опыта в исследовательской деятельности.

Результаты и обсуждение. С 2016 по 2023 год ежегодно при поддержке Минобрнауки выделяются бюджетные и целевые места для подготовки научных сотрудников, и за пять лет Центр ВИМ получил более ста таких мест в аспирантуру и магистратуру.

Так, в 2016 году было выделено 3 бюджетных места в магистратуру, а в 2023 году их стало 46, при этом количество аспирантов к 2023 году увеличилось до 56 человек. Таким образом, наш коллектив студентов магистратуры и аспирантов составляет более 100 человек (рис. 3).

Активным и целеустремленным студентам и аспирантам предлагается трудоустройство в профильные лаборатории Центра ВИМ. Таким образом, освоение образовательных программ сочетается у них с реальными исследованиями в специализированных лабораториях. При этом, что немаловажно, решаются финансовые проблемы, отпадает необходимость искать подработку на стороне.

Весьма ценной является поддержка нашего Департамента при открытии и финансировании молодежных исследовательских лабораторий, которые нацелены на выполнение передовой тематики и при этом позволяют создавать новые рабочие места, привлекать необходимых, особо ценных, молодых специалистов, обеспечивать профессиональный рост молодежи.

В ВИМе создано несколько новых молодежных лабораторий: Интеллектуальные цифровые системы мониторинга, диагностики и управления процессами в сельскохозяйственном производстве; Инновационные конструкционные полимерные, композитные и биокомпозитные материалы деталей сельскохозяйственных машин; Цифровые двойники инновационных рабочих органов и оборудования для сельскохозяйственного производства; Лаборатория 3-D проектирования рабочих органов; Инновационные технологии и оборудование для переработки продукции растениеводства.

Помимо образовательных и исследовательских программ, руководство Центра уделяет большое внимание социальной поддержке научной молодежи. За пять прошедших лет стипендии Президента РФ и Правительства РФ получили 8 аспирантов. Наши молодые ученые получили 34 Гранта по программе Президента РФ, программам и проектам РФФИ, РНФ, Старт, Умник. Более

Полный цикл системы непрерывного высшего образования в центре ВИМ



65% обучающихся трудоустроены в Центре ВИМ

Защиты диссертаций

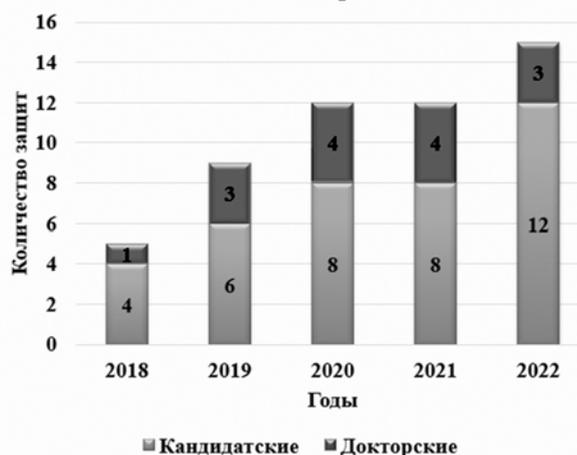


Рис. 4. Подготовка новой генерации молодых ученых для научных учреждений.

20 человек получили возможность улучшить свои бытовые условия, получив собственное жилье; 12 молодых ученых получили государственные жилищные сертификаты; земельные участки в жилищно-строительном кооперативе были выделены 10 специалистам.

Омоложение коллектива, качество подготовки аспирантов, становление молодых ученых в среде научных коллективов, активная работа наставников, наличие двух диссертационных советов – эти факторы обеспечили существенное увеличение защит кандидатских и докторских диссертаций. Так, в 2022 году было защищено 12 кандидатских и 3 докторских диссертации, это в три раза больше по сравнению с периодом за три предыдущих года (рис. 4).

Молодые исследователи ВИМа – кандидаты наук, защитившие диссертации в 2018–2022 годах, начинали свой научный путь с магистратуры и аспирантуры Центра ВИМ. Сегодня многие из них возглавляют профильные и инновационные молодежные лаборатории, делают первые шаги в преподавательской и наставнической деятельности на кафедре общенаучных и специальных дисциплин, подают большие надежды в дальнейшем росте и совершенствовании.

За последние пять лет в результате выстроенной непрерывной системы подготовки научных кадров центра ВИМ, эффективной работы наставников и научных подразделений защищено более 10 докторских диссертаций.

Молодые доктора наук успешно влились в систему управления институтом, выполняя важную и ответственную работу.

Среди них заместители директора, руководители научных направлений, руководители отделов и лабораторий. Молодые доктора наук руководят крупными проектами и грантами, ведут активную преподавательскую и наставническую деятельность. Таким образом, в институте созданы все условия для карьерного роста и формирования молодого управленческого авангарда.

Проведенный комплексный анализ возрастных категорий научных сотрудников показал, что ситуация коренным образом изменилась. В результате новой кадровой стратегии руководства ВИМ, выстроенной непрерывной системы подготовки, поддержки нашего Департамента и Отделения сельскохозяйственных наук РАН удалось резко омолодить контингент научных

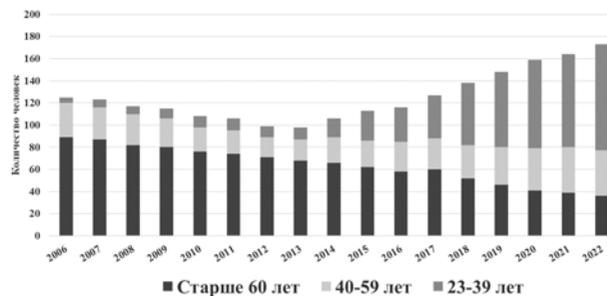


Рис. 5. Научные сотрудники ФНАЦ ВИМ по возрастным группам (2006–2023 годы).

сотрудников, довести долю молодых ученых до 70 % от общего числа научных сотрудников ВИМа. В институте удалось включить зеленый свет становлению и развитию молодежи! Поэтому можно с уверенностью сказать, что в ВИМе сложилась новая генерация молодых ученых (рис. 5).

Пристального внимания заслуживает еще один очень важный аспект – воспитательный. На наш взгляд, воспитательная работа должна основываться на преемственности традиций, сохранении духовных ценностей, нравственности, патриотизме и гражданственности.

В этой связи представляется чрезвычайно важным и своевременным Указ Президента страны от 09.11.2022 № 809 «Об утверждении Основ государственной политики по сохранению и укреплению традиционных российских духовно-нравственных ценностей». Указ определяет необходимость и усиление деятельности, в том числе научных организаций по защите исторической памяти, бережению исторического опыта, изучению творческого наследия выдающихся ученых, передаче этого научного наследия молодежи.

Историческая миссия отечественного образования и науки всегда определяла воспитание гражданственности и патриотизма, ответственности за судьбу страны [11, 12].

В этой связи представляется актуальным и целесообразным решение этой проблемы с помощью создания новой специальности «История науки и техники (технические науки)».

В ВИМе получена лицензия на организацию этой специальности в аспирантуре; открыт диссертационный совет; специальность аккредитована в нескольких



Рис. 6. Карьерная траектория становления молодого ученого.



Рис. 7. Генерация молодых ученых в научных учреждениях.

научных журналах Центра ВИМа; защищена первая докторская диссертация.

В реализации этого направления в ВИМе создана историко-тематическая экспозиция «Становление и развитие научно-технического и кадрового обеспечения механизации и электрификации сельского хозяйства» (<https://vim.ru/center/istoriko-tematicheskaya-ekspozitsiya/>), которая охватывает исторические периоды с XVIII по XXI век и демонстрирует огромный вклад наших ученых в развитие механизации сельского хозяйства и обеспечение продовольственной безопасности страны.

Выводы. Недавним важным событием было внесение поправок в Федеральный Закон «Об образовании в Российской Федерации» (Федеральным законом от 06.02.2023 № 15-ФЗ «О внесении изменений в статью 31 Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации»), которые регламентируют право научных организаций осуществлять образовательную деятельность по программам специалитета с определением критериев открытия этих программ в научных организациях. Опыт Центра ВИМа по подготовке научных кадров дает основание, что поправки в данный закон обеспечат реализацию нового процесса создания генерации молодых специалистов в научно-исследовательских институтах. В случае открытия специалитета в научном учреждении Целостная система профессионального образования подготовки научных кадров будет включать в себя все ступени высшего образования и выглядеть следующим образом (рис. 6).

Происходит глобальная смена поколений, в том числе поколений ученых.

Успех и будущее российской сельскохозяйственной науки за новой генерацией молодых научных сотрудников. Нам представляется, что ее важнейшими качествами должны быть профессионализм, патриотизм, преимственность и высокая нравственность, духовность и культура (рис 7).

Литература

1. Ценч Ю. С. Система непрерывного образования в Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. № 4. С. 11–13. DOI : 10/22314/2073-7599-2021-15-4-11-13.
2. Аспирантура в структуре научно-исследовательского института в новых условиях / А. Ю. Измаилов, Я. П. Лобачевский, И. Г. Смирнов и др. // *Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства : сборник научных докладов*

Международной научно-технической конференции. М. : Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 2015. С. 41–44.

3. Ерохин М. Н., Ананьин А. Д., Дорохов А. С. Реализация магистерских программ по направлению «Агроинженерия» // *Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина»*. 2014. № 4(64). С. 80–83.
4. Мартынов В. Г., Шейнбаум В. С. Инженерная педагогика в контексте инженерной деятельности // *Высшее образование в России*. 2022. Т. 31. № 6. С. 152–168. DOI : 10.31992/0869-3617-2022-31-6-152-168.
5. Актуальные проблемы модернизации третьей ступени высшего образования и практики реформирования / П. И. Касаткин, М. И. Иноземцев, Е. А. Антохова, и др. // *Высшее образование в России*. 2022. Т. 31. № 1. С. 141–158. DOI : 10.31992/0869-3617-2022-31-1-141-158.
6. Рунова Н. В. Проблемы и перспективы развития актуальных механизмов государственно-частного партнерства в системе высшего профессионального образования // *Инновационный Вестник Регион*. 2013. № 4. С. 69–73.
7. Сенин П. В. Интеграция вузовской и академической науки // *Машинно-технологическая станция*. 2012. № 12. С. 34.
8. Беленок И. Л. Проблемы готовности выпускников общеобразовательных школ к обучению в организациях высшего образования // *Сибирский учитель*. 2020. № 1 (128). С. 5–8.
9. Гирфанова Е. Ю. Противоречия и проблемы сопряжения образовательных и профессиональных стандартов в системе высшего образования // *Современные проблемы науки и образования*. 2022. № 6–1. С. 44. DOI : 10.17513/spno.32255.
10. Ценч Ю. С. Профессиональные стандарты как фактор сокращения дефицита квалификационных кадров // *Вестник Челябинской государственной агроинженерной академии*. 2014. Т. 67. № 2. С. 62–65.
11. Токатлыгиль Ю. С., Салиева А. Ж., Кажимова К. Р. Научно-исследовательская подготовка бакалавров дошкольного образования // *Вестник ЗКУ*. 2020. № 2(78). С. 11–18. DOI : 10.37238/1680-0761.2020.78(2).2.
12. Акутина С. П., Калинина Т. В. Актуальные проблемы развития наставничества : опыт и тенденции нового времени // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021. № 4–3 (106). С. 8–13. DOI : 10.23670/IRJ.2021.106.4.063.
13. Осипов П. Н. Наставничество как социально-педагогический феномен // *Управление устойчивым развитием*. 2023. № 1 (44). С. 102–108. DOI : 10.55421/2499992X_2023_1_102.
14. Федорова Н. М., Чуркина Н. И. Организация научно-исследовательской деятельности студентов магистратуры в сетевой форме // *Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий*. 2016. № 4(20). С. 161–166.
15. Ерохин М. Н. Творец агроинженерной науки. К 150-летию со дня рождения почётного академика В. П. Горячкина // *Вестник Российской академии наук*. 2018. № 7. С. 650–658. DOI : 10.31857/S086958730000089-5.

Поступила в редакцию 02.02.2023
После доработки 10.03.2023
Принята к публикации 04.04.2023

Растениеводство, защита и биотехнология растений

УДК 633.853.52: 631.522:575:577.29

DOI: 10.31857/S250026272303002X, EDN: EYNBQM

ХАРАКТЕРИСТИКА МОРФОЛОГИЧЕСКИХ И ХОЗЯЙСТВЕННО ЦЕННЫХ ПРИЗНАКОВ ФОРМ ДИКОЙ И СОРТОВ КУЛЬТУРНОЙ СОИ ВНИИ СОИ И ИХ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕТОДОМ МИКРОСАТЕЛЛИТНОГО АНАЛИЗА

С.И. Лаврентьева, кандидат биологических наук,
О.Н. Бондаренко, А.А. Блинова, А.А. Пензин,
Е.М. Фокина, кандидат сельскохозяйственных наук,
Л.Е. Иваченко, доктор биологических наук

Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт сои»,
 675027, Амурская обл., Благовещенск, Игнатьевское ш., 19
 E-mail: lana.lavrenteva.1984@mail.ru

Исследования проводили с целью изучения морфологических и хозяйственно ценных признаков, а также молекулярно-генетического полиморфизма аллелей с использованием микросателлитной ДНК сортов культурной и форм дикой сои для идентификации и паспортизации их генотипов. Методом ПЦР-анализа с использованием шести микросателлитных локусов (*Satt1, Satt2, Satt5, Satt9, Sourpr1* и *Soyhsp176*) получены уникальные профили ДНК исследуемых сортов и форм сои. Выявлены 24 аллеля, число которых на локус варьирует от 2 до 10. Для каждого локуса величина информационного полиморфизма (PIC) составляла от 0,28 до 0,86, средняя – 0,62, эффективное число аллелей – от 1,38 до 6,92, среднее – 3,30. Сорта культурной сои различались между собой на 1...4 локуса. Дендрограмма исследуемых генотипов сои, построенная методом невзвешенного попарно-группового анализа (UPGMA) в программе POPGENE версии 1.32, выявила два крупных кластера. В кластер I вошли культурные сорта сои, в кластер II – формы дикой сои, что указывает на их значительные генетические различия. Наиболее контрастные морфологические различия выявлены для сортов Топаз и Даурия, как по фенотипу (окраске и интенсивности опушения, цвету, форме семян и рубчика), так и по всем хозяйственно ценным признакам (продолжительность периода вегетации – 95 и 112 суток; урожайность – 26,8 и 30,9 ц/га, высота растений – 64 и 81 см; высота прикрепления нижнего боба – 13 и 16 см, масса 1000 семян – 174,7 и 185,4 г; содержание белка – 40,3 и 38,2 %; содержание масла – 19,2 и 19,8 % соответственно). По результатам исследования впервые составлены молекулярно-генетические паспорта 9 сортов культурной сои селекции Всероссийского научно-исследовательского института сои для идентификации их генотипов.

CHARACTERISTICS OF MORPHOLOGICAL AND ECONOMICALLY VALUABLE FEATURES OF WILD AND CULTIVATED SOYBEAN FORMS AND VARIETIES OF THE SOYBEAN RESEARCH INSTITUTE AND THEIR IDENTIFICATION BY MICROSATELLITE ANALYSIS

S.I. Lavrent'yeva, O.N. Bondarenko, A.A. Blinova, A.A. Penzin, E.M. Fokina, L.E. Ivachenko

All-Russian Scientific Research Institute of Soybean,
 675027, Amurskaya obl., Blagoveshchensk, Ignat'evskoe sh., 19
 E-mail: lana.lavrenteva.1984@mail.ru

The research was carried out in order to study morphological, economically valuable traits and molecular genetic polymorphism of alleles using microsatellite DNA of 9 varieties of cultivated and 5 forms of wild soybeans of the All-Russian Soybean Research Institute for Identification and certification of their genotypes. Unique DNA profiles of the studied soybean varieties and forms were obtained by PCR analysis using six microsatellite loci (*Satt1, Satt2, Satt5, Satt9, Sourgr1* and *Soyhsp176*). 24 alleles were identified, the number of which per locus ranges from 2 to 10. For each locus, the value of information polymorphism (PIC) varied from 0.28 to 0.86, the average was 0.62, the effective number of alleles ranged from 1.38 to 6.92, the average was 3.30. It should be noted that the varieties of cultivated soybeans had differences between themselves from 1 to 4 loci. The dendrogram of the studied soybean genotypes, constructed by the method of unweighted pairwise-group analysis (UPGMA) in the POPGENE program VERSION 1.32, revealed two large clusters. Cluster I includes cultivated soybean varieties, cluster II includes wild soybean forms, which indicates their significant genetic differences. It is shown that the most contrasting morphological differences were revealed for Topaz and Dauria varieties, both by phenotype (coloration and intensity of pubescence, color, shape of seeds and hem), and by all economically valuable signs (vegetation period – 95 and 112 days; yield – 26.8 and 30.9 c/ha, plant height, – 64 and 81 cm; the height of attachment of the lower bean – 13 and 16 cm, the weight of 1000 seeds – 174.7 and 185.4; protein content – 40.3 and 38.2 %; oil content – 19.2 and 19.8 %, respectively). For the first time, molecular genetic passports of 9 varieties of cultivated soybeans of the Soybean Research Institute for the certification of their genotypes have been compiled.

Ключевые слова: *Glycine max*, *Glycine soja*, SSR-анализ, ДНК-маркеры, микросателлитные локусы, молекулярно-генетическая паспортизация.

Key words: *Glycine max*, *Glycine soja*, SSR-analysis, DNA-markers, microsatellite locus, molecular genetic certification.

Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) – одна из основных мировых сельскохозяйственных культур. Амурская область входит в топ Российских регионов по ее выращиванию. В ФГБНУ ФНИЦ Всероссийский научно-исследовательский институт сои (ВНИИ сои) основой создания подавляющего большинства сортов служит синтетическая селекция, главным методом которой выступает гибридизация. В скрещиваниях используют дикую сою (*Glycine soja* Siebold & Zucc), сорта миро-

вой коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова (ВИР), мутантные линии, местные сорта и образцы, адаптированные к почвенно-климатическим условиям региона. Отбор в гибридных популяциях проводят методом «педигри» с прослеживанием родословной по потомству [1]. Незначительная часть сортов создана путем аналитической селекции – обычным отбором отклоняющихся форм из сортов популяций. За более чем 90-летний период

в институте создано более 100 сортов сои, из которых 58 были районированы и нашли широкое распространение, как в Амурской области, так и за ее пределами. На сегодняшний день в Государственный реестр селекционных достижений занесено 34 сорта селекции ВНИИ сои, разрешенных для использования по Дальневосточному региону, на которые поддерживают патенты, 4 сорта проходят Государственное сортоиспытание.

Сорта, созданные во ВНИИ сои, отличаются значительным разнообразием по морфологическим и хозяйственно ценным признакам, относятся к различным группам спелости с продолжительностью периода вегетации от 87 до 125 суток и урожайностью от 24 до 42 ц/га [2].

Отдаленная гибридизация – одно из эффективных направлений использования родового потенциала растений. Необходимость широкого применения методов межвидовой гибридизации в селекции обусловлена тем, что существует определённый верхний предел генетического разнообразия, который может быть заключен в генофонде одного вида [1]. Вовлечение в селекцию дикорастущих форм позволяет широко использовать потенциальные возможности культуры, посредством объединения в одном генотипе ценных с хозяйственной точки зрения признаков разных видов и родов [3]. Поэтому необходимо изучение разных видов сои, чтобы понимать насколько различны в генетическом плане имеющиеся сорта и какие из них следует использовать в последующих скрещиваниях для создания нового селекционного материала, с учетом генетической дивергенции сои, а также разработки на этой основе системы маркеров для идентификации и паспортизации генотипов [4].

Дальневосточный регион РФ – уникальный природный банк, где сосредоточены многочисленные формы дикорастущей сои, которые целесообразно изучать и использовать в селекционном процессе в качестве исходного материала с целью повышения адаптивного потенциала культуры и увеличения диапазона изменчивости в гибридных популяциях соевого агроценоза [5].

Дикая уссурийская соя относится к числу недостаточно исследованных видов. Исходные формы всех возделываемых сортов сои происходят из Юго-Восточной Азии. Первичным генцентром дикой уссурийской сои *G. soja* считают Северный Китай, остров Тайвань, полуостров Корея и Дальний Восток России с северным ареалом в Амурской области [6].

Для оценки хозяйственно ценных признаков и идентификации сортов сои используют морфометрические, физиологические и биохимические методы, которыми фиксируют до 40...50 качественных и количественных признаков. ДНК-маркеры применяют для оценки исходного селекционного материала многих культур – картофеля, пшеницы и др. [7, 8, 9]. Для установления генетических особенностей сортов сои хорошо подходят уникальные профили ДНК, полученные с использованием микросателлитов [10]. Микросателлитные последовательности есть во всех организмах, включая растения, они

Табл. 1. Сумма активных температур и количество осадков по периодам вегетации (2020–2022 гг.)

Год	Сумма активных температур, °С	Количество осадков за период, мм
2020	2597	614
2021	2607	509
2022	2501	399
Среднегодовое значение	2471	441

распределены по всему геному, расположены в основном в некодирующих областях и, следовательно, мало подвержены действию естественного отбора [11]. Такой метод анализа применяют для сертификации и паспортизации сортов сои в крупнейших странах – экспортерах этой культуры. Считают, что для их различения достаточно 4...6 правильно подобранных микросателлитных маркеров [10]. Высокий уровень полиморфизма аллелей в SSR-локусах, достаточный для идентификации сортов сои, отметили многие исследователи [12, 13, 14]. При этом уникальность микросателлитных ДНК сортов сои амурской селекции изучена мало.

Цель исследований – оценить морфологические и хозяйственно ценные признаки, а также молекулярно-генетический полиморфизм аллелей с использованием микросателлитной ДНК сортов культурной и форм дикой сои для идентификации и паспортизации их генотипов.

Методика. Объектом исследования служили 9 сортов селекции ВНИИ сои разного происхождения и различных групп спелости – Кружевница, Сентябринка, Веретейка, Лидия, Умка, Даурия, Золушка, Лазурная, Топаз и 5 коллекционных форм дикой сои генофонда ВНИИ сои, отобранных в 80-х гг. XX в. в 3 районах Амурской области – КА-1413, КА-342 (Архаринский район), КБел-72, (Белогорский район), КБл-29, КБл-24 (Благовещенский район). Каждая форма дикой сои – однородная линия, которую определяли по ежегодной морфологической оценке при пересеве потомства одного растения.

Во ВНИИ сои ежегодно проводят пересев всех сортов, включённых в Госреестр в течении последних 20 лет в соответствии с технологией, разработанной для южной сельскохозяйственной зоны Амурской области на участках полевого севооборота лаборатории селекции и первичного семеноводства (с. Садовое, Тамбовского района) на типичной луговой черноземовидной среднемошной почве, со среднекислой реакцией почвенной среды (pH_{KCl} 4,9...5,1), содержанием гумуса – 3,5...3,9 % (по Тюрину), минерального азота – 20,2...24,5 мг/кг почвы, подвижного фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) – 75...98 мг/кг почвы и 165...197 мг/кг почвы соответственно (по Кирсанову).

В годы проведения исследований метеосостояние существенно различалось по влагообеспеченности, температурному режиму и гидротермическому коэффициенту (ГТК) в период вегетации сои (табл. 1, рис. 1), что позволило провести объективную оценку изучаемого



Рис. 1. Гидротермический коэффициент по периодам вегетации сои (2020–2022 гг.).

материала. Самым влажным (+173 мм осадков к норме) был 2020 г. Недобор осадков в период вегетации культуры (–42 мм) отмечали в 2022 г. Сумма активных температур во все года превышала среднеголетнее значение на 30...136 °С.

Сорта сои высевали в питомнике конкурсного сортоиспытания сеялкой СН-16 на делянках 45 м² в соответствии с установленной нормой высева всхожих семян: для скороспелых сортов – 55...65 шт./м², средне-спелых – 45...50 шт./м². В течение вегетации проводили фенологические наблюдения и оценки по всходам, цветению, созреванию. Формы дикой сои высевали вручную в коллекционном питомнике, семена перед посевом скарифицировали препаративной иглой, площадь питания одного растения 90 × 100 см. Все сорта и формы дикой сои анализировали по морфологическим и хозяйственно ценным признакам.

Для составления молекулярно-генетических формул и установления степени генетического родства использовали семена, отобранные из нескольких растений каждого сорта. Во время уборки урожая с делянки конкретного сорта отбирали по десять семян, которые проращивали согласно ГОСТ 12044-93 в рулонах фильтровальной бумаги в течение 7-и суток при температуре 25 °С и хранили при температуре –18 °С до проведения исследований.

Выделение и очистку ДНК из проростков сои осуществляли с использованием набора реагентов ООО Синтол (Россия). Концентрацию ДНК определяли на флуориметре MAXLIFE и разбавляли до 100 нг/мкл.

Для амплификации выделенной ДНК в исследовании использовали 6 пар SSR-праймеров, предложенных ранее в качестве маркерной системы для идентификации и паспортизации сортов культурной сои [7]. При этом для 5 пар праймеров температура отжига была увеличена на 3...8 °С, а для праймера *Satt1* ее не меняли. ПЦР проводили в 3-х кратной повторности. Амплификацию выделенных фрагментов ДНК сои на амплификаторе CFX96 (Real-time) (Bio-Rad laboratories Inc., США) осуществляли в 50 мкл готовой реакционной смеси расширенного набора для проведения ПЦР с HS-Taq (ООО «Биолабмикс»). Продукты реакции разделяли методом электрофореза в 2 %-м агарозном геле, окрашенном бромистым этидием. Визуализацию осуществляли с использованием гель-документирующей системы GelDoc EZ (Bio-Rad laboratories Inc., США).

Идентификацию и определение размеров аллелей микросателлитных локусов проводили с использованием

программы Image Lab Version 6.0.1 4 Standard Edition. Для маркирования молекулярной массы использовали готовый набор ДНК (DNA Ladder, 100+bp). Выявленные по каждому локусу аллели обозначали цифрами через запятую: аллель с максимальной молекулярной массой обозначали цифрой 1, далее по мере ее уменьшения – цифрами 2, 3, 4. Величину информационного полиморфизма (polymorphic information content – PIC) и эффективное число аллелей (n_e) вычисляли по следующим формулам:

$$PIC_i = 1 - \sum_{j=1}^n P_{ij}^2, \quad n_e = 1 / \sum_{j=1}^n P_{ij}^2,$$

где – P частота j паттерна для локуса i , суммирование распространяется на n паттернов [10].

Статистическую обработку данных осуществляли с использованием пакета программы POPGENE версии 1.32. Индекс генетических различий (index of genetic differences – DN) исследуемых форм дикой и сортов культурной сои рассчитывали на основании бинарной матрицы, в которой отмечали присутствие/отсутствие аллелей – соответственно 1/0. Для визуализации обнаруженных генетических различий была построена дендрограмма методом невзвешенного попарно-группового анализа (unweighted pairwise-group method analysis – UPGMA).

Результаты и обсуждение. Из исследуемых 9 сортов сои 6 созданы в путем синтетической селекции (5 методом внутривидовой искусственной гибридизации – Кружевница, Сентябринка, Веретейка, Лидия, Золушка, 1 методом межвидовой естественной гибридизации – Умка) и 3 путем аналитической селекции – Лазурная, Даурия, Топаз [1, 2, 15].

Наиболее схожими между собой по большинству морфологических признаков (форма листа, окраска венчика цветка, опушение, цвет и форма семян и рубчика) были сорта Лазурная, Даурия и Умка, которые относятся к одной группе спелости и характеризуются сходными хозяйственно ценными признаками. Самые контрастные морфологические различия, как по фенотипу (окраске и интенсивности опушения, цвету, форме семян и рубчика), так и по всем количественным признакам (периоду вегетации, высоте растений и прикреплению нижнего боба, массе 1000 семян, содержанию масла и белка в семенах и др.) отмечены между сортами Топаз и Даурия.

При оценке 5 форм дикой сои различия по морфологическим признакам не отмечено, однако выявлены существенные различия по большинству хозяйственно

Табл. 2. Характеристика сортов сои селекции ФГБНУ ФНЦ ВНИИ сои и форм дикой сои по хозяйственно ценным признакам (среднее за 2020–2022 гг.)

Сорт/форма	Продолжительность периода вегетации, сут.	Урожайность, ц/га	Высота растения, см	Высота прикрепления нижнего боба, см	Масса 1000 семян, г	Содержание в семенах, %	
						белка	масла
Топаз	95	26,8	64	13	174,7	40,3	19,2
Сентябринка	100	31,8	70	15	153,2	41,2	18,5
Веретейка	104	27,2	84	17	135,1	39,2	18,0
Лидия	104	30,6	71	15	155,9	39,4	19,9
Кружевница	106	30,3	74	13	136,4	40,2	18,8
Даурия	112	30,9	81	16	185,4	38,2	19,8
Лазурная	113	31,0	82	16	176,2	38,4	19,7
Умка	113	29,7	81	15	184,7	37,5	19,9
Золушка	119	35,5	83	18	188,6	41,0	18,5
НСР ₀₅	5,3	2,1	6,5	3,0	7,4	3,4	2,2
КБл-24*	101	29,5	122	4	22	46,9	11,9
КБл-29*	103	65,9	156	5	28	47,5	11,4
КБел-72*	103	41,7	117	4	21	48,0	11,4
КА-342*	102	48,6	126	5	32	46,6	10,9
КА-1413*	100	50,0	130	5	29	48,8	10,8
НСР ₀₅	3,1	7,7	12,3	0,9	1,1	1,2	0,8

*форма дикой сои.

Табл. 3. Характеристика исследованных микросателлитных локусов

Локус	Молекулярная масса, п.н.	Наблюдаемое число аллелей (n _a)	Эффективное число аллелей (n _e)	Величина информационного полиморфизма (PIC)
<i>Satt1</i>	125...154	4,00	3,17	0,68
<i>Satt2</i>	154...176	2,00	2,94	0,66
<i>Satt5</i>	136...175	4,00	3,17	0,68
<i>Satt9</i>	120...212	10,00	6,92	0,86
<i>Soyprp1</i>	178...198	2,00	2,26	0,56
<i>Soyhspl76</i>	115...126	2,00	1,38	0,28
Среднее	-	4,00	3,30	0,62

ценных признаков. Особенно следует отметить различия у образцов с одинаковым происхождением КБл-24 и КБл-29, выделенных из естественных популяций сои Благовещенского района Амурской области. Величины всех исследуемых хозяйственно ценных признаков у формы КБл-24 были выше, чем у КБл-29: высота растения – на 28 %, высота прикрепления нижнего боба – на 25 %, масса 1000 семян – на 27 % (табл. 2). Отмечена обратная зависимость между содержанием белка и масла в семенах, как культурной, так и дикой сои, что согласуется с литературными данными [16]. Наибольшее содержание белка и наименьшее масла отмечено у сортов Сентябринка, Золушка и формы дикой сои КА-1413. В среднем по выборкам дикая соя обладает большей белковостью (на 8,1 %) и меньшей масличностью (на 7,9 %), чем культурная. Максимальная в опыте масличность семян (19,9 %) отмечена у сортов Лидия, Умка и формы дикой сои КБл-24.

Результаты амплификации ДНК исследуемых образцов сои показали, что шесть используемых SSR-локусов полиморфны, и выявили 24 аллеля. Число аллелей на локус варьировало от 2 до 10: у локусов *Satt2*, *Soyprp1*, *Soyhspl76* – по два аллеля, *Satt1*, *Satt5* – по четыре аллеля, *Satt9* – 10 аллелей (табл. 3). Среднее число аллелей на локус было равно 4,00. Один из показателей, характеризующих информативность локуса, – эффективное число аллелей (n_e). Для исследуемых образцов оно варьировало от 1,38 до 6,92. Среднее эффективное число аллелей на локус составило 3,30.

Другой важный показатель информативности микросателлитных локусов – величина информационного полиморфизма PIC. Она приближается к 1, если локус имеет много аллелей с приблизительно равной частотой встречаемости и равен 0, если локус мономорфный. В нашем исследовании PIC для изученных шести SSR-локусов варьировал от 0,28 для *Soyhspl76* до 0,86 для *Satt9*. Локусы *Satt5* и *Satt1* оказались полиморфными, как в группе форм дикой сои, так и у культурных сортов. Заметим, что сорта культурной сои и ее дикие формы различались между собой длиной локусов *Satt2* (B₁₅₄ и B₁₇₆) и *Soyhspl76* (F₁₁₅ и F₁₂₆). В целом значения PIC исследованных локусов достаточны для использования их в целях идентифи-

кации и паспортизации сортов сои. Средняя величина информационного полиморфизма для изученной группы сортов составила 0,62.

На основании выявленного набора аллелей микросателлитных локусов для каждого сорта были составлены молекулярно-генетические паспорта или так называемые «генетические формулы генотипов» (табл. 4). Несмотря на достаточный дискриминационный потенциал, предложенной маркерной системы были получены идентичные наборы аллелей для генотипов форм дикой сои КА-1413, КБл-24 и КБл-29 (A₁₄₅B₁₇₆C₁₇₅D₁₂₀E₁₇₈F₁₂₆), что требует дальнейших исследований для выявления уникальных локусов (см. табл. 4). Для остальных образцов зафиксированы уникальные наборы аллелей, различия наблюдали по одному и более локусам. Следует отметить локус *Satt9*, для которого в исследуемых сортах культурной сои выявлены различные аллели (D₂₀₆, D₂₀₀, D₂₁₂, D₁₈₆, D₁₅₉, D₁₆₈, D₁₇₆, D₁₅₄, D₁₃₈), а для дикой сои – только один (D₁₂₀).

Анализ дендрограммы, построенной по результатам исследований, позволил выделить в выборке исследованных генотипов сои два основных кластера (рис. 2). В кластер I вошли культурные сорта селекции ФНЦ ВНИИ сои, в кластер II – формы дикой сои. Это согласуется с тем, что сорт Умка был создан путем межвидовой естественной гибридизации и наиболее родственным для него был образец дикой сои [15]. Наряду с различными генетическими формулами и выявленными различиями в морфологических, биометрических и биохимических показателях (см. табл. 1), у сортов Лазурная (pop 8) и Топаз (pop 9), выведенных путем аналитической селекции, отмечена наибольшая генетическая идентичность среди образцов культурной сои. Самым отличающимся оказался сорт сои Золушка, который на дендрограмме отстоит дальше всех от остальных сортов в кластере I. В состав второго кластера вошли пять форм дикой сои. При этом различить три дикорастущих генотипа КБл-24 (pop 10), КБл-29 (pop 11) и КА-1413 (pop 14) не удалось (генетическая идентичность (GI) = 1,000, генетическое расстояние (GD) = 0,0000).

Как правило, фенотип – это отражение генотипа и морфологически сходные растительные организмы, имеют одинаковую генетическую основу, однако в наших исследованиях такая зависимость наблюдалась не всегда. Например, сорта Лазурная, Даурия и Умка были сходными между собой (визуально не различимыми) по подавляющему большинству морфологических признаков (форма листа, окраска венчика цветка, опушение, цвет и форма семян и рубчика). Эти же сорта относятся к одной группе спелости и имеют близкие хозяйственно ценные признаки (урожайность – 29,7...31,0 ц/га; высота растения – 81...82 см; высота прикрепления нижнего боба – 15...16 см; масса 1000 семян – 176,2...185,4 г; белок – 37,5...38,4 %; масло – 19,7...19,9 %). Однако в процессе изучения микросателлитных локусов установлено,

Табл. 4. Полиморфизм микросателлитных локусов ДНК и формулы сортов селекции ФГБНУ ФНЦ ВНИИ сои и форм дикой сои

Сорт	Формула*	Форма	Формула*
Кружевница	A ₁₃₇ B ₁₅₄ C ₁₅₀ D ₂₀₆ E ₁₉₆ F ₁₁₅ **	КБл-24	A ₁₄₅ B ₁₇₆ C ₁₇₅ D ₁₂₀ E ₁₇₈ F ₁₂₆
Сентябринка	A ₁₄₅ B ₁₅₄ C ₁₃₆ D ₂₀₀ E ₁₇₈ F ₁₁₅	КБл-29	A ₁₄₅ B ₁₇₆ C ₁₇₅ D ₁₂₀ E ₁₇₈ F ₁₂₆
Верейка	A ₁₃₇ B ₁₅₄ C ₁₅₀ D ₂₁₂ E ₁₉₆ F ₁₁₅	КБел-72	A ₁₄₅ B ₁₇₆ C ₁₆₀ D ₁₂₀ E ₁₇₈ F ₁₂₆
Лидия	A ₁₃₇ B ₁₅₄ C ₁₅₀ D ₁₈₆ E ₁₉₆ F ₁₁₅	КА-342	A ₁₄₅ B ₁₇₆ C ₁₇₅ D ₁₂₀ E ₁₇₈ F ₁₂₆
Умка	A ₁₃₇ B ₁₅₄ C ₁₃₆ D ₁₃₈ E ₁₉₆ F ₁₁₅	КА-1413	A ₁₄₅ B ₁₇₆ C ₁₇₅ D ₁₂₀ E ₁₇₈ F ₁₂₆
Даурия	A ₁₄₅ B ₁₅₄ C ₁₅₀ D ₁₆₈ E ₁₉₆ F ₁₁₅		
Золушка	A ₁₅₄ B ₁₅₄ C ₁₆₀ D ₁₇₆ E ₁₇₈ F ₁₁₅		
Лазурная	A ₁₄₅ B ₁₅₄ C ₁₅₀ D ₁₅₄ E ₁₇₈ F ₁₁₅		
Топаз	A ₁₄₅ B ₁₅₄ C ₁₃₆ D ₁₃₈ E ₁₇₈ F ₁₁₅		

*код локуса A – *Satt1*; B – *Satt2*; C – *Satt5*; D – *Satt9*; E – *Soyprp1*; F – *Soyhspl76*.
 **нижний индекс – аллельное состояние данного локуса (п.н.).

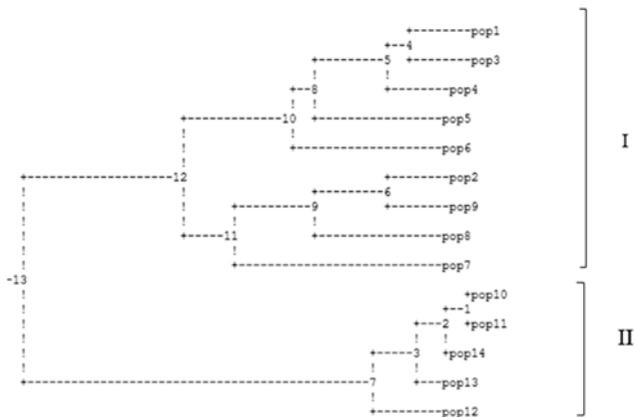


Рис. 2. Дендрограмма генотипов сои:
 pop 1 – Кружевница, pop 2 – Сентябрька,
 pop 3 – Веретейка, pop 4 – Лидия, pop 5 – Умка,
 pop 6 – Даурия, pop 7 – Золушка, pop 8 – Лазурная,
 pop 9 – Топаз, pop10 – КБл-24, pop 11 – КБл-29,
 pop 12 – КБел72, pop 13 – КА-342, pop 14 – КА-1413
 (фигурными скобками обозначены два выявленных
 кластера генотипов (I и II); цифрами 1...13 – подкластеры).

что «генетические формулы генотипов» у них различны. Отличия для этих сортов выявлены по четырем локусам (Satt1, Satt5, Satt9, Soyprp1).

Выводы. Наиболее контрастные морфологические различия выявлены для сортов Топаз и Даурия, как по фенотипу (окраске и интенсивности опушения, цвету, форме семян и рубчика), так и по всем хозяйственно ценным признакам (периоду вегетации – 95 и 112 суток; урожайность – 26,8 и 30,9 ц/га; высота растений – 64 и 81 см; высоте прикрепления нижнего боба – 13 и 16 см; масса 1000 семян – 174,7 и 185,4 г; содержание белка – 40,3 и 38,2 %; содержание масла – 19,2 и 19,8 % соответственно). Выявлено 24 аллеля по 6 микросателлитным локусам. Значительное сходство по исследуемым локусам установлено среди форм дикой сои, которые на дендрограмме выделены в отдельный кластер. Сорта культурной сои имели отличия между собой от 1 до 4 локусов.

Таким образом, для всех исследованных сортов культурной и большинства форм дикой сои выявлены уникальные наборы аллелей, различия наблюдали по одному и более локусам. Для каждого генотипа на основании полученного набора аллелей микросателлитных локусов составлены молекулярно-генетические формулы. Дискриминационный потенциал изученной маркерной системы достаточно высок для того, чтобы использовать ее в дальнейших исследованиях для идентификации и паспортизации сортов культурной и форм дикой сои.

Литература.

1. Фокина Е. М., Беляева Г. Н., Разанцев Д. Р. Использование зародышевой плазмы нетипичных форм сои в селекции // *Достижение науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 8. С. 39–44. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10801.
2. Каталог сортов сои / Е. М. Фокина, Г. Н. Беляева, М. О. Синеговский и др. / под общей ред. В. Т. Синеговской Благовещенск: ООО ИПК ОДЕОН, 2021. 69 с.
3. Минькач Т. В., Селихова О. А. Селекционно-генетический анализ межвидовых гибридов сои первого поколения // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2019. № 8(178). С. 48–54.

4. Глазко В. И., Косовский Г. Ю., Глазко Т. Т. Геномные источники разнообразия как драйверы доместикации (обзор) // *Сельскохозяйственная биология*. 2022. Т. 57. № 5. С. 832–851. doi: 10.15389/agrobiol.2022.5.832rus.
5. Ала А. Я., Тильба В. А. Генетические методы селекции *G. max* [L.] Merr. x *G. soja*. Благовещенск: ПКИ «Зоя», 2005. 128 с.
6. Korean Wild Soybeans (*Glycine soja* Sieb & Zucc.): Geographic Distribution and Germplasm Conservation / M. A. Nawaz, X. Lin, T. Chan, et al. // *Agronomy*. 2020. Vol. 10. No. 2. Article 214. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/2/214> (дата обращения: 01.02.2022). doi: 10.3390/agronomy10020214.
7. Применение ДНК-маркеров для оценки исходного селекционного материала картофеля / Е. П. Шанина, Л. Б. Сергеева, М. А. Стафеева и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2018. Т. 32. № 12. С. 47–49. doi: 10.24411/0235-2451-2018-11213.
8. Лагуновская Е. В. Идентификация микросателлитных локусов, ассоциированных с эмбрионным потенциалом у генотипов пшеницы в культуре пыльников *in vitro* // *Молекулярная и прикладная генетика*. 2021. Т. 31. С. 102–113. doi: 10.47612/1999-9127-2021-31-102-113.
9. SSR-анализ геномной ДНК перспективных сортов мягкой озимой пшеницы узбекистанской селекции / А. Т. Адылова, Ж. К. Норбеков, Э. Э. Хуриут и др. // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018. Т. 22. № 6. С. 634–639. doi:10.18699/VJ18.404.
10. Рамазанова С. А., Коломыцева А. С. Оптимизация технологии генотипирования сои на основе анализа полиморфизма SSR-локусов ДНК // *Масличные культуры*. 2020. Вып. 1 (181). С. 42–48. doi: 10.25230/2412-608X-2020-1-181-42-48.
11. Изучение генетического полиморфизма российских сортов рапса и сурепицы с использованием SSR- и SRAP-маркеров / И. А. Клименко, В. Т. Воловик, А. А. Антонов и др. // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2022. Т. 26 (4). С. 349–358. doi: 10.18699/VJGB-22-42.
12. Изучение генетического разнообразия мировой коллекции сои с использованием микросателлитных маркеров, связанных с устойчивостью к грибным болезням / А. К. Затыбеков, Е. К. Турусбеков, Б. Н. Досжанова и др. // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020. Т. 181(3). С. 81–90. doi: 10.30901/2227-8834-2020-3-81-90.
13. Молекулярно-генетические механизмы, лежащие в основе продвижения ареала возделывания сои к северу / Я. В. Федорина, Е. К. Хлесткина, И. В. Сеферова и др. // *Экологическая генетика*. 2022. Т. 20. № 1. С. 13–30. doi: 10.17816/ecogen83879.
14. Genetic diversity and population structure of Indian soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) as revealed by microsatellite markers / S. Tiwari, N. Tripathi, K. Tsuji, et al. // *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2019. Vol. 25. No. 4. P. 953–964. doi: 10.1007/s12298-019-00682-4.
15. Ала А. Я. Способ получения межвидовых гибридов сои. 1987. Авторское свидетельство РФ № 1307626.
16. Влияние погодноклиматических условий на содержание белка и масла в семенах сои на Северном Кавказе / Л. Ю. Новикова, И. В. Сеферова, А. Ю. Некрасов и др. // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018. 22 (6). С. 708–715. doi 10.18699/VJ18.414.

Поступила в редакцию 06.03.2023
 После доработки 21.04.2023
 Принята к публикации 11.05.2023

ИСХОДНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОРТОВ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ В ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЕ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

Л. А. Косых, кандидат сельскохозяйственных наук

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Поволжский научно-исследовательский институт селекции и семеноводства имени П.Н. Константинова,
446442, Самарская обл., г. Кинель, пгт. Усть-Кинельский, ул. Шоссейная, 76

Исследования осуществляли с целью комплексной оценки коллекционного материала ярового ячменя для создания новых высокоурожайных сортов, устойчивых к стрессовым факторам среды. Опыты проводили в 2019–2021 гг. в Самарской области. Почва опытного участка – чернозем типичный малогумусный, среднесиловый, легкоглинистый, слабнокислый. Предшественник – яровая пшеница. Объектами исследований служили 117 сортообразцов ярового ячменя из мировой коллекции ВИР различного эколого-географического происхождения. В качестве стандарта выбран районированный сорт Поволжский 65. Метеорологические условия в годы проведения исследований отличались нестабильностью в период вегетации, что позволило объективно оценить сортообразцы по изучаемым признакам. В результате изучения выделены источники высокой продуктивности зерна (+19,3...38,7% к стандарту) и низкорослости (на 14,0...27,0 см ниже стандарта) – Калькюль (Германия), Бадьорий (Украина), Формат (Ростовская обл.), Юла (Ростовская обл.), Леон (Ростовская обл.), Тирпл (Англия), Красноярский 6 (Белгородская обл.), Эксплоер (Франция), Велес (Белгородская обл.), Чилл (Германия), Федос (Ростовская обл.). По крупнозерности лучшими были Нудум 95 (Челябинская обл.), Сталкер (Украина), Ратник (Ростовская обл.), Хаго (Беларусь), Миар (Оренбургская обл.), которые по массе 1000 зерен превзошли стандарт на 16,8...21,1%. По продуктивной кустистости выделены сорта Зеус (Белгородская обл.), Илек 36 (Казахстан), Донецкий 12 (Украина), Эвегрин (Дания), Велес (Белгородская обл.), Прерия (Украина), Федос (Ростовская обл.), превысившие стандарт на 25,0...40,0%. По скороспелости выделены сорта Гандвиг (Архангельская обл.), Белогорский (Ленинградская обл.), Беган (Новосибирская обл.), Криничный (Беларусь), Медикум 11 (Казахстан), Вадим (Краснодарский край), Велес (Белгородская обл.), созревшие раньше стандарта на 2...5 суток. Выделенные образцы ярового ячменя могут быть использованы в качестве генетических источников для проведения скрещиваний и создания ценного селекционного материала.

SOURCE MATERIAL FOR CREATING SPRING BARLEY VARIETIES IN THE FOREST-STEPPE ZONE OF THE MIDDLE VOLGA REGION

L. A. Kosykh

Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Povolzhsky Research Institute of Breeding and Seed Production named after P.N. Konstantinova,
446442, Samarskaya obl., g. Kinel', pgt. Ust'-Kinel'skii, ul. Shosseynaya, 76

The research aimed to comprehensively assess the spring barley collection material to create new high-yielding varieties resistant to environmental stress factors. The experiments were carried out in 2019–2021 in the Samara region. The soil of the experimental plot was a typical low-humus chernozem, medium-thick, light clayey, slightly acidic. The forecrop was spring wheat. The objects of research were 117 varieties of spring barley from the world collection of N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources of various ecological and geographical origin. The zoned variety Povolzhsky 65 was chosen as a standard. The meteorological conditions during the years of the research were unstable during the growing season, which made it possible to objectively evaluate the variety samples according to the studied characteristics. As a result of the study of collection varieties of spring barley, sources of high grain productivity (+19.3–38.7% to the standard) and short stature (14.0–27.0 cm below the standard) were identified – Kalkul (Germany), Badyoriy (Ukraine), Format (Rostov region), Yula (Rostov region), Leon (Rostov region), Tipple (England), Krasnoyarskiy 6 (Belgorod region), Exploer (France), Veles (Belgorod region), Chill (Germany), Fedos (Rostov region). In terms of large grains, the best were Nudum 95 (Chelyabinsk region), Stalker (Ukraine), Ratnik (Rostov region), Hago (Belarus), Miar (Orenburg region), which exceeded the standard by 16.8–21.1%. Zeus varieties (Belgorod region), Ilek 36 (Kazakhstan), Donetskii 12 (Ukraine), Evygrin (Denmark), Veles (Belgorod region), Prairie (Ukraine), Fedos (Rostov region), which exceeded the standard by 25.0–40.0%, were distinguished by productive tillering. In terms of precocity, the varieties Gandvig (Arkhangelsk region), Belogorskiy (Leningrad region), Bagan (Novosibirsk region), Krinichny (Belarus), Medicum 11 (Kazakhstan), Vadim (Krasnodar region), Veles (Belgorod region), ripened earlier than the standard for 2–5 days. The distinguished samples of spring barley can be used as genetic sources for crossings and creating valuable breeding material.

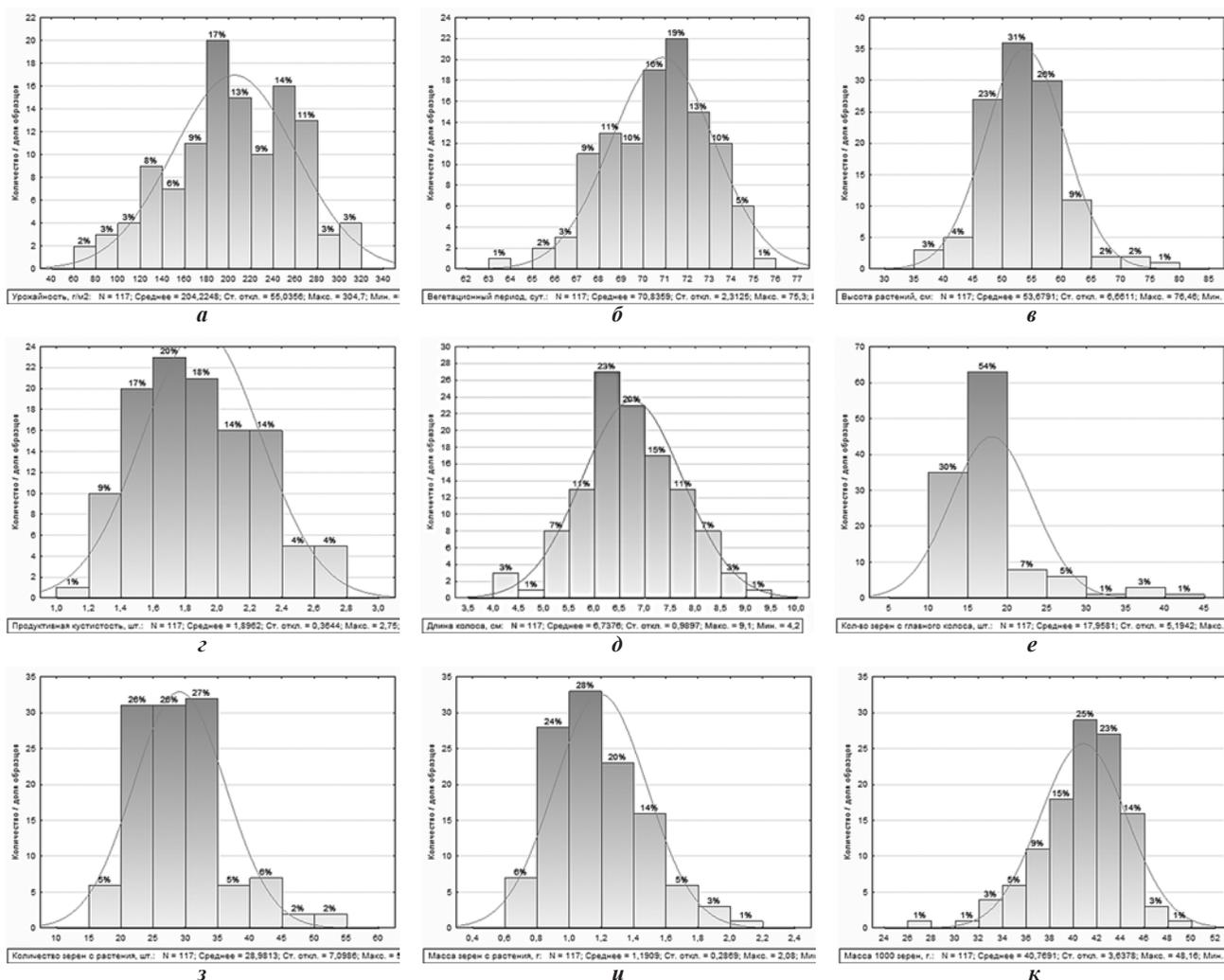
Ключевые слова: ячмень яровой (*Hordeum vulgare* L.), коллекция, продуктивность, оценка, крупнозерность, сортообразцы, устойчивость, структура.

Key words: spring barley (*Hordeum vulgare* L.), collection, productivity, evaluation, large grain, variety samples, stability, structure.

Среди зерновых культур по посевным площадям и валовым сборам зерна ячмень занимает четвертое место в мире после пшеницы, риса и кукурузы. По данным Федеральной службы государственной статистики, в 2022 г. в Российской Федерации посевы этой культуры занимали 7364,7 тыс. га, что меньше, чем в 2021 г., на 0,3%. В Самарской области посевами ячменя было занято 290,4 тыс. га, что составляет 3,9% от общей площади по РФ (URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy).

Современная селекция ярового ячменя направлена на создание нового исходного материала – пластичных, высокоурожайных, скороспелых, хорошо противостоящих засушливым условиям вегетации без снижения продуктивности, устойчивых к вредителям и болезням форм, с последующим выведением сортов с групповой комплексной устойчивостью к стрессовым факторам [1, 2, 3].

Вовлечение в селекционный процесс коллекционных образцов позволяет создать гибридный материал, обладающий большим спектром различных качественных



Распределение образцов коллекции ярового ячменя по ценным селекционным признакам (среднее за 2019–2021 гг.):

- а) урожайности; б) продолжительности вегетационного периода; в) высоте растений; г) продуктивной кустистости растений; д) длине колоса; е) количеству зерен с главного колоса; ж) массе зерна с главного колоса; з) количеству зёрен с растения; и) массе зерна с растения; к) массе 1000 зёрен.*

показателей для отбора среди них наиболее ценных форм [4, 5, 6].

Цель исследований – комплексная оценка коллекционного материала ярового ячменя для создания и выведения новых высокоурожайных сортов, устойчивых к стрессовым факторам среды.

Методика. Работу проводили в 2019–2021 гг. в селекционном севообороте Поволжского научно-исследовательского института селекции и семеноводства имени П. Н. Константинова – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук (Поволжский НИИСС-филиал СамНЦ РАН), расположенном в лесостепной полосе левобережья Средней Волги в Самарской области. Почва опытного участка – чернозем типичный малогумусный (5...6 %, по Тюрину, ГОСТ 2613-91), среднемощный, легкоглинистый. Содержание подвижного фосфора в почве составляет 61,4...77,0 мг/кг (ГОСТ 26204-91), обменного калия – 374,0...423,0 мг/кг (ГОСТ 26210-91), легкогидролизуемого азота – 28,5...49,4 мг/кг (ГОСТ 26951-86), реакция почвенного раствора слабос кислая (рН – 5,4 ед., ГОСТ 26483-85).

Объектами исследований служили 117 сортообразцов ярового ячменя из мировой коллекции Всерос-

сийского института генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова (ВИР) различного эколого-географического происхождения (Россия, Украина, Германия, США, Франция и др.). За стандарт был принят сорт селекции Поволжского НИИСС – филиала СамНЦ РАН Поволжский 65.

Предшественник – яровая пшеница. Посев коллекционных образцов проводили в первой декаде мая селекционной сеялкой ССФК-7 М с центральным высевочным аппаратом с нормой посева для двухрядного ячменя 4,5 млн всхожих семян на 1 га, для шестирядного – 3,5 млн шт./га; с шириной междурядий 15 см. Делянки – шести рядковые, площадь делянки – 1,5 м². Учетная площадь делянки 1,2 м². Уборку осуществляли в фазе полной спелости зерна с последующим обмоломом снопов на молотилке МПСУ-500 и взвешиванием зерна на лабораторных весах. Часть растений в поле отбирали для проведения структурного анализа урожая.

Изучение коллекции ярового ячменя проводили в соответствии с методическими указаниями ВИР [7]. В течение вегетации выполняли фенологические наблюдения, биометрические измерения и учеты в соответствии с методикой государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур [8]. Статистическую обработку результатов выполняли методами дисперси-

онного и корреляционного анализов с использованием программ Microsoft Excel и Statistica 10.0 [9].

Метеорологические условия в годы проведения исследований отличались нестабильностью в период вегетации, что позволило объективно оценить сортообразцы из мировой коллекции ВИР по изучаемым признакам.

Период вегетации 2019 г. характеризовался как засушливый с ГТК май – август 0,48 (июнь – острозасушливый с ГТК 0,17). Вегетационный период 2020 г. отличался неустойчивым температурным режимом и дефицитом осадков, ГТК за период вегетации ярового ячменя составил 0,52. Вегетационный период 2021 г. характеризовался крайне жестким температурным режимом, большой сухостью воздуха и почвы в течение всего периода вегетации растений и острым дефицитом осадков, ГТК за период вегетации ярового ячменя составил 0,40 (июль – острозасушливый с ГТК 0,25).

Результаты и обсуждение. Продуктивность – сложный биологический показатель, зависящий от многих компонентов, его составляющих. Поэтому в селекции при подборе родительских пар необходимо иметь хорошо изученный исходный материал по каждому компоненту продуктивности [10]. При скрининге сортообразцов мировой коллекции ВИР ярового ячменя оценивали основные признаки – урожайность, элементы структуры урожая, крупнозёрность, устойчивость к полеганию, скороспелость и короткостебельность. В среднем за 2019–2021 гг. урожайность варьировала от 72,7 г/м² Оскар (Красноярский край) до 304,7 г/м² Калькюль (Германия), при средней величине по коллекции 204,2 г/м². Урожайность стандартного сорта Поволжский 65 составила в среднем 219,7 г/м². Коэффициент вариации по выборке в среднем по годам составил 26,9 %. К образцам с низкой урожайностью (70...180 г/м²) относится 30 % (35 шт.) сортообразцов всей коллекции ярового ячменя, со средней урожайностью (181...220 г/м²) – 30 % (35 шт.) и с высокой урожайностью (221...310 г/м²) – 40 % (47 шт.) (см. рисунок).

В среднем за 2019–2021 гг. 46 образцов превысили стандарт по урожайности на 1,5...38,7 %. Из изучаемых коллекционных сортообразцов были выделены сорта с уровнем продуктивности в пределах 262,0...304,7 г/м², которые превосходили стандарт на 19,3...38,7 % (см. табл.).

Один из важных признаков, влияющий на урожайность, – продуктивная кустистость (число продуктивных стеблей на одном растении), который наиболее

сильно зависит от метеорологических условий года. Продуктивная кустистость в среднем по сортам составила 1,89 шт., минимальный показатель отмечен у сорта Белогорский (Ленинградская обл.) – 1,2, а максимальный – 2,8 шт. у сорта Илек 36 (Казахстан). У стандарта величина этого показателя достигала 2,0 шт. Коэффициент вариации по выборке в среднем по годам был равен 19,2 %. Группа с продуктивной кустистостью растений 1,2...1,6 шт. составила 27 % (32 шт.) всего количества образцов коллекции ВИР, группа с продуктивной кустистостью 1,7...2,1 шт. – 53 % (62 шт.) и группа с продуктивной кустистостью 2,2...2,8 шт. – 20 % (23 шт.) (см. рисунок).

По этому показателю выделены 41 сортообразец ярового ячменя, превысившие стандарт на 2,5...40,0 %. Проанализировав полученные данные были выделены сорта с продуктивной кустистостью в пределах 2,5...2,8 шт., и превысившие стандарт на 25,0...40,0 %: Зевс (Белгородская обл.), Илек 36 (Казахстан), Донецкий 12 (Украина), Эвегрин (Дания), Велес (Белгородская обл.), Прерия (Украина), Федос (Ростовская обл.).

Известно, что на продуктивность сорта влияет длина колоса, которая не сильно меняется по годам. В неблагоприятные годы она уменьшается [11]. Длина колоса изучаемых сортообразцов варьировала от 4,2 см (сорта Dobra, Испания и Tercel, Канада) до 9,1 см (сорт Великан, Казахстан). В среднем по сортам величина этого показателя составляла 6,7 см, у стандарта Поволжский 65 – 7,9 см. Коэффициент вариации по выборке в среднем по годам составил 14,7 %. Группа образцов ярового ячменя с длиной колоса 4...6 см составила 22 % (26 шт.) всего количества образцов коллекции ВИР, длина колоса 6...8 см – 67 % (78 шт.) и образцы с длиной колоса больше 8 см составили 11 % (13 шт.) (см. рисунок).

Сорта Bear (США), CDC Gainer (Канада), Оскар (Красноярский край), Криничный (Беларусь), Таусень (Архангельская обл.), Бадьорий (Украина), Леон (Ростовская обл.), Clearwarter (США), Нудум 95 (Челябинская обл.), Великан (Казахстан), Омский 90 (Омская обл.), Велес (Белгородская обл.), Юла (Ростовская обл.) достоверно превысили сорт-стандарт по длине колоса на 1,3...15,2 %.

Продуктивность колоса – комплексный признак, определяемый числом зёрен и их крупностью. Озерённость колоса зависит от типа колоса и генотипа растения. Число зёрен с главного колоса варьировало

Характеристика выделенных сортообразцов ярового ячменя по хозяйственно ценным признакам (среднее за 2019–2021 гг.)

Сортообразец	Урожайность, г/м ²	Продолжительность вегетационного периода, сут.	Высота растений, см	Масса 1000 зёрен, г
Поволжский 65 St	219,7	69	71	39,81
Калькюль, Германия	304,7	73	52	39,31
Бадьорий, Украина	303,4	70	57	40,13
Формат, Ростовская обл.	302,6	68	48	43,86
Юла, Ростовская обл.	297,7	70	55	41,71
Леон, Ростовская обл.	294,9	71	57	41,42
Turple, Англия	290,9	73	49	44,93
Красноярский 6, Белгородская обл.	278,1	72	44	42,67
Ехрлоер, Франция	277,4	73	47	43,55
Велес, Белгородская обл.	270,0	66	54	41,21
Чилл, Германия	266,1	71	51	40,49
Федос, Ростовская обл.	262,0	69	50	43,22
НСР ₀₅	43,1	11	9	4,60
Среднее	204,8	71	54	40,80
Коэффициент вариации, %	26,6	3	12,4	9,02

от 11,2 шт. (Биос 1, Московская обл.) до 40,7 шт. (Новик, Ростовская обл.). В среднем по сортам оно составило 17,9 шт., у стандарта Поволжский 65 – 18,4 шт. Коэффициент вариации по выборке в среднем по годам составил 28,9 %. У большинства сортообразцов 84 % (98 шт.) количество зёрен с главного колоса составило 11...20 шт., больше 20 зёрен с колоса отмечено у 16 % (19 шт.) (см. рисунок).

По этому показателю было выделено 27 образцов ярового ячменя, которые на 2,2...121,2 % превысили стандарт Поволжский 65. Сорта ярового ячменя Новик (Ростовская обл.), Липень, Талер (Беларусь), ND-B 112 (США), WGA 148-3 (Эфиопия), Краснояружский 6 (Белгородская обл.), Белогорский (Ленинградская обл.), Thual (США) по количеству зёрен с главного колоса превысили стандарт на 57,6...121,2 % и оказались самыми лучшими (29,0...40,7 шт.).

Масса зерна с главного колоса варьировала от 0,5 г (Биос 1, Московская обл.; Выбор, Московская обл.; Челябинский 99, Челябинская обл.; Чаривный, Украина) до 1,5 г (Новик, Ростовская обл.). В среднем по сортам величина этого показателя составила 0,8 г, что на уровне стандарта Поволжский 65. Коэффициент вариации по выборке в среднем по годам составил 22,6 %. У наибольшего количества образцов ярового ячменя 62 % (72 шт.) масса зерна с главного колоса составила 0,6...0,8 г, масса зерна с главного колоса 0,5...0,6 г отмечена у 21 % (24 шт.) образцов, больше 0,8 г – 17 % (21 шт.) (см. рисунок).

По массе зерна с главного колоса выделились сорта Новик (Ростовская обл.), Липень (Беларусь), WGA 148-3 (Эфиопия), Краснояружский 6 (Белгородская обл.), Белогорский (Ленинградская обл.), Tamalrais (США), Rubiola (Латвия), Turple (Англия), Водар (Беларусь), Крузер (Германия), Чираз (Дания), Бадьорий (Украина), Одон (Бурятия), Буян (Красноярский край), Омский 90 (Омская обл.), Велес (Белгородская обл.), которые превысили стандарт на 12,5...87,5 %.

На урожайность сорта также влияют такие показатели, как количество зёрен с растения и продуктивность одного растения. Количество зёрен с растения в среднем по сортам составило 29,0 шт., минимальный показатель отмечен у сорта Гармония (Украина) – 17,8 шт., а максимальный – 54,9 шт. у сорта Новик (Ростовская обл.). У стандарта этот показатель достигал 32,1 шт. Коэффициент вариации по выборке в среднем по годам составил 24,5 %.

Наименьшее количество зёрен с растения (меньше 20 шт.) отмечено у 6 % (7 шт.) сортообразцов ярового ячменя, наибольшую группу 79 % (92 шт.) составляют образцы с числом зёрен с растения 21...35 шт., 15 % (17 шт.) генотипов составляют группу с числом зёрен с растения больше 36 шт. (см. рисунок).

Масса зерна с растения в среднем по сортам составила 1,2 г, минимальный показатель отмечен у сорта Челябинский 99 (Челябинская обл.) – 0,7 г, а максимальный – 2,1 г у сорта Новик (Ростовская обл.). У стандарта продуктивность одного растения равнялась 1,3 г. Коэффициент вариации по выборке в среднем по годам составил 24,1 %.

По показателю масса зерна с растения группа образцов с массой 0,6...0,8 г составила 5 % (6 шт.), 0,9...1,4 г – 72 % (84 шт.), 1,5...2,1 г – 23 % (27 шт.) (см. рисунок).

Выделены сортообразцы Новик (Ростовская обл.), Липень, Талер (Беларусь), WGA 148-3 (Эфиопия), Зевс (Белгородская обл.), Краснояружский 6 (Белгородская обл.), Tamalrais (США), Велес (Белгородская обл.), Белогорский (Ленинградская обл.), CDC Gainer (Канада), Донецкий 12 (Украина), Turple (Англия), Спомин (Украина), Эвергрин (Украина), Бадьорий (Украина) превысившие

стандарт по количеству зерен с растения на 2,3...71,3 %, по массе зерна с растения – на 6,2...62,5 %.

Наиболее сильная положительная связь отмечена между показателем количества зерен с растения и массой зерна с растения ($r=0,852\pm 0,05$), количеством зерен с главного колоса ($r=0,735\pm 0,06$), массой зерна с главного колоса ($r=0,741\pm 0,06$).

Проведенный анализ позволил более целенаправленно проводить отбор в селекционном процессе. Включение в качестве родительской формы сортов с большей выраженностью указанных выше признаков будет способствовать повышению урожайности создаваемых сортов.

Крупность зерна – один из важных элементов структуры урожая. Значительное влияние на массу 1000 зерен оказывают погодные условия, режим влагообеспеченности и минерального питания растений в период формирования и налива зерна. Стабильность массы 1000 зёрен позволяет судить об устойчивости растений к экстремальным условиям [11, 12]. В наших исследованиях масса 1000 зёрен в среднем по сортам составила 40,8 г, минимальный показатель отмечен у сорта Thual (США) – 27,3 г, а максимальный – 48,2 г у сорта Хаго (Беларусь). У стандарта масса 1000 зерен была 39,8 г. Коэффициент вариации по выборке в среднем по годам составил 9,02 %.

По массе 1000 зёрен коллекционные сортообразцы распределились следующим образом: наибольшую группу 62 % (73 шт.) составили образцы с величиной этого показателя 41...45 г, 34 % (39 шт.) сортообразцов относятся к группе до 40 г и 4 % (5 шт.) образцов сформировали крупносемянную группу более 46 г (см. рисунок).

По этому признаку выделилось 76 образцов, достоверное превышение над стандартом 1,2...21,1 %. Наибольшей крупностью и выполненностью зерна отличались сорта: Нудум 95 (Челябинская обл.) (46,5 г), Сталкер (Украина) (47,0 г), Ратник (Ростовская обл.) (46,6 г), Хаго (Беларусь) (48,2 г), Миар (Оренбургская обл.) (47,6 г), превысившие стандарт на 16,8...21,1 %.

Продолжительность вегетационного периода сорта – важный биологический признак, имеющий большое практическое значение. Подбор сортов с определенным периодом вегетации диктуют особенности природных условий региона или хозяйства. Академики П. Н. Константинов и В. В. Глуховцев отмечали, что в условиях лесостепной зоны Среднего Поволжья среднеспелые формы ярового ячменя, по сравнению со скороспелыми, имеют преимущество по урожайности [13]. Продолжительность вегетационного периода в среднем по сортам составила 70,8 суток, наименьшей она была у сорта Вадим (Краснодарский край) – 64 суток, а самой продолжительной – 75 суток, у сортов Сибиряк (Кемеровская обл.); Чарльз (Дания) и Фокус (Франция). У сорта-стандарта продолжительность вегетационного периода в среднем за годы изучения составила 69 суток. Коэффициент вариации по выборке в среднем по годам составил 3,29 %. По продолжительности вегетационного периода коллекционные сортообразцы распределились следующим образом: к раннеспелой группе (64...67 суток) отнесено 6 % (7 шт.) образцов всей изучаемой коллекции ярового ячменя, среднеспелой группе (68...72 суток) – 65 % (76 шт.) и позднеспелой (73...76 суток) – 29 % (34 шт.) (см. рисунок).

Раньше стандарта на 2...5 суток созрели образцы Гандвиг (Архангельская обл.), Белогорский (Ленинградская обл.), Баган (Новосибирская обл.), Криничный (Беларусь), Медикум 11 (Казахстан), Вадим (Краснодарский край), Велес (Белгородская обл.).

Одним из лимитирующих факторов повышения урожайности в условиях длинного светового дня и повышенного увлажнения – полегание растений. Оно затрудняет уборку, приводит к ухудшению качества зерна и потере 20...30 % урожая. У зерновых культур устойчивость к полеганию коррелирует с высотой и прочностью соломы. Известно, что короткостебельные растения (61...80 см) более устойчивы к полеганию [14]. В наших исследованиях на посевах коллекционных образцов ярового ячменя полегания не наблюдали.

Высота растений в среднем по сортам составила 53,6 см, самыми низкими были растения сорта Terce (Канада) – 39 см, высокими сорта Великан (Казахстан) – 77 см. У стандарта сорт Поволжский 65 высота растений в среднем за годы изучения составила 71 см. Коэффициент вариации по выборке в среднем по годам составил 12,4 %. Наибольшая часть коллекции ВИР ярового ячменя представлена среднерослыми образцами (высота растений 50...80 см) – 70 % (82 шт.), процент низкорослых образцов (меньше 50 см) составил 30 % (35 шт.), высокорослых образцов (больше 80 см) – нет (см. рисунок).

По высоте растений выделились следующие сортообразцы: Калькюль (Германия), Бадьорий (Украина), Формат (Ростовская обл.), Юла (Ростовская обл.), Леон (Ростовская обл.), Turple (Англия), Краснояружский 6 (Белгородская обл.), Ехрлоер (Франция), Велес (Белгородская обл.), Чилл (Германия), Федос (Ростовская обл.). Эти сортообразцы были на 14,0...27,0 см ниже стандарта Поволжский 65.

Выводы. В результате изучения коллекционных сортообразцов ярового ячменя выделены источники ценных признаков:

высокой продуктивности зерна (262,0...304,7 г/м²) – Калькюль (Германия), Бадьорий (Украина), Формат (Ростовская обл.), Юла (Ростовская обл.), Леон (Ростовская обл.), Turple (Англия), Краснояружский 6 (Белгородская обл.), Ехрлоер (Франция), Велес (Белгородская обл.), Чилл (Германия), Федос (Ростовская обл.), превосшедшие стандарт на 19,3...38,7 %;

крупнозёрности (46,5...48,2 г) – Нудум 95 (Челябинская обл.), Сталкер (Украина), Ратник (Ростовская обл.), Хаго (Беларусь), Миар (Оренбургская обл.), превысившие стандарт на 16,8...21,1 %;

продуктивной кустистости (2,5...2,8 шт.) – Зевс (Белгородская обл.), Илек 36 (Казахстан), Донецкий 12 (Украина), Эвегрин (Дания), Велес (Белгородская обл.), Прерия (Украина), Федос (Ростовская обл.), у которых величина этого показателя была больше, чем у стандарта на 25,0...40,0 %;

скороспелости (продолжительность периода вегетации 64...67 суток) – Гандвиг (Архангельская обл.), Белогорский (Ленинградская обл.), Баган (Новосибирская обл.), Криничный (Беларусь), Медикум 11 (Казахстан), Вадим (Краснодарский край), Велес (Белгородская обл.), с продолжительностью созревания раньше стандарта на 2...5 суток;

по высоте растений (44...57 см) – Калькюль (Германия), Бадьорий (Украина), Формат (Ростовская обл.), Юла (Ростовская обл.), Леон (Ростовская обл.), Turple (Англия), Краснояружский 6 (Белгородская обл.), Ехрлоер (Франция), Велес (Белгородская обл.), Чилл (Германия), Федос (Ростовская обл.), ниже стандарта на 14,0...27,0 см.

Выделившиеся образцы ярового ячменя могут быть использованы в качестве генетических источников для проведения скрещиваний и получения ценного селекционного материала.

Литература.

1. Косых Л. А., Столпивская Е. В., Никонорова Ю. Ю. Поволжский янтарь – новый сорт ярового ячменя для Средневолжского региона // *Земледелие*. 2021. № 8. С. 32–36. doi: 10.24412/0044-3913-2021-8-32-36.
2. Максимов Р. А., Киселев Ю. А., Шадрин Е. А. Адаптивная реакция коллекционных сортообразцов ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) в условиях Среднего Урала // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 4. С. 35–40. doi: 10.53859/02352451_2022_36_4_35.
3. Высокопродуктивный, зернофуражный сорт «Эндан» / В.И. Блохин, И.С. Ганиева, И.М. Сержанов и др. // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14. № 3 (54). С. 19–24.
4. Герасимов С.А. Селекционно-ценные образцы ячменя коллекции ВИР по параметрам адаптивности, продуктивности и качества зерна // *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2020. № 4 (57). С. 16–24.
5. Оценка коллекционных образцов ярового ячменя в селекцию на продуктивность и качество зерна в условиях Восточной Сибири / Н. А. Сурин, Н. Е. Ляхова, С. А. Герасимов и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2018. Т. 32. № 5. С. 41–44. doi: 10.24411/0235-2451-2018-10510.
6. Скрининг сортов ярового ячменя, различных по эколого-географическому происхождению / Е. Г. Филиппов, А. А. Донцов, Д. П. Донцов и др. // *Зерновое хозяйство России*. 2017. № 5. С. 43–51.
7. Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса / под редакцией д-ра биол. наук И. Г. Лоскутова. СПб.: ВИР, 2012. 29 с.
8. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур / под общ. ред. М. А. Федина. М.: Министерство сельского хозяйства СССР, 1985. 267 с.
9. Усманов Р. Р. Статистическая обработка данных агрономических исследований в программе «Statistica». М.: РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2020. 177 с.
10. Подгорный С. В., Самофанов А. П., Скрипка О. В. Селекционная оценка элементов продуктивности озимой пшеницы в условиях юга Ростовской области // *Аграрный вестник Урала*. 2017. № 9(163). С. 35–39.
11. Радюкевич Т. Н., Бондарева Л. М., Карташева Л. И. Оценка новых коллекционных образцов ячменя по хозяйственно-ценным признакам в условиях Северо-Запада России // *Пермский аграрный вестник*. 2018. № 4(24). С. 76–82.
12. Батанова О. Б., Корелина В. А. Влияние элементов структуры урожая на продуктивность ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) в условиях Крайнего Севера РФ // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2017. № 178 (3). С. 50–58. doi: 10.30901/2227-8834-2017-3-50-58.
13. Глуховцев В. В. Селекция ярового ячменя в Среднем Поволжье. Самара: ЗАО Типография «Сокол-Т», 2005. 232 с.
14. Левакова О. В. Изучение и подбор ярового ячменя по признакам устойчивости к полеганию и урожайности // *Вестник Российской сельскохозяйственной науки*. 2018. № 3. С. 39–41. doi: 10.30850/vrsn/2018/3/39-41.

Поступила в редакцию 11.03.2023
После доработки 07.04.2023
Принята к публикации 25.04.2023

СОРТОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРИЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ГОРЧИЦЫ БЕЛОЙ*

Т.Я. Прахова¹, доктор сельскохозяйственных наук,
Н.Р. Таишев², аспирант

¹Федеральный научный центр лубяных культур,
442731, Пензенская обл., пос. Лунино,
E-mail: prakhova.tanya@yandex.ru

²Пензенский государственный аграрный университет,
440014, Пенза, ул. Ботаническая, 30
E-mail: nurmarat9@mail.ru

Исследования проводили с целью изучения влияния предпосевной и некорневой обработки микроудобрениями на продуктивность горчицы белой и сравнительной оценки сортов в лесостепи Среднего Поволжья. Работу выполняли в 2020–2022 гг. в Пензенской области. В первом опыте изучали 9 сортов горчицы белой различной селекции, во втором и третьем – эффективность обработки семян и растений микроудобрениями с нормой 1,0 л/т и 1,0 л/га соответственно. Схема опыта включала препараты Гумат +7, Агроверм, Изагри Вита, Мегамикс, Циркон, Цитовит, БлекДжек, Изагри Форс и вариант без обработки. Продуктивность сортов горчицы составляла 1,32...1,61 т/га. Наибольшая в опыте урожайность отмечена у сортов Люция (1,57 т/га) и Светлана (1,61 т/га), максимальное в опыте содержание масла – в семенах сортов Люция и Омега (30,02 и 30,48 % соответственно), минимальное – Пассион и Бракко (25,05 и 26,24 %). Показатель агрономической стабильности, характеризующий их ценность для производства, у всех сортов находился на уровне 78,33...85,82 %. При обработке растений горчицы наиболее эффективными были удобрения Изагри Вита и Агроверм, которые способствовали формированию наибольшего урожая 1,69 и 1,67 т/га. Максимальное в опыте содержание масла (29,72 и 29,70 %) в семенах отмечено при обработке растений препаратами БлекДжек и Изагри Форс. Предпосевная обработка семян микроэлементными удобрениями обеспечивала накопление масла в семенах на уровне 27,75...29,46 %, при 27,87 % в контроле. Наибольшая в опыте урожайность отмечена в вариантах с обработкой семян препаратами Изагри Вита и БлекДжек (1,71 и 1,72 т/га), в которых она на 0,17...0,18 т/га превышала контроль. Некорневая подкормка Цитовитом увеличивала концентрацию эруковой кислоты до 30,1 %, а обработка семян этим препаратом снижала ее до 25,3 %.

VARIETY FEATURES AND METHODS OF INCREASING THE PRODUCTIVITY OF WHITE MUSTARD

T.Ya. Prakhova¹, N.R. Taishev²

¹Federal Scientific Center of Bast-Fiber Crops Breeding,
442731, Penzenskaya obl., pos. Lunino
E-mail: prakhova.tanya@yandex.ru

²Penza State Agrarian University,
440014, Penza, ul. Botanicheskaya, 30
E-mail: nurmarat_9@mail.ru

The aim of the research was to study the effect of pre-sowing and foliar treatment with microelement micronutrient fertilizers on the productivity of white mustard and a comparative assessment of its varieties in the conditions of the forest-steppe of the Middle Volga region. Experimental work was carried out in 2020–2022 on the experimental field of the Penza Research Institute of Agriculture. In the first experiment, 9 varieties of white mustard of various selection, included in the State Register of Breeding Achievements, were studied. The scheme of field experiments included the study of pre-sowing seed treatment and the treatment of mustard plants during vegetation with microfertilizers at a rate of 1.0 l/t and 1.0 l/ha, respectively. The experimental scheme included 8 microelement preparations (Humate +7, Agroverm, Izagri Vita, Megamix, Zircon, Cytovit, BlackJack, Izagri Force) and a variant without treatment. On average, over three years, the productivity of mustard seeds varied within 1.32–1.61 t/ha, depending on the variety. The highest yield in the experiment was noted in the varieties Lutsiya (1.57 t/ha) and Svetlanka (1.61 t/ha), which exceeded the average value for the experiment by 0.10...0.14 t/ha. The maximum oil content in the experiment was noted in the varieties Lucia and Omega (30.02 and 30.48 %), the minimum – in the varieties Passion and Bracco (25.05 and 26.24 %). At the same time, all varieties had a high indicator of agronomic stability at the level of 78.33 ... 85.82 %, which characterizes their value for production. As a result of the use of microfertilizers, a tendency to increase the productivity of mustard was noted. When foliar processing of mustard plants, the most effective fertilizers were Izagri Vita and Agroverm, which contributed to obtaining the largest yield of 1.69 and 1.67 t/ha. The maximum oil content in the experiment (29.72 and 29.70 %) was noted in the seeds when the plants were treated with BlackJack and Isagri Force preparations. Pre-sowing treatment of seeds with microelement fertilizers contributed to the accumulation of oil in the seeds up to 27.75–29.46 %, with 27.87 % in the control. The highest yield in the experiment was obtained in the variants with seed treatment with Izagri Vita and BlackJack preparations (1.71 and 1.72 t/ha), which exceeded the control by 0.17...0.18 t/ha. In addition, the studied preparations affect the fatty acid composition of oilseeds to varying degrees. Their application led to a decrease or increase in the concentration of fatty acids. Foliar top dressing with Cytovit contributed to an increase in the concentration of erucic acid up to 30.1 %. And pre-sowing treatment of seeds with this preparation leads to its decrease to 25.3 %.

Ключевые слова: горчица белая (*Sinapis alba*), сорта, микроудобрения, листовая подкормка, предпосевная обработка, урожайность, масличность, жирнокислотный состав.

Key words: white mustard (*Sinapis alba*), varieties, microfertilizers, foliar feeding, pre-sowing treatment, yield, oil content, fatty acid composition.

Стабильная урожайность – важная характеристика любой сельскохозяйственной культуры, которая зачастую служит одним из основных показателей, определяющих ее выращивание в том или ином ре-

гионе. К основным факторам в системе технологии возделывания сельскохозяйственных культур, влияющим на повышение урожайности относятся сорт и его агротехника [1, 2].

* работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур» (тема № FGSS-2022–0008).

Известно, что в современной земледелии сорт выступает как самостоятельный фактор повышения урожайности и представляется наиболее доступным и дешевым способом увеличения производства сельскохозяйственной продукции [3]. В то же время, он служит своего рода фундаментом, на который накладываются элементы технологии возделывания.

В современных условиях в сельском хозяйстве широко применяют малозатратные технологии возделывания сельхозкультур, элементом которых выступает применение современных микроэлементных удобрений в различные фазы роста и развития культур [4, 5]. Использование этих препаратов экономически выгодно, способствует росту урожайности и улучшает качество продукции, а также повышает устойчивость растений к биотическим и абиотическим факторам среды [6, 7].

В последнее время ученые и практики все большее внимание уделяют горчице белой, которая отличается относительной неприхотливостью к внешним факторам и способностью формировать стабильные урожаи семян [8, 9].

Кроме того, горчица – универсальная, перспективная масличная культура различного направления использования [2]. Она служит источником пищевого и технического масла, содержание которого в семенах горчицы достигает 35 % [1, 10]. Масло большинства сортов горчицы белой содержит до 24...57 % эруковой и 15...36 % олеиновой кислоты и находит применение в качестве сырья для производства биодизеля [11]. С агротехнической точки зрения, горчица – хороший предшественник для многих полевых культур, который рано освобождает поле, улучшает структуру почвы, уменьшает засоренность полей [8, 12]. В связи с ростом популярности горчицы разработка элементов технологии ее выращивания, в том числе комплексное использование микроудобрений, приобретает особое значение, а также представляет большой научный и практический интерес.

Сегодня, у сельскохозяйственных товаропроизводителей появились широкие возможности для выбора как селекционных продуктов, наиболее приспособленных к конкретным агроклиматическим условиям, так и технологии их возделывания. Но чтобы этот выбор был действительно верным, необходимы исследования по сравнительной оценке сортов и применяемых технологий. В связи с этим, изучение сортов горчицы белой и ее реакции на применение микроудобрений в конкретных агроэкологических условиях – перспективное и актуальное направление.

Цель исследований – изучение влияния микроудобрений на продуктивность горчицы белой и сравнительная оценка ее сортов в условиях лесостепи Среднего Поволжья.

Методика. Работу выполняли в 2020–2022 гг. на полях Федерального научного центра лубяных культур в обособленном подразделении «Пензенский НИИСХ» в трех полевых экспериментах. В первом из них проводили сравнительное изучение сортов горчицы белой различной селекции. Все изучаемые сорта включены в Государственный реестр селекционных достижений и допущены к использованию во всех регионах возделывания. Исследовали следующие сорта:

Светланка (ООО «Сибирские масло-семена»), Исылкуль включён в реестр в 2020 г. Высота растений 122 см, вегетационный период 72 дня. Средняя урожайность семян 1,5 т/га, масличность – 30,8 %, масса 1000 семян 4,8...5,1 г;

Рапсодия (ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, Липецк) включён

в реестр в 2004 г. Растения средней высоты (90...95 см), вегетационный период 68...76 дней. Средняя урожайность семян 2,31 т/га, масличность – 30,3 %, масса 1000 семян средняя (5,5...6,0 г);

Колла (ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, Краснодар) включён в реестр в 2010 г. Высота растений 110 см, вегетационный период 84 дня. Средняя урожайность семян 1,16 т/га, масличность – 29,8 %, масса 1000 семян 5,3 г;

Радуга (ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, Краснодар) включён в реестр в 2000 г. Вегетационный период до 90 дней. Средняя урожайность семян 0,8 т/га, масличность – 28,9 %. Отличается повышенным содержанием (до 59 %) олеиновой кислоты;

Руслана (ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, Краснодар) включён в реестр в 2017 г. Высота растений 100 см, вегетационный период 88 дней. Средняя урожайность семян 1,66 т/га, масличность – 24,1 %, масса 1000 семян 5,4 г;

Люция (ФГБНУ ФНЦ ЛК, Пенза) включён в реестр в 2016 г. Высота растений 112,2 см, вегетационный период 96 дней. Средняя урожайность семян 1,6 т/га, масличность – 20,8 %. Масса 1000 семян 7,5 г;

Омега (ООО «АКТИВ АГРО», Саратов) включён в реестр в 2020 г. Высота растений 65 см, вегетационный период 75...83 дня. Средняя урожайность семян 1,23 т/га, масличность – 41,5 %, масса 1000 семян средняя;

Пассион (Deutsche Saatveredelung AG, Германия) включён в реестр в 2017 г. Высота растений 128...130 см, вегетационный период 91 день. Средняя урожайность семян 1,25 т/га, масличность – 24,76 %, масса 1000 семян 8,1 г;

Бракко (Deutsche Saatveredelung AG, Германия) позднеспелый сорт, вегетационный период 93...95 дней, высота растений 99 см. Средняя урожайность семян 1,38 т/га, масличность – 23,68 %, масса 1000 семян средняя (5,4...5,9 г).

Второй опыт предусматривал изучение эффективности некорневой подкормки посевов горчицы микроудобрениями. Обработку проводили в фазе 4...5 настоящих листьев культуры ранцевым опрыскивателем. Норму расхода для всех препаратов брали одинаковую, из расчета 1,0 л/га, расход рабочего раствора – 100 л/га. Схема опыта включала следующие варианты: без обработки (контроль); Гумат +7; Агроверм; Изагри Вита; Мегамикс; Циркон; Цитовит; БлекДжек; Изагри Форс.

В третьем опыте исследовали влияние на продуктивность горчицы предпосевной обработки семян микроэлементными препаратами. Семена обрабатывали из расчета 1,0 л/т, расход рабочего раствора 10 л/т. Схема полевого опыта включала следующие варианты: без обработки (контроль); Гумат +7; Агроверм; Изагри Вита; Мегамикс; Циркон; Цитовит; БлекДжек; Изагри Форс.

Гумат+7 – органоминеральное жидкое удобрение, содержащее гуматы и комплекс микроэлементов в хелатной форме. Изагри Вита – жидкое удобрение со сбалансированным составом микроэлементов, наряду с высокой концентрацией аминокислот. Изагри Форс – жидкое минеральное удобрение с аминокислотами, органическими кислотами и микроэлементами, состоящее из двух комплексов: Рост и Питание. Агроверм – жидкое органическое гуминовое биоудобрение, изготовленное на основе вермикомпоста. Мегамикс и Цитовит – жидкие минеральные удобрения с микро- и макроэлементами. БлекДжек – природный, жидкий органический биостимулятор нового поколения на основе гумина, гуминовых, ульминовых и фульвокислот. Циркон – жидкий, природный регулятор негормонального происхождения, содержащий комплекс гидроксикоричных кислот и производных от них, а также спирт в качестве консерванта.

Табл. 1. Продуктивность сортов горчицы белой и параметры их стабильности (среднее за 2020–2022 гг.)

Сорт	Урожайность, т/га	Коэффициент вариации, %	Масличность, %	ПУСС	Агрономическая стабильность (As)
Рапсодия	1,47	17,83	29,50	13,82	82,17
Радуга	1,49	14,18	27,84	17,75	85,82
Колла	1,41	21,67	28,29	10,47	78,33
Люция	1,57	17,49	30,02	15,95	82,51
Руслана	1,39	14,42	29,68	14,44	85,58
Омега	1,54	17,87	30,48	15,05	82,13
Пассион	1,32	20,70	25,05	9,92	79,30
Бракко	1,48	17,54	26,24	14,23	82,46
Светланка	1,61	17,59	28,92	16,69	82,41
Среднее по сортам	1,47	-	28,41	14,26	82,30
НСР	0,11	-	1,11	-	-

Объектом исследования в двух последних опытах служил сорт Люция. Посев горчицы осуществляли селекционной сеялкой СН-16 в оптимально-ранний срок (1 декада мая) рядовым способом с нормой высева 2,5 млн всхожих семян на 1 га. Площадь делянки 10 м². Закладку опытов, наблюдения, учет урожая (весовым методом, при полной спелости культуры) и анализы выполняли согласно методике проведения агротехнических опытов с масличными культурами [13].

Показатель уровня стабильности сорта (ПУСС) рассчитывали по методике, описанной Э. Д. Неттевичем [14], агрономической стабильности (As) – по формуле, описанной А. В. Кильчевским и Л. В. Хотылевой [15]. Масличность семян определяли методом Сокслета, содержание жирных кислот – методом газожидкостной хроматографии на хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.1» в лаборатории агротехнологий Пензенского НИИСХ.

Метеорологические условия в годы исследований отличались контрастностью, как по температурному режиму, так и по влагообеспеченности. В период вегетации (май-июль) горчицы в 2020 г. был отмечен дефицит влаги (ГТК – 0,72), сумма выпавших осадков составила 99,3 мм (при среднемноголетней норме 157,1 мм), а среднесуточная температура 17,0 °С (при норме 18,0 °С). В 2021 г. условия вегетационного периода были более благоприятными для развития культуры и характеризовались как умеренно засушливые, ГТК составил 0,84. В 2022 г. сумма осадков была выше, чем в 2020 и 2021 гг., и составляла 187,9 мм. Начиная со второй половины мая, дожди разной интенсивности выпадали практически каждый день, что привело к избыточному увлажнению в период от всходов до созревания горчицы, гидротермический коэффициент составил 1,40 (при норме ГТК – 1,01). При этом среднесуточные температуры были достаточно низкими – 16,5 °С. Такие погодные условия позволили в полной мере оценить сортовые особенности горчицы и значимость применения микроудобрений.

Результаты и обсуждение. Весь комплекс биологических свойств сорта и его адаптивные возможности в различных экологических условиях отражает урожайность культуры. В среднем за три года семенная продуктивность горчицы белой в нестабильных климатических условиях Пензенской области была достаточно высокой и варьировала в пределах от 1,32 до 1,61 т/га в зависимости от сорта (табл. 1).

Наибольшая в опыте урожайность отмечена у сортов Люция (1,57 т/га), Омега (1,54 т/га) и Светланка (1,61 т/га), из них только последний достоверно превысил величину среднего показателя по опыту – на 0,14 т/га. У сортов Люция и Омега прибавка была несущественной

и составила 0,07 и 0,10 т/га, относительно среднего, что меньше значения НСР (0,11 т/га). Самый низкий урожай сформировали сорта Руслана и Пассион, который составил 1,39 и 1,32 т/га соответственно и был существенно ниже как средней урожайности по опыту, так и продуктивности других сортов.

Урожайность сортов горчицы сильно изменялась по годам исследования, величины коэффициентов вариации составляли 14,42...21,67 %. Самой стабильной была урожайность сортов Радуга и Руслана (14,18 и 14,42 %) при невысокой величине этого показателя – 1,46...1,51 и 1,21...1,41 т/га соответственно. Наибольшее варьирование урожайности по годам отмечено у сортов Колла и Пассион (21,67 и 20,70 %), у которых она изменялась от 1,20...1,21 до 1,77...1,85 т/га соответственно. Это указывает на их невысокую генетическую защищенность в отношении действия лимитирующих факторов.

Все сорта в годы исследований характеризовались высокой масличностью семян, уровень которой варьировал от 25,05 % до 30,48 %. По величине этого показателя выделялись сорта Люция и Омега, содержание масла в семенах которых составляло 30,02 и 30,48 % соответственно, что на 1,61...2,07 % больше среднего значения по всем сортам. Самая низкая масличность (25,05 % и 26,24 %) отмечена у сортов германской селекции Пассион и Бракко.

Оценку реакции сортов горчицы на изменение стрессовых факторов среды и их адаптивность следует рассматривать с позиции стабильности, которую характеризует показатель уровня стабильности сорта

Табл. 2. Продуктивность горчицы белой, в зависимости от листовой обработки растений микроудобрениями (2020–2022 гг.)

Вариант	Урожайность, т/га	Масличность, %	Масса 1000 семян, г
Контроль	1,53	28,04	6,22
Цитовит	1,60	28,10	6,12
БлекДжек	1,63	29,72	6,25
Агроверм	1,69	28,72	6,35
Изагри Вита	1,67	28,32	6,52
Гумат +7	1,55	28,48	6,21
Мегамикс	1,62	28,92	6,50
Циркон	1,61	28,59	6,18
Изагри Форс	1,61	29,70	6,45
НСР	0,10	1,95	0,14

Табл. 3. Продуктивность горчицы белой, в зависимости от предпосевной обработки семян микроудобрениями (среднее за 2020–2022 гг.)

Вариант	Урожайность, т/га	Масличность, %	Масса 1000 семян, г
Контроль	1,54	27,87	6,16
Гумат+7	1,62	28,53	5,92
Агроверм	1,70	28,26	6,47
Изагри Вита	1,72	29,14	6,18
Мегамикс	1,57	29,46	6,02
Циркон	1,63	27,75	6,32
Цитовит	1,56	28,49	6,29
БлекДжек	1,71	28,68	6,50
Изагри Форс	1,62	28,74	5,98
HCP ₀₅	0,11	0,94	0,11

(ПУСС). Наиболее высоким он был у сортов Радуга, Люция, Омега и Светланка – 15,05...17,75 при величине этого показателя в среднем по опыту 14,26. Следует отметить, что диапазон приспособительных возможностей этих сортов к условиям произрастания немного шире, чем у других.

Еще одна из важных характеристик сорта – агрономическая стабильность (As), которая позволяет выделить наиболее ценные для производства генотипы. В наших исследованиях величина этого показателя была высокой у всех сортов и составляла 78,33...85,82 %, что свидетельствует об их толерантности к условиям возделывания.

В результате испытаний при фолиарной обработке растений горчицы микроудобрениями отмечена тенденция к увеличению ее продуктивности. В среднем за 2020–2022 гг. урожайность семян составила 1,53...1,69 т/га (табл. 2). При этом наиболее эффективным было применение удобрений Изагри Вита, Агроверм и БлекДжек, некорневая обработка которыми

обеспечивала формирование наибольшей урожайности – 1,69, 1,67 и 1,63 т/га соответственно. Прибавка к контролю была достоверной и составила 0,16, 0,14 и 0,10 т/га. Применение препарата Мегамикс также способствовало значительной, но несущественной прибавке урожая на 0,09 т/га, что находится в границах наименьшей существенной разности 0,10 т/га. При обработке растений остальными изучаемыми биоудобрениями отмечено статистически незначимое увеличение урожайности семян на 0,02...0,08 т/га.

Результаты изучения качественных показателей семян горчицы показали, что листовая подкормка микроудобрениями практически не влияла на их масличность. Максимальное в опыте содержание масла отмечено в семенах растений при обработке препаратами БлекДжек и Изагри Форс. В этих вариантах оно составило 29,72 и 29,70 % соответственно и было выше, чем в контроле, на 1,68 и 1,66 %. Масличность семян в других вариантах находилась на уровне 28,10...28,92 %, при 28,04 % в контроле. Увеличение, относительно варианта в контроле, составило всего 0,06...0,88 %, при наименьшей существенной разности 1,95 %.

В вариантах с подкормкой препаратами Изагри Вита, Мегамикс, Агроверм и Изагри Форс сформировались наиболее крупные семена, у которых масса 1000 шт. составила 6,41...6,52 г, что на 0,19...0,30 г выше, чем в контроле.

В исследованиях с предпосевной обработкой семян микроэлементными удобрениями урожайность горчицы в среднем за три года составила 1,54...1,71 т/га, применяемые препараты способствовали ее увеличению на 0,02...0,18 т/га, относительно контроля (табл. 3). Наиболее эффективными были Агроверм, Изагри Вита и БлекДжек, обработка семян которыми стимулировала формирование наибольшего урожая семян – 1,70, 1,71 и 1,72 т/га соответственно, что на 0,16...0,18 т/га превышало контрольный вариант. При использовании других микроудобрений отмечено статистически незначимое увеличение урожайности семян на 0,02...0,09 т/га, при наименьшей существенной разности 0,11 т/га.

Табл. 4. Содержание основных жирных кислот в маслосеменах горчицы в зависимости от применения микроудобрений

Вариант	Содержание кислот, %				
	насыщенные	олеиновая	линолевая	линоленовая	эруковая
Листовая обработка					
Контроль	2,9	34,1	9,2	10,0	29,1
Цитовит	2,7	33,9	10,0	9,7	30,1
БлекДжек	2,9	35,8	10,4	10,1	26,7
Агроверм	2,8	34,9	8,7	10,4	27,7
Изагри Вита	2,9	34,7	9,6	10,3	28,0
Гумат +7	2,7	34,4	9,8	10,1	28,7
Мегамикс	3,0	34,1	10,1	10,4	27,8
Циркон	2,8	34,8	9,5	10,1	28,0
Изагри Форс	2,7	33,8	9,5	10,0	28,2
Предпосевная обработка					
Контроль	3,6	24,8	19,7	11,0	28,1
Гумат+7	3,7	31,0	10,3	9,6	30,4
Агроверм	3,5	29,2	9,9	9,9	32,4
Изагри Вита	3,7	30,7	10,8	9,8	30,5
Мегамикс	3,5	29,2	9,6	10,2	32,6
Циркон	3,8	31,2	11,3	9,5	29,1
Цитовит	3,7	23,8	20,5	11,1	25,3
БлекДжек	3,5	28,6	10,1	11,0	28,7
Изагри Форс	3,8	29,1	10,7	10,7	32,6

Предпосевная обработка семян микроэlementными удобрениями способствовала увеличению накопления масла в семенах до 29,46 %, при 27,87 % в контроле. Большинство изучаемых препаратов в той или иной мере способствовали повышению масличности семян. Исключение составлял вариант с Цирконом, обработка семян которым привела к несущественному снижению уровня масличности до 27,75 %.

Наибольшее содержание масла в семенах (29,46 и 29,14 %) отмечено в вариантах с предпосевной обработкой Мегамиксом и Изагри Вита, в которых прибавка к контролю составила 1,59 и 1,27 % соответственно. Использование биопрепаратов Гумат +7, Агроверм, Цитовит, БлекДжек и Изагри Форс увеличивало содержание масла незначительно, прибавка составила всего 0,39...0,87 % при НСР₀₅ – 0,94 %.

Масса 1000 семян в вариантах с обработкой составляла от 5,92 до 6,50 г, при 6,16 г в контроле. Наиболее крупные семена сформировались в вариантах с обработкой БлекДжеком (6,50 г) и Агровермом (6,47 г), где масса 1000 семян была выше, чем в контроле, на 0,31 и 0,34 г. При использовании Циркона и Цитовита семена были немного мельче (6,32 и 6,28 г), но относительно контроля, прибавка была существенной – 0,16 и 0,13 г. В вариантах с препаратами Гумат+7 и Изагри Форс сформировались самые мелкие семена – соответственно 5,92 и 5,98 г, что было значительно ниже, чем в контроле (на 0,18 и 0,24 г).

Изучаемые препараты в разной степени влияли и на качество масла, и в частности на его жирнокислотный состав. Листовые подкормки горчицы микроудобрениями вызвали незначительное изменение содержания олеиновой кислоты, концентрация которой на фоне подкормки Цитовитом и Изагри Форсом снижалась до 33,8 и 33,9 % соответственно, а при использовании биоудобрения БлекДжек увеличивалась до 35,8 %. В остальных вариантах, в том числе в контроле, ее содержание составляло 34,1...34,9 % (табл. 4).

Некорневые подкормки способствовали снижению содержания эруковой кислоты до 26,7...28,7 %, относительно 29,1 % в контроле. Исключение составил вариант с обработкой Цитовитом, где отмечали рост величины этого показателя до 30,1 %. Одновременно при его использовании доля линоленовой кислоты снижалась до 9,7 %. Опрыскивание растений Агровермом приводило к снижению содержания линолевой кислоты до 8,7 % против 9,2...10,4 % в других вариантах.

Наибольшее содержание олеиновой кислоты отмечено при предпосевной обработке семян препаратами Циркон и Гумат+7, на фоне которых величина этого показателя достигала 31,0 и 31,2 % при 24,8 % в контроле. Использование Агроверма и Мегамикса снижало концентрацию линолевой кислоты, относительно контроля, на 9,8 и 10,1 %. Одновременно обработка семян этими препаратами способствовала максимальному в опыте увеличению содержания эруковой кислоты до 32,4 и 32,6 % соответственно. Наименьшее ее содержание (25,3 %) отмечено в варианте с применением Цитовита. Самая высокая концентрация линоленовой кислоты отмечена в варианте без обработки (11,0 %). Все изучаемые препараты способствовали снижению величины этого показателя до 9,5...10,9 %. Содержание насыщенных кислот под влиянием изучаемых приемов существенно не менялось. При листовой подкормке оно составляло 2,7...3,0 %, после предпосевной обработки – 3,5...3,8 % в зависимости от варианта.

Выводы. Все изученные сорта горчицы белой представляют ценность для производства и обладают

высокой агрономической стабильностью на уровне 78,33...85,82 %. Наибольшей в опыте урожайностью выделились сорта Люция и Светланка – 1,57 и 1,61 т/га соответственно. По масличности выделились сорта Омега и Люция, содержание масла в семенах которых составило 30,48 и 30,02 %.

Наибольшую урожайность семян при некорневой обработке растений горчицы микроудобрениями обеспечило применение Изагри Вита и Агроверм – 1,67 и 1,69 т/га, что на 0,14...0,16 т/га выше, чем в контрольном варианте. Использование препаратов БлекДжек и Изагри Форс способствовало максимальному накоплению масла в семенах (29,72 и 29,70 %).

При предпосевной обработке семян горчицы наибольшую урожайность отмечали при использовании микроэlementных удобрений Агроверм, Изагри Вита, БлекДжек и Мегамикс – 1,70...1,72 т/га с масличностью 29,46...29,14 %.

Листовые подкормки растений и предпосевная обработка семян горчицы микроудобрениями оказывали влияние на жирнокислотный состав маслосемян. Некорневые подкормки способствовали снижению содержания эруковой кислоты до 26,7...28,7 %, относительно 29,1 % в контроле. Использование Агроверма и Мегамикса для обработки семян привело к максимальному в опыте увеличению накопления эруковой кислоты до 32,4 и 32,6 %.

Литература

1. Картамышева Е. В., Лучкина Т. Н., Збраилова Л. П. Экологическая пластичность и стабильность сортов горчицы сарептской селекции ВНИИМК в условиях недостаточного увлажнения Ростовской области // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 80. С. 139–144.
2. Прахова Т. Я., Прахов В. А. Оценка сортов горчицы сарептской в условиях лесостепи Среднего Поволжья // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 85. С. 203–208.
3. Продуктивность сортов льна масличного в зависимости от сроков посева в Нечерноземной зоне России / Д. В. Виноградов, Ю. А. Мажайский, А. В. Новикова и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 1. С. 17–20.
4. Влияние стимуляторов роста и микроудобрений на продуктивность крамбе абиссинской (*Crambe Abyssinica* H.) / Т. Я. Прахова, А. Н. Кшиникаткина, В. А. Прахов и др. // Аграрный научный журнал. 2020. № 6. С. 34–37.
5. Наумцева К. В. Некорневые подкормки в агроценозах горчицы белой в условиях Нечерноземной зоны России // Вестник Рязанского государственного аграрного университета имени П. А. Костычева. 2021. Т. 13. № 3. С. 62–67.
6. Кирюшин В. И. Научно-инновационное обеспечение приоритетов развития сельского хозяйства // Достижения науки и техники АПК. 2019. № 3. С. 5–10.
7. Vinogradov D. V., Naumtseva K. V., Lupova E. I. Use of biological fertilizers in white mustard crops in the non-Chernozem zone of Russia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 341 P. 012204. URL: <https://www.researchgate.net/publication/337288206> (дата обращения: 13.03.2023).
8. Донская М. В., Велкова Н. И., Наумкин В. П. Зернобобовые культуры (чина, вика, горох) в смешанных посевах с горчицей белой // Земледелие. 2019. № 4. С. 25–28.
9. Ростова Е. Н. Влияние элементов технологии на засоренность и продуктивность посевов горчицы

- сарептской (*Brassica juncea*) // *Зерновое хозяйство России*. 2021. № 3 (75). С. 75–81.
10. Журных С. С. Семенная продуктивность горчицы белой и сарептской в Удмуртской Республике // *Вестник КрасГАУ*. 2021. № 12 (177). С. 17–24.
11. Yesilyurt M. K., Arslan M., Eryilmaz T. Application of response surface methodology for the optimization of biodiesel production from yellow mustard (*Sinapis alba* L.) seed oil // *International journal of green energy*. 2019. Vol. 16. No. 1. P. 60–71.
12. Тойгильдин А. Л., Подсевалов М. И., Остин В. Н. Перспективы использования масличных культур в севооборотах лесостепной зоны Поволжья // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. № 2 (54). С. 54–61.
13. Методика проведения полевых и агротехнических опытов с масличными культурами. Краснодар: ВНИИМК, 2010. 323 с.
14. Неттевич Э. Д. Потенциал урожайности рекомендованных для возделывания в Центральном районе РФ сортов яровой пшеницы и ячменя и его реализация в условиях производства // *Доклады РАСХН*. 2001. № 3. С. 50–55.
15. Кильчевский А. В., Хотылева Л. В. Экологическая селекция растений. Минск: Тэхналогія, 1997. 372 с.

Поступила в редакцию 29.03.2023

После доработки 19.04.2023

Принята к публикации 10.05.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПЛОДАХ СЛИВЫ ДОМАШНЕЙ (PRUNUS DOMESTICA L.) В УСЛОВИЯХ ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ *

А.М. Миронов, М.Ю. Акимов, доктор сельскохозяйственных наук,
В.А. Кольцов, кандидат сельскохозяйственных наук,
Р.Е. Богданов, кандидат сельскохозяйственных наук

Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина,
393774, Тамбовская обл., Мичуринск, ул. Мичурина, 30
E-mail: vniigispr3@yandex.ru

Плоды сливы домашней (Prunus domestica L.) – ценный источник фенольных соединений, в частности гидроксицикоричных кислот и их эфиров. Гибридное происхождение гексаплоидного вида Prunus domestica, огромное разнообразие сортов и различные районы выращивания не позволяют сделать окончательный вывод об уровне содержания и составе фенольных соединений в плодах этой культуры. Цель исследований – определение и идентификация фенольного состава плодов деревьев сливы домашней (Prunus domestica L.), произрастающих на территории Тамбовской области. Объектами исследований служили 8 сортов сливы универсального и столового назначения. Опытные насаждения заложены в 2014 г. по схеме 6 м × 3 м. В качестве подвоя использовали СВГ 11–19. Определение фенольных компонентов проводили методом обращенно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии с использованием жидкостного хроматографа Thermo Ultimate 3000, оснащенного диодно-матричным детектором DAD-3000. Хроматографирование метанольных экстрактов плодов сливы осуществляли бинарным градиентом подвижной фазы, в качестве которого использовали ацетонитрил и водный раствор дигидрофосфата калия, подкисленного ортофосфорной кислотой до pH 2,5. Содержание гидроксицикоричных кислот в изученных плодах сливы находилось на следующих уровнях: 4-кофеилхиновая кислота – 5,33...181,54 мг/100 г; 5-кофеилхиновая кислота – 1,69...31,73 мг/100 г; 3-р-кумароилхиновая кислота – 0,54...5,77 мг/100 г; 3-кофеилхиновая кислота – 0,04...0,63 мг/100 г. Среди флавонолов преобладал кверцетин-3-рутинозид – 0,77...9,17 мг/100 г. В изученных плодах сливы идентифицировано 3 антоциана: цианидин-3-глюкозид, цианидин-3-рутинозид и пеонидин-3-глюкозид. В структурном составе антоцианов плодов сливы преобладал цианидин-3-глюкозид, доля которого составляла от 60 до 90 % от общего их содержания. Результаты исследования свидетельствуют о перспективности использования выделенных сортов сливы (Prunus domestica L.) в качестве источника гидроксицикоричных кислот, антоцианов и флавонолов в рационе питания населения.

INVESTIGATION OF THE COMPLEX OF PHENOLIC COMPOUNDS IN FRUITS OF THE DOMESTIC PLUM (PRUNUS DOMESTICA L.) IN CONDITIONS OF TAMBOV REGION

M.A. Mironov, M.Yu. Akimov, V.A. Koltsov, R.E. Bogdanov

Michurin Federal Scientific Center,
393774, Tambovskaya obl., Michurinsk, ul. Michurina, 30
E-mail: vniigispr3@yandex.ru

The fruits of Prunus domestica L. are a valuable source of phenolic compounds, in particular hydroxycinnamic acids and their esters. Hybrid origin of Prunus domestica hexaploid species, a huge variety of varieties and different growing areas do not allow scientists to make a definitive conclusion about certain phenolic compounds in plum fruits. The purpose of our research is to determine and identify the phenolic composition of fruits of Prunus domestica L. growing in the Tambov region of the Russian Federation. Eight varieties of universal and table plum were taken as objects of research. Experimental plantations were planted in 2014 according to the scheme of 6x3 m. SVG 11–19 was used as a rootstock. The study of phenolic components of plum fruits was performed by HPLC using a Thermo Ultimate 3000 liquid chromatograph equipped with a DAD-3000. Separation was performed on a Hypersil Gold C18 column (4.6 × 250 mm, 5 μm). The binary mobile phase gradient was phosphate and acetonitrile. For the analysis, plum fruits were extracted with 70 % aqueous methanol. The levels of hydroxycinnamic acids in the plum fruits studied were determined: 4-caffeoylquinic acid–5.33...181.54 mg/100 g, 5-caffeoylquinic acid–1.69...31.73 mg/100 g, 3-p-coumaroylquinic acid–0.54...5.77 mg/100 g, 3-caffeoylquinic acid–0.04...0.63 mg/100 g. Among flavonols, the predominant component is quercetin-3-rutinoside – 0.77...9.17 mg/100 g. Three anthocyanins were identified in the studied plum fruits: cyanidin-3-glucoside, cyanidin-3-rutinoside and peonidin-3-glucoside. In the structural composition of plum fruit anthocyanins, cyanidin-3-glucoside dominates, accounting for 60 to 90 % of the total anthocyanin content. The obtained data on the content of phenolic components in fruits of isolated plum varieties (Prunus domestica L.) indicate the promise of their further study for breeding studies and as a source of hydroxycinnamic acids, anthocyanins and flavonols in the diet of the population.

Ключевые слова: плоды, слива домашняя (Prunus domestica L.), ВЭЖХ, УФ-детектирование, гидроксицикоричные кислоты, флавонолы, антоцианы.

Key words: fruits, Prunus domestica L., HPLC, UV-detection, hydroxycinnamic acids, flavonols, anthocyanins.

Фенольные соединения служат важными биохимическими компонентами плодовой, ягодной и овощной продукции, в которых они обуславливают как биохимические, так и органолептические свойства (цвет, горечь и терпкость). Известно, что диета, богатая фенольными

соединениями, значительно снижает риск развития онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний [1, 2]. Растительные фенольные соединения признаны сильными природными антиоксидантами с широким спектром биологических свойств. В связи с этим возрастает науч-

* работа выполнена при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Национальная сетевая коллекция генетических ресурсов растений для эффективного научно-технологического развития РФ в сфере генетических технологий» по соглашению № 075-15-2021-1050 от 28.09. 2021 г.

ный интерес к оценке их содержания в растительной продукции. Между тем, имеющаяся на сегодняшний день в литературных источниках информация зачастую имеет фрагментарный характер и ограничивается несколькими сортами и одной группой фенольных соединений [3].

Слива домашняя (*Prunus domestica* L.) принадлежит к семейству Rosaceae и происходит из Кавказского региона в Западной Азии. Плоды культуры характеризуются большим разнообразием по размеру, форме, вкусу, внешнему виду и биохимическому составу [4, 5]. Окраска плодов варьирует от зеленого и желтого до красного и различных оттенков синего, что указывает на сильные различия в биосинтезе и накоплении фенольных соединений [6].

Плоды сливы – ценный источник фенольных кислот. В первую очередь это гидроксикоричные кислоты и их эфиры, в частности, кофейлхинные кислоты. Кроме того, в плодах культуры в зависимости от сорта и ареала происхождения содержатся 3-р-кумароилхинная, кофейная, протокатеховая, кумаровая и феруловая кислоты [7, 8]. Антоциановый комплекс плодов сливы в основном представлен гликозидами цианидина и пеонидина [9]. Анализ их гидролизованных экстрактов продемонстрировал присутствие различных количеств флавонолов (производные кверцетина, кемпферола и мирицетина) [10]. В основном это катехины, на долю которых может приходиться до 4...8 % общего количества фенольных веществ. При этом, например, R. Slimestad, et al. [11] не обнаружили присутствия флаван-3-олов в плодах сливы, выращенных на территории Норвегии.

В целом представители этого вида характеризуются различным накоплением фенольных производных в плодах, как по качественному, так и по количественному составу. Результаты анализа литературных источников свидетельствуют о том, что определения содержания и состава фенольных соединений в плодах сливы домашней (*Prunus domestica* L.), произрастающей на территории Тамбовской области, ранее не проводили.

Цель исследований – идентификация и количественное определение фенольного состава плодов деревьев сливы домашней (*Prunus domestica* L.), произрастающей на территории Тамбовской области.

Методика. Работу выполняли в 2019–2021 гг. на базе лаборатории передовых послеуборочных технологий в опытно-производственных насаждениях ФГБНУ ФНЦ им. И. В. Мичурина. Оценивали 8 сортов сливы в стадии потребительской спелости (табл. 1). Отбор проб проводили с 10 деревьев каждого сорта в соответствии с действующими методическими рекомендациями [12]. В качестве контроля использовали районированный сорт Этюд. Экспериментальные насаждения заложены в 2014 г. по схеме 6 м × 3 м. В качестве подвоя использовали СВГ 11–19. Сад расположен на верхней части восточного склона. Почва – серая лесная. Гранулометрический состав неоднороден с преобладанием легкого суглинки.

Пробы для анализа готовили путем трехкратной ультразвуковой экстракции в 70 %-ном метаноле в соответствии с работой Mitic V., et al [8]. Использовали метанол ОСЧ производства Вектон. Навеску 1 г измельченной мякоти плода отбирали из средней пробы (50 г) и заливали 10 мл растворителя, после чего помещали в ультразвуковую баню на 30 мин при температуре 50 °С, затем центрифугировали (10 мин, 3000 об/мин), надосадочную жидкость переносили в мерную колбу 50 мл. Осадок снова заливали метанолом, и повторяли процедуру. После трех последовательных экстракций полученный объем доводили до метки 50 мл 70 %-ным метанолом, после чего 2 мл пробы отбирали шприцем и отфильтровывали через мембранный шприцевой фильтр (диаметр 13 мм, 0,22 мкм, PTFE) в хроматографическую вialу. Пробы подготавливали в 3 повторностях.

Качественный и количественный состав фенольных компонентов плодов сливы определяли методом обращенно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии (ОФ ВЭЖХ) на хроматографе Thermo Ultimate 3000 с диодно-матричным детектором DAD-3000 в соответствии с действующими методическими рекомендациями [13]. Разделение компонентов проводили на колонке Hypersil Gold C18 (4,6 × 250 мм, 5μm). Использовали бинарный градиент подвижной фазы – фосфатного буфера (А) и ацетонитрила (В), соотношение которых изменяли в следующих пропорциях: 0...10 мин – 5 % В, 18 мин – 23 % В, 30 мин – 30 % В, 35...45 мин – 40 % В, 55 мин – 5 % В, 60 мин – 5 % В. Фосфатный буфер представлял собой 0,0073 М раствор KH_2PO_4 , подкисленный ортофосфорной кислотой до pH 2,5. Для его приготовления использовали дигидрофосфат калия ОСЧ (Ленреактив) и ортофосфорную кислоту ОСЧ 12–3 (Ленреактив). Ацетонитрил – Carlo Erba Reagents (For HPLC Plus Gradient grade). Детектирование сигнала проводили при длине волны 280, 330, 360 и 520 нм, диапазон сигнала от 200 до 700 нм. Скорость подачи подвижной фазы – 1 мл/мин, температура колонки – 30 °С, объем инъекции – 20 μл.

Соединения идентифицировали по времени удерживания и спектральным характеристикам стандартов, а также литературным данным. В качестве стандартов использовали: хлорогеновую кислоту (компания Fluka); кофейную кислоту (компания Fluka); пара-кумаровую кислоту (компания Sigma-Aldrich); рутин (компания Sigma-Aldrich).

Спектры снимали в диапазоне длин волн 230...430 нм, в дальнейшем при анализе гидроксикоричных кислот детекцию проводили при длине волны 330 нм, флавонолов – 360 нм и антоцианов – 520 нм. Концентрацию отдельных фенольных соединений рассчитывали по площадям пиков в соответствии с внешними стандартами.

Расчет концентрации отдельных фенольных соединений и приготовление стандартных растворов эталонных веществ проводили в соответствии с действующими методическими рекомендациями [13]. Для расчета

Табл. 1. Помологическая характеристика изучаемых сортов сливы

Сорт	Срок созревания	Окраска кожицы плода	Назначение сорта
Венера	средний	фиолетовая	универсальный
Волжанка	средний	красно-фиолетовая	столовый
Гармония	среднеранний	красно-фиолетовая	столовый
Евразия 21	ранний	фиолетовая	столовый
Кооперативная	средний	темно-фиолетовая	универсальный
Ренклюд колхозный	среднеранний	желтая	столовый
Ренклюд Харитоновой	средний	темно-фиолетовая	универсальный
Этюд (к)	среднеранний	темно-фиолетовая	универсальный

идентифицированных соединений, не имеющих в наличии внешних стандартов, использовали эквиваленты родственных соединений. Количество 3-кофеилхинной (неохлорогеновой) кислоты рассчитывали по 5-кофеилхинной кислоте, 3-*p*-кумароилхинной кислоты – по *p*-кумаровой кислоте [14].

Обработку полученных результатов проводили с использованием программного обеспечения Chromeleon 7.2.8.

Результаты и обсуждение. При определении гидроксикоричных кислот соединения, соответствующие пикам 5 и 11, согласно времени удерживания (рис. 1) и форме спектральных кривых (рис. 2), в сравнении со стандартными веществами, были идентифицированы как 5-кофеилхинная (хлорогеновая) кислота и кофейная кислота.

Согласно времени выхода и форме спектральных кривых, соединения 2 и 16 предположительно идентифицированы как 3-кофеилхинная кислота и 4-кофеилхинная кислота в соответствии с данными, ранее опубликованными в работах Nakatani N., et al. [7] и Bennat S., et al. [15], а соединение 3 – как 3-*p*-кумароилхинная кислота [7, 8, 11]. Стоит отметить, что в плодах сливы Ренклюд Харитоновой не удалось определить криптохорогеновую кислоту.

Среди флавонолов, согласно времени удерживания и максимуму поглощения, в сравнении со стандартным веществом, компонент 6 был идентифицирован как кверцетин-3-рутинозид, который преобладал среди соединений этого класса в рассмотренных образцах. Компонент 7 имел схожую форму спектральных кривых и максимум поглощения с кверцетин-3-рутинозидом и, согласно времени выхода в соответствии с данными литературных источников [10, 16], предположительно идентифицирован как кверцетин-3-гликозид.

Согласно литературным данным [9, 17, 18] в плодах сливы идентифицированы: цианидин-3-рутинозид, цианидин-3-ксилозид, пеонидин-3-гликозид, пеонидин-3-рутинозид, с преобладанием цианидин-3-рутинозида. Согласно времени выхода и форме спектральных кривых в соответствии с литературными данными [17, 18, 19] соединения 8, 9 и 10 предположительно идентифицированы как цианидин-3-гликозид, цианидин-3-рутинозид, пеонидин-3-гликозид соответственно.

Установлено, что в антоциановом комплексе плодов сливы преобладал цианидин-3-гликозид, на долю которого приходилось от 60 до 90 % от общего содержания антоцианов. В плодах сливы сортов Венера, Ренклюд

Табл. 2. Содержание основных гидроксикоричных кислот и флавонолов в плодах сливы, мг/100 г

Сорт	3-CQA*	5-CQA*	3-CoQA*	Рутин
Венера	25,2	8,02	4,97	3,23
Волжанка	27,2	5,61	4,29	2,63
Гармония	45,9	27,8	4,18	9,17
Евразия 21	76,6	17,2	3,26	1,04
Кооперативная	77,9	4,5	4,57	4,77
Ренклюд колхозный	181,5	20,4	5,77	3,63
Ренклюд Харитоновой	5,33	1,69	0,54	0,77
Этюд (к)	95,5	31,7	1,61	3,91
Среднее арифметическое, М	66,9	14,6	3,64	3,64
Доверительный интервал, d	55,6	11,3	1,76	2,62
Ошибка средней арифметической, m	19,6	4,01	0,62	0,93

*3-CQA – неохлорогеновая кислота, 5-CQA – хлорогеновая кислота, 3-CoQA – 3-*p*-кумароилхинная кислота.

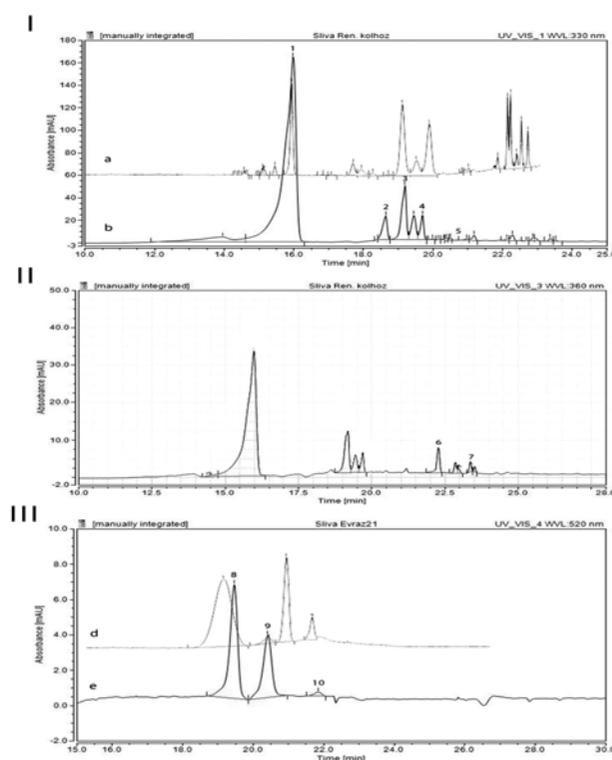


Рис. 1. Хроматограмма ОФ ВЭЖХ разделения фенольных соединений I – хроматограмма при длине волны 330 нм: а – метанольный экстракт кофе, б – метанольный экстракт плодов *Prunus domestica* L., 1–5-кофеилхинная (хлорогеновая) кислота, 2–3-*p*-кумароилхинная кислота, 3–4-кофеилхинная кислота, 4–3-кофеилхинная кислота, 5 – кофейная кислота. II – хроматограмма при длине волны 360 нм: с – метанольный экстракт плодов *Prunus domestica* L., 5 – кверцетин-3-рутинозид, 6 – кверцетин-3-гликозид. III – хроматограмма при длине волны 520 нм: d – метанольный экстракт плодов *Aronia melanocarpa*, e – метанольный экстракт плодов *Prunus domestica* L., 8 – цианидин-3-гликозид, 9 – цианидин-3-рутинозид, 10 – пеонидин-3-гликозид.

Харитоновой, Волжанка и Кооперативная идентифицированы два антоциана: цианидин-3-гликозид и цианидин-3-рутинозид.

По содержанию неохлорогеновой кислоты в плодах сливы установлены существенные различия (табл. 2). Наибольшее накопление неохлорогеновой кислоты отмечено в плодах сорта Ренклюд Колхозный (181,5 мг/100 г), наименьшее – в плодах сорта Ренклюд Харитоновой (5,33 мг/100 г).

Содержание хлорогеновой кислоты в изученных плодах сливы варьировало в интервале 1,69...31,7 мг/100 г. Наибольшим ее накоплением отличались плоды сорта Этюд (31,7 мг/100 г) и Гармония (27,8 мг/100 г), наименьшим – Венера (8,02 мг/100 г), Ренклюд Харитоновой (1,69 мг/100 г), Волжанка (5,60 мг/100 г), Кооперативная (4,57 мг/100 г).

Концентрация 3-*p*-кумароилхинной кислоты составляла 0,54...5,77 мг/100 г. Самое высокое ее накопление отмечено в плодах сливы сорта Ренклюд колхозный (5,77 мг/100 г), наименьшее – Ренклюд Харитоновой (0,54 мг/100 г).

Доминирующей гидроксикоричной кислотой в плодах изученных сортов, а также основным компонентом среди фенольных соединений, была неохлорогеновая (56,3...68,43 % от общего содержания фенольных соединений). Полученные данные согласуются с работами Usenik V., et al. [19] и Slimestad R., et al. [11], в которых

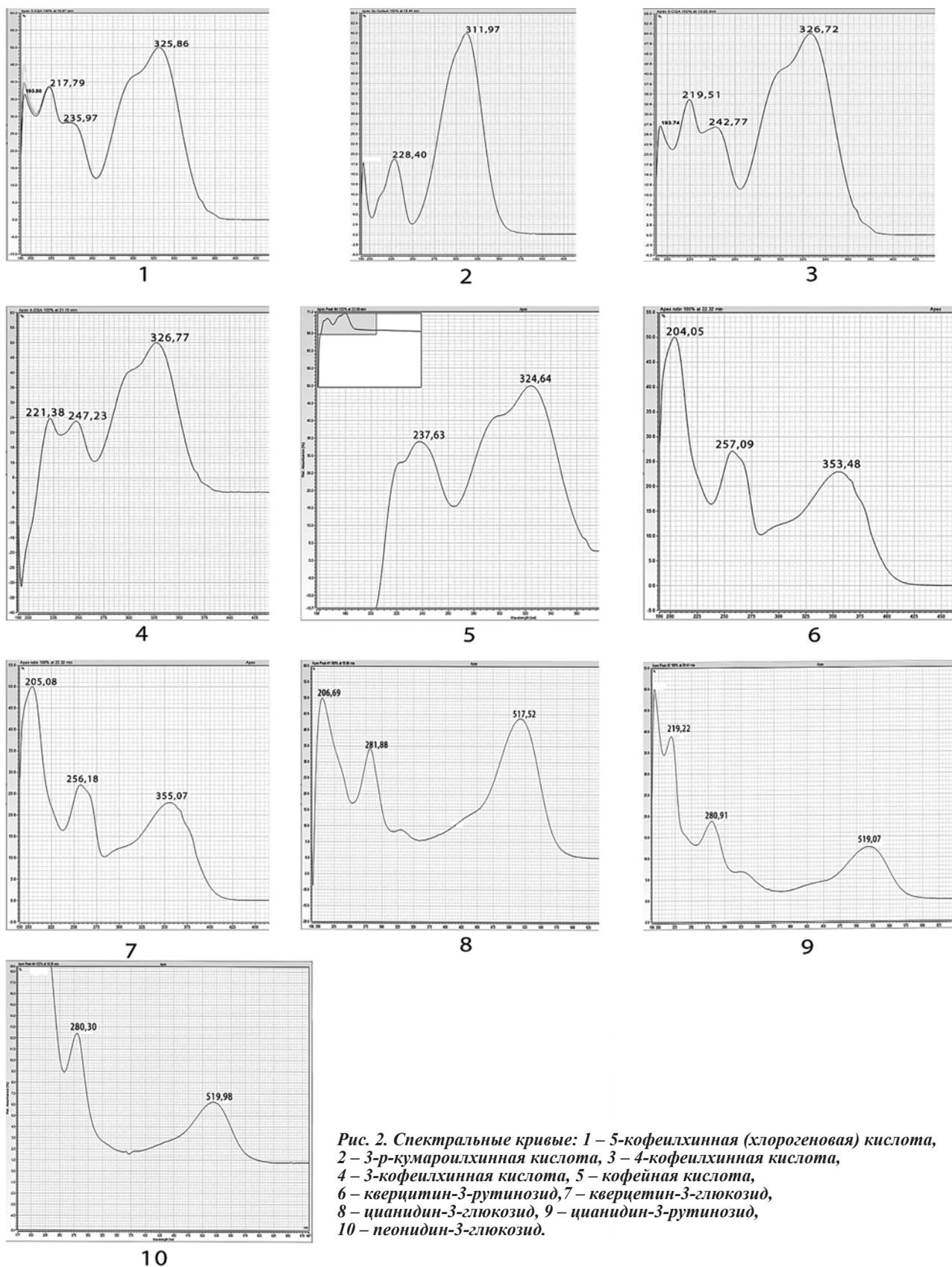


Рис. 2. Спектральные кривые: 1 – 5-кофеилхинная (хлорогеновая) кислота, 2 – 3-р-кумароилхинная кислота, 3 – 4-кофеилхинная кислота, 4 – 3-кофеилхинная кислота, 5 – кофейная кислота, 6 – кверцетин-3-рутинозид, 7 – кверцетин-3-глюкозид, 8 – цианидин-3-глюкозид, 9 – цианидин-3-рутинозид, 10 – пеонидин-3-глюкозид.

представлены результаты изучения фенольных соединений в плодах сливы, произрастающей на территории Словении и Норвегии соответственно. В этих работах накопление неохлорогеновой кислоты варьировало

в пределах 19,3...153,0 мг/100 г, хлорогеновой кислоты – 12,3...54,7 мг/100 г, 3-р-кумароилхинной кислоты – 0,1...7,6 мг/100 г. В плодах сливы, произрастающей на территории Московской области, Мотылева С. М.

и др. [21] установили низкое содержания хлорогеновой кислоты (1,76...3,34 мг/100 г). В работе Tomić J., et al. [22] в плодах сливы, произрастающей на территории западной Сербии, установлен низкий уровень накопления неохлорогеновой кислоты – 0,26...23,26 мг/100 г и хлорогеновой кислоты – 0,14...1,62 мг/100 г. Однако содержание 3-р-кумароилхинной кислоты (1,53...14,2 мг/100 г) было выше, чем в наших исследованиях.

По концентрации рутина в наших исследованиях выделены плоды сорта Гармония (9,17 мг/100 г). Средний уровень его накопления (2,63...4,77 мг/100 г) установлен в плодах сливы сортов Энюд, Ренклод колхозный, Венера, Волжанка, Кооперативная. Плоды сортов Евразия 21 (1,04 мг/100 г) и Ренклод Харитоновой (0,77 мг/100 г) характеризовались наименьшим содержанием рутина среди изученных образцов. Полученные данные согласуются с результатами Usenik V., et al. [19] и Slimestad R., et al. [11], а в работе Tomić J., et al. [22] определен сравнительно низкий уровень содержания рутина в исследуемых плодах сливы – 0,03...1,32 мг/100 г.

Выводы. В условиях Тамбовской области установлены значительные различия по уровню накопления в плодах сливы разных сортов неохлорогеновой кислоты (5,33...181,5 мг/100 г), хлорогеновой кислоты (1,69...31,7 мг/100 г), 3-р-кумароилхинной кислоты (0,54...5,77 мг/100 г) и рутина (0,77...9,17 мг/100 г). Плоды сорта Ренклод колхозный содержали наибольшее количество гидроксикоричных кислот, сорта Гармония – рутина. В плодах сливы идентифицированы такие антоцианы, как цианидин-3-глюкозид, цианидин-3-рутинозид, пеонидин-3-глюкозид. При этом в плодах сливы сортов Венера, Ренклод Харитоновой, Волжанка и Кооперативная обнаружить пеонидин-3-глюкозид не удалось. Полученные данные об уровне содержания фенольных компонентов плодов сливы (*Prunus domestica* L.) свидетельствуют о перспективности дальнейшего изучения выделенных сортов в селекционных исследованиях и включения их плодов в рацион питания населения в качестве источника гидроксикоричных кислот и флавонолов.

Литература

1. Потребление полифенольных соединений в популяции высокого сердечно-сосудистого риска / Т. И. Батлук, И. П. Березовикова, Д. В. Денисова и др. // Профилактическая медицина. 2020. № 4 (23). С. 67–73. doi : 10.17116/profmed20202304167.
2. Федотчева Т. А., Шимановский Н. Л. Фармакологические способы преодоления множественной лекарственной устойчивости к химиотерапии // Химико-фармацевтический журнал. 2022. 56. № 10 (56). С. 3–9. doi : 10.30906/0023–1134–2022–56–10–3–9.
3. Extrapolation of phenolic compounds as multi-target agents against cancer and inflammation / N. Kumar, S. Gupta, T. C. Yadav, et al. // Journal of Biomolecular Structure and Dynamics. 2019. Vol. 37 (9). P. 2355–2369. doi : 10.1080/07391102.2018.1481457.
4. Агробиологические и морфобиохимические аспекты изучения привойно-подвойных комбинаций сливы / Г. Ю. Упадъшева, С. М. Мотылёва, Д. В. Панищева и др. // Садоводство и виноградарство. 2022. № 4. С. 40–47. doi : 10.31676/0235–2591–2022–4–40–47.
5. Кочубей А. А., Заремук Р. Ш. Комплексная оценка сортов сливы домашней по качеству плодов в условиях южного садоводства // Аграрная наука. 2019. № 3. С. 62–65.
6. Дубровская О. Ю., Жбанова Е. В., Богданов Р. Е. Анализ многолетней динамики содержания химических компонентов плодов сливы // Субтропическое и декоративное садоводство. 2021. № 79. С. 99–107. doi : 10.31360/2225–3068–2021–79–99–107.
7. Identification, quantitative determination, and antioxidative activities of chlorogenic acid isomers in prune (*Prunus domestica* L.) / N. Nakatani, S. Kayano, H. Kikuzaki, et al. // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2000. Vol. 48. P. 5512–5516. doi : 10.1021/jf000422s.
8. Chemometric characterization of peach, nectarine and plum cultivars according to fruit phenolic content and antioxidant activity / V. Mitic, M. Ilic, M. Dimitrijevic, et al. // Fruits. 2016. Vol. 71. P. 57–66. doi : 10.1051/fruits/2015042.
9. Trendafilova A., Ivanova V., Trusheva B., et al. Chemical Composition and Antioxidant Capacity of the Fruits of European Plum Cultivar «Саčanska Lepotica» Influenced by Different Rootstocks // Foods. 2022. Vol. 11 (18). URL : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36140977/> (дата обращения : 26.12.2022). doi : 10.3390/foods11182844.
10. Identification of phenolic compounds in plum fruits (*Prunus salicina* L. and *Prunus domestica* L.) by high-performance liquid chromatography/tandem mass spectrometry and characterization of varieties by quantitative phenolic fingerprints / R. Jaiswal, H. Karaköse, S. Rühmannat, et al. // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2013. Vol. 61 (49). P. 12020–12031. doi : 10.1021/jf402288j.
11. Slimestad R., Vangdal E., Brede C. Analysis of phenolic compounds in six Norwegian plum cultivars (*Prunus domestica* L.) // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2009. Vol. 57. P. 11370–11375. doi : 10.1021/jf902054x.
12. Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур / под ред. Е. Н. Седова и Т. П. Огольцовой. Орел : ВНИИСПК, 1999. 606 с.
13. Методы анализа минорных биологически активных веществ в пище / под ред. В. А. Тумельяна и К. И. Эллера. М. : Научно-исследовательский институт питания РАМН, Династия, 2010. 180 с.
14. Sweet and sour cherry phenolics and their protective effects on neuronal cells / D.-O. Kim, J. H. Ho, J. K. Young, et al. // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2005. Vol. 53. P. 9921–9927. doi : 10.1021/jf0518599.
15. HPLC Analysis of chlorogenic acid lactones in roasted coffee / C. Bennat, U. H. Engelhardt, A. Kiehne, et al // Zeitschrift fur Lebensmittel-Untersuchung und Forschung. 1994. Vol. 199. P. 17–21. doi : 10.1007/BF01192945.
16. Saygi K. O. Quantification of Phenolics from *Coriandrum sativum* vulgare and *Coriandrum sativum* microcarpum by HPLC–DAD // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A : Science. 2021. Vol. 45. P. 1319–1326. doi : 10.1007/s40995–021–01132–1.
17. Quality assessment of 178 cultivars of plum regarding phenolic, anthocyanin and sugar content / S. Sahamishirazi, J. Moehring, W. Claupein, et al. // Food Chemistry. 2017. Vol. 214. P. 694–701. doi : 10.1016/j.foodchem.2016.07.070.
18. Usenik V. The influence of the production system on the composition of phytochemicals in *Prunus domestica* L. Fruit // Journal of Food Composition and Analysis. 2021. Vol. 95. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S088915752031406X> (дата обращения : 07.12.2022). doi : 10.1016/j.jfca.2020.103701.
19. Characterization of anthocyanins and proanthocyanidins in some cultivars of *Ribes*, *Aronia*, and *Sambucus* and their antioxidant capacity // X. Wu, L. Gu, R. L. Prior, et

- al. // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2004. Vol. 52. P. 7846–7856. doi :10.1021/jf0486850.
20. *Quality changes during ripening of plums (Prunus domestica L.)* / V. Usenik, D. Kastelec, R. Veberic, et al. // *Food Chemistry*. 2008. Vol. 111(4). P. 830–836. doi : 10.1016/j.foodchem.2008.04.057.
21. *Помологические и биохимические особенности плодов сливы* / С. М. Мотылева, В. С. Симонов, И. М. Куликов и др. // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2017. № 2. С. 37–42.
22. *Phytochemical assessment of plum (Prunus domestica L.) cultivars selected in Serbia* / J. Tomic, F. Stampar, I. Glisic, et al. // *Food Chemistry*. 2019. Vol. 30. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814619312191> (дата обращения : 07.12.2022). doi : 10.1016/j.foodchem.2019.125113.

Поступила в редакцию 15.02.2023

После доработки 23.03.2023

Принята к публикации 25.04.2023

РАЗНООБРАЗИЕ И ПАТОГЕННОСТЬ ГРИБОВ РОДА *FUSARIUM*, ВСТРЕЧАЮЩИХСЯ В МИКОБИОТЕ СОИ*

О.П. Гаврилова, А.С. Орина, Т.Ю. Гагкаева, кандидаты биологических наук

Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений,
196608, Санкт-Петербург, ш. Подбельского, 3
E-mail: t.gagkaeva@mail.ru

Исследования проводили с целью уточнения видового состава грибов *Fusarium*, встречающихся в микобиоте сои из различных регионов РФ, а также характеристики их физиолого-биохимических свойств. Выявление таксономического статуса 21 штамма грибов, выделенных в 2006–2021 гг. из семян (7 шт.), стеблей (10 шт.) и корней (4 шт.) образцов сои различного географического происхождения (Амурская обл. – 7 шт., Краснодарский край – 5 шт., Воронежская, Курская, Тамбовская обл., Приморский край – по 2 шт., Рязанская обл. – 1 шт.), проводили методом филогенетического анализа нуклеотидных последовательностей гена фактора элонгации трансляции EF-1a. Идентифицированы пять видов грибов: *F. oxysporum* (11 штаммов), *F. equiseti* (4), *F. proliferatum* (3), *F. solani* (2), а также *F. commune* (1 штамм), впервые выявленный в микобиоте сои на территории РФ. При культивировании на картофельно-сахарозной агаризованной среде оптимальным температурным диапазоном роста всех штаммов оказался 25...30 °С. Наибольший диаметр колоний в таких условиях выявлен у штаммов *F. equiseti* и *F. commune* – в среднем 68,5...74,0 мм, наименьший – у штаммов *F. solani* (49,5...55,8 мм). Наиболее агрессивными были три штамма *F. oxysporum* и штамм *F. commune*, выделенные из стеблей сои, которые вызвали значительные некрозы листьев у сорта Изидор длиной в среднем 16,7...21,7 мм, у сорта Селекта 201–10,7...23,3 мм. В то же время большинство проанализированных грибов *Fusarium* (52...67 % в зависимости от сорта сои) были непатогенными. Отмечена высокая внутривидовая вариабельность патогенности среди штаммов *F. oxysporum* и *F. proliferatum*.

DIVERSITY AND PATHOGENICITY OF THE *FUSARIUM* FUNGI OCCURRED IN SOYBEAN MYCOBIOTA

O.P. Gavrilova, A.S. Orina, T.Yu. Gagkaeva

All-Russian Institute of Plant Protection,
196608, Sankt-Petersburg, sh. Podbelskogo, 3
E-mail: t.gagkaeva@mail.ru

The aim of present study was to reveal the species composition of *Fusarium* fungi found in the soybean mycobiota from the various origins of Russia, as well as to characterize physiological and biochemical properties of isolates. Identification of the taxonomic status of 21 *Fusarium* strains isolated from seeds, stems and roots of soybeans was clarified according to data using phylogenetic analysis of the nucleotide sequences of the gene of translation elongation factor 1a. Five fungal species have been identified: *F. oxysporum* (11 strains), *F. equiseti* (4), *F. proliferatum* (3), *F. solani* (2), as well one strain of *F. commune*, which was identified for the first time in soybean mycobiota in Russia. The morphological and cultural characteristics of the isolates and their pathogenicity to leaves of two soybean varieties in the laboratory conditions were also analyzed. At the cultivation of *Fusarium* fungi on potato-sucrose agar medium, the optimal temperature range for the growth of all isolates has been established as 25–30 °C, at which the largest colony diameter 68,5–74,0 mm was found in *F. equiseti* and *F. commune* strains, and the smallest colonies (49,5–55,8 mm) was detected in *F. solani* strains. Three *F. oxysporum* strains and one *F. commune* strain, isolated from the stems, were characterized by high pathogenicity to the leaves of two soybean varieties. These strains caused the necrosis of leaves of the Isidor variety in the range of average length 16,7–21,7 mm, and the necrosis of leaves of the Selecta 201 variety in the range of 10,7–23,3 mm. At the same time, the most of the analyzed *Fusarium* strains (52–67 % depending on the soybean variety) were non-pathogenic. A high intraspecific variability of pathogenicity to soybean leaves was noted among *F. oxysporum* and *F. proliferatum* strains.

Ключевые слова: *Fusarium commune*, соя (*Glycine max*), температурный оптимум, метод листовых сегментов, некроз, хлороз.

Key words: *Fusarium commune*, soybean (*Glycine max*), temperature optimum, detached leaf assay, necrosis, chlorosis.

Соя – важная сельскохозяйственная культура, традиционно выращиваемая во многих регионах мира. Увеличение потребности в продуктах питания, а также в кормах на основе сои, привело к росту посевных площадей этой культуры в РФ за десять лет в 2,5...3,5 раза, или до 3380 тыс. га в 2022 г. [1]. В связи с этим необходимо расширение генетического разнообразия сортов, адаптированных к регионам выращивания, характеризующихся высокой продуктивностью и устойчивостью к абиотическим и биотическим факторам среды. К одной из проблем возделывания сои относят её восприимчивость к заболеваниям грибной этиологии, из-за которой потенциальные потери урожая в зависимости от вида патогена, времени заражения, сорта и условий окружающей среды могут быть значительными [2].

Фузариозы сои могут вызывать различные грибы *Fusarium*, заболевания проявляются в виде корневой

гнили, увядания, некротических и хлоротичных пятнистостей листьев и стеблей, инфицирования семян. Интенсивные исследования видового состава грибов *Fusarium* в различных регионах возделывания сои позволили идентифицировать около 20 видов, из которых наиболее часто выявляют *F. solani* (Mart.) Sacc., *F. oxysporum* Schltdl., *F. acuminatum* Ellis & Everhart, *F. equiseti* (Corda) Saccardo, *F. graminearum* Schwabe, *F. avenaceum* (Fries) Sacc., *F. sporotrichioides* Sherb., *F. tricinctum* (Corda) Sacc. [3, 4, 5]. Анализ зараженности образцов сои, выращенной в разных регионах РФ, также выявил значительное разнообразие грибов *Fusarium*, ассоциированных с семенами, корнями и вегетирующими частями растения [6].

Идентификацию грибов *Fusarium* до видового уровня традиционно проводят путем анализа их микроморфологических и культуральных характеристик [7].

* работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19–76–30005).

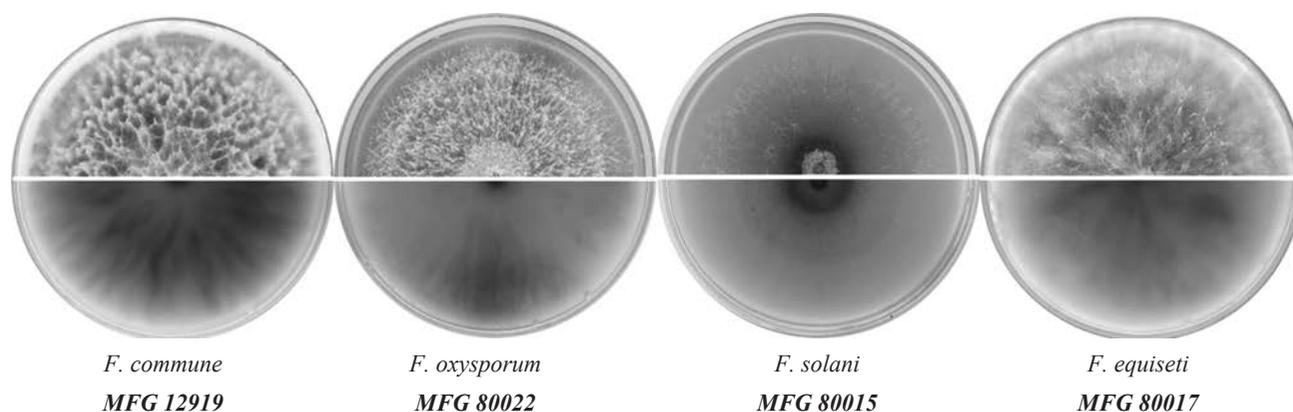


Рис. 1. Фенотипическое разнообразие грибов рода *Fusarium*, выделенных из сои (КСА, 25 °С, 12 суток, в темноте). Верхняя часть круга – поверхность, нижняя – реверс культуры гриба; в подписи указаны вид гриба и коллекционный номер штамма.

По морфолого-культуральным признакам многие фузариевые грибы можно уверенно определить только до уровня комплекса видов *Fusarium*, а точное установление таксономического статуса штаммов требует применения молекулярно-генетических методов, основанных на анализе нуклеотидных последовательностей филогенетически информативных участков генома [8, 9]. На сегодняшний день корректно идентифицировать виды *Fusarium* позволяет только сочетание морфологического описания и филогенетического анализа [9].

Одним из основных препятствий для эффективной борьбы с болезнями сои, вызываемыми видами *Fusarium*, считают отсутствие информации о видовом разнообразии и вредности этих грибов, а также устойчивости возделываемых сортов [2].

Цель исследования – уточнение видового состава грибов *Fusarium*, встречающихся в микобиоте сои из различных регионов РФ, а также характеристика их физиолого-биохимических свойств.

Методика. В исследования включили 21 штамм грибов *Fusarium*, выделенных в период 2006–2021 гг. из семян (7 шт.), стеблей (10 шт.) и корней (4 шт.) образцов сои различного географического происхождения, собранных в Амурская области (7 шт.), Краснодарском крае (5 шт.), Воронежской, Курской, Тамбовской областях, Приморском крае (по 2 шт.), Рязанской области (1 шт.). Все штаммы хранятся в коллекции лаборатории микологии и фитопатологии Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений. Предварительно, по морфологическим признакам, их идентифицировали как представители четырёх комплексов видов *Fusarium*: *F. fujikuroi*, *F. incarnatum-equiseti*, *F. oxysporum* и *F. solani* (рис. 1).

Штаммы выращивали на картофельно-сахарозной агаризованной среде (КСА) в течение 7...10 суток. Выделение ДНК осуществляли из 10...50 мг мицелия грибов, собранного с поверхности выращенных колоний, по адаптированной методике с использованием 2 %-ного раствора цетилтриметиламмоний бромидом и хлороформа [9].

Уточнение таксономического статуса грибов проводили путем секвенирования участка гена фактора элонгации трансляции EF-1 α [9]. Нуклеотидные последовательности фрагментов определяли с использованием секвенатора ABIPrism 3500 (Applied Biosystems, Япония) и набора реактивов BigDye Terminator v3.1 Cycle Sequencing Kit (Applied Biosystems, США), проверяли с помощью инструмента BLAST на сходство с депонированными в базе данных NCBI GenBank, из которой были

выбраны 16 референсных последовательностей. Филогенетические отношения между таксонами оценивали методами максимального правдоподобия и максимальной экономии с использованием программы MEGA X 10.1. Достоверность топологии филогенетических деревьев определяли посредством бутстрэп-анализа (1000 повторений). Полученные нуклеотидные последовательности были размещены в базе данных NCBI GenBank (OK626390, OR778746 – OR778760).

Температурный оптимум роста штаммов определяли, культивируя их в темноте на КСА в диапазоне от 10 °С до 40 °С с шагом 5 °С. Из колоний грибов микробиологическим сверлом вырезали диски диаметром 4 мм и помещали мицелием вниз на поверхность питательной среды в центр чашки Петри. Эксперимент проводили в двукратной повторности. Через пять суток измеряли диаметр каждой колонии в двух перпендикулярных направлениях и рассчитывали среднее значение.

Оценку патогенности штаммов осуществляли в лабораторных условиях при инокуляции листьев сои сортов Изидор и Селекта 201. Растения выращивали в почве в течение 2 недель. Затем листья разрезали на сегменты и раскладывали абаксиальной стороной вверх в кювету на фильтровальную бумагу, увлажненную стерильной водой. Каждый листовой сегмент прокалывали препаративной иглой и на место повреждения помещали диск диаметром 5 мм, вырезанный из культуры гриба. В контрольных вариантах раскладывали диски чистой КСА. Кюветы инкубировали при 22...24 °С и естественном освещении в течение 7 суток. Каждым штаммом инокулировали не менее 6 сегментов листьев. Патогенность штаммов оценивали по вызываемым некрозам (длина 0...5 мм – непатогенные; 6...10 мм – относительно агрессивные; более 10 мм – высокоагрессивные) и хлорозам (балл поражения 0 – нет симптома; 1 – слабый; 2 – средний; 3 – сильный) листьев сои.

Расчёт средних значений показателей, их доверительных интервалов при уровне значимости 95 %, а также коэффициентов корреляции проводили с использованием статистических методов в программах Microsoft Excel 2010 и Statistica 10.0.

Результаты и обсуждение. Филогенетический анализ полученных нуклеотидных последовательностей позволил установить принадлежность штаммов к пяти комплексам видов: *Fusarium oxysporum*, *F. incarnatum-equiseti*, *F. fujikuroi*, *F. solani* и *F. nisikadoi* (рис. 2). Таким образом, подтверждена идентификация 11 штаммов *F. oxysporum*, 4 – *F. equiseti*, 3 – *F. proliferatum* и 2 – *F. solani*. Частая встречаемость этих фузариевых грибов в семенах

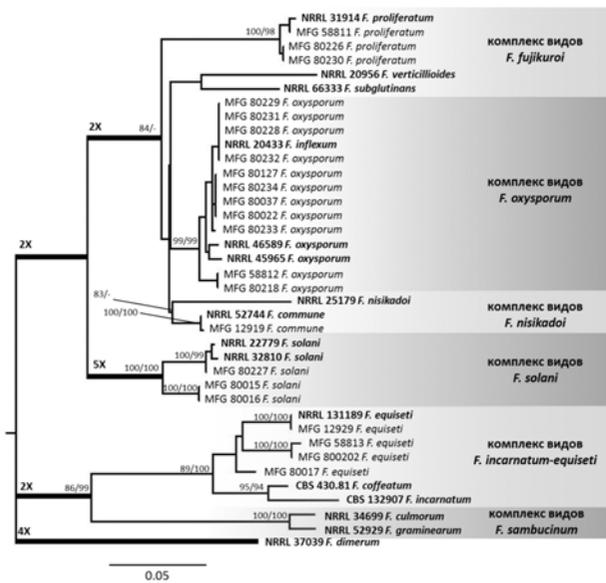


Рис. 2. Дендрограмма филогенетического сходства *Fusarium* spp., построенная на основе последовательностей фрагмента гена фактора элонгации трансляции EF-1a методом максимального правдоподобия. В узлах приведены значения бутстреп-поддержки (> 70 %) при анализе методами максимального правдоподобия и максимальной экономии. В качестве внешней группы использован штамм NRRL 37039 *F. dimerum*.

[2, 4, 10], а также в качестве возбудителей корневой гнили [5, 11, 12] ранее неоднократно продемонстрирована.

Штамм MFG 12919, предварительно идентифицированный как *F. oxysporum* и выделенный из стебля сои из Приморского края, кластеризовался совместно с группой штаммов вида *F. commune*, относящегося к комплексу видов *F. nissikadoi* [13]. Это первая находка *F. commune* на сое в РФ. Морфолого-культуральные признаки *F. commune* сходны с *F. oxysporum*, поэтому зачастую его определяют как представителя комплекса видов *Fusarium oxysporum* [14]. Ранее на территории РФ *F. commune* выявляли в микобиоте лиственницы из Красноярского края [15] и картофеля из Московской области [16]. В составе комплекса возбудителей корневой гнили сои вид *F. commune* был идентифицирован в США [17], Канаде [5], Китае [12], Южной Корее [18]. По всей видимости, *F. commune* – широко распространённый на разных растениях патоген.

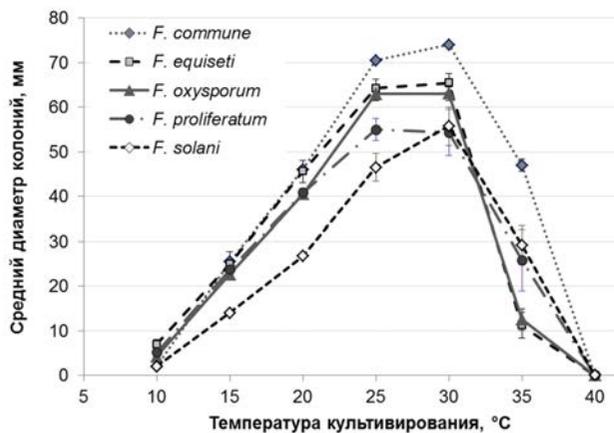


Рис. 3. Влияние температуры культивирования на рост штаммов грибов *Fusarium*, выделенных из сои (КСА, 5 суток, в темноте).

Оптимальной температурой роста штаммов *F. oxysporum*, *F. equiseti*, *F. proliferatum* был диапазон 25...30 °С, тогда как у штаммов *F. solani* и *F. commune* отмечен достоверный пик роста при 30 °С (рис. 3). Такой диапазон температур считают оптимальным для роста большинства видов грибов рода *Fusarium* [7]. При 35 °С штаммы *F. equiseti* и *F. oxysporum* демонстрировали слабый рост, диаметр их колоний уменьшился на 75...78 % от средней величины этого показателя при оптимальных температурах. В то же время штаммы других видов, особенно *F. commune*, проявили относительную толерантность к такой высокой температуре. Критической температурой, при которой рост штаммов всех видов прекращался, была 40 °С.

Условия возделывания сои влияют на видовой состав патогенов, их реакцию взаимодействия с растением и, в итоге, на урожайность [2]. Выявленный широкий диапазон температур (10...35 °С) роста всех проанализированных штаммов указывает на экологическую пластичность грибов в отношении этого фактора среды и, как следствие, возможный значительный ареал их распространения.

Анализ патогенности штаммов *Fusarium* выявил их различия по способности вызывать некрозы и хлорозы листьев сои (рис. 4). Доля штаммов *Fusarium* непатогенных для сои сортов Изидор и Селекта 201 составила 52 % и 67 % соответственно. Наиболее агрессивными, вызывающими некрозы листьев длиной 13,3...23,3 мм, оказались штаммы *F. oxysporum* MFG 80037 и MFG 80022, а также *F. commune* MFG 12919, выделенные из стеблей сои, выращенной в Приморском крае и Амурской области. Инокуляция листьев сортов Изидор и Селекта 201 анализируемыми штаммами только в 10 % и 19 % случаев соответственно приводила к появлению заметных хлорозов, из которых самые обширные индуцировали штаммы *F. commune* MFG 12919 (2 балла, сорт Изидор), *F. equiseti* MFG 80017 (2,7 балла, сорт Селекта 201) и *F. oxysporum* MFG 80037 (2,3 балла, сорт Селекта 201). Коэффициент корреляции между размерами некрозов листьев двух сортов сои, вызываемых штаммами, был равен 0,92 (при $p < 0,001$), а связь между выявленными хлорозами листьев оказалась слабее – 0,51 (при $p = 0,019$).

Среди 11 штаммов *F. oxysporum*, включенных в исследование, 6 штаммов оказались непатогенными, а 5 штаммов продемонстрировали относительную и высокую агрессивность. Полученные результаты согласуются с данными других авторов, которые отмечали значительную вариабельность патогенности среди штаммов *F. oxysporum* [11, 18]. В нашем исследовании штамм *F. commune* MFG 12919 оказался высоко агрессивным в отношении листьев сои. Ранее также было показано, что инокуляция растений сои изолятами *F. commune* приводила к некротическим повреждениям семядолей и проростков [5, 17, 18].

Штаммы *F. equiseti* и *F. solani*, выделенные из растительной ткани с симптомами поражения, продемонстрировали низкую агрессивность. Из трёх проанализированных штаммов *F. proliferatum* только один, выделенный из семян сои, выращенной в Краснодарском крае, вызывал заметные некрозы листьев, тогда как остальные были непатогенными. Ранее сообщали о высокой агрессивности штаммов *F. proliferatum* к проросткам сои [19], а также других штаммов, относящихся к комплексу видов *F. fujikuroi*, в том числе *F. proliferatum*, по сравнению со штаммами комплекса видов *F. incarnatum-equiseti*, в отношении бобов, семян и корней сои [4].

Патогенность грибов – физиолого-биохимический признак, который реализуется при участии многих

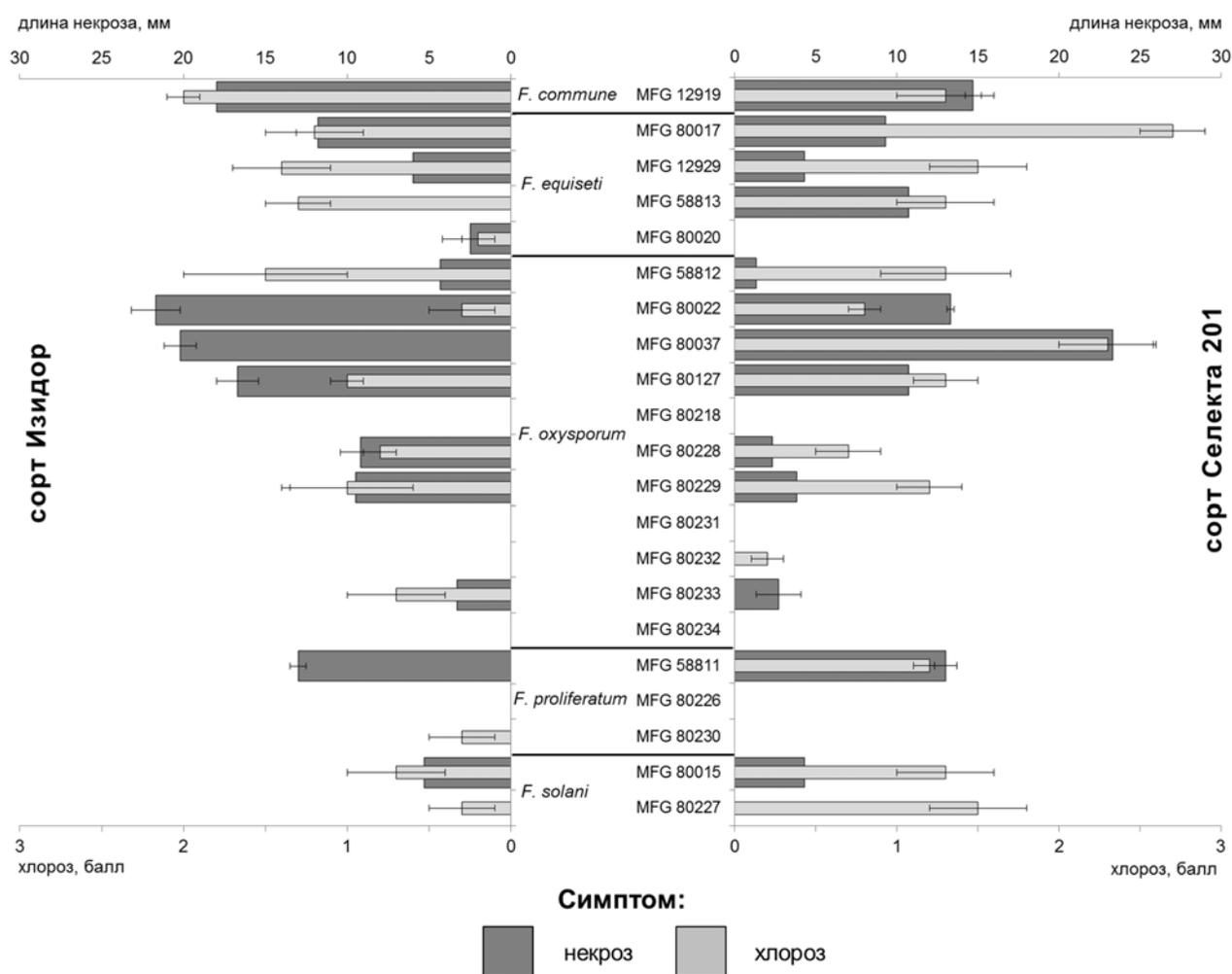


Рис. 4. Симптомы некроза и хлороза листьев сои сортов Изидор и Селекта 201, вызываемые штаммами грибов *Fusarium* (отрезками указаны доверительные интервалы средних значений при уровне значимости 95 %).

факторов, в частности образующихся ферментов, низкомолекулярных специфических и неспецифических соединений, по отношению к растению. Фитотоксины грибов *Fusarium* способны распространяться от корней к листьям, индуцировать образование активных форм кислорода клетками растения в ответ на внедрение патогена, приводя к образованию хлорозов и некрозов у восприимчивых сортов [20, 21]. Так, широко известное вредоносное заболевание «синдром внезапной гибели сои» вызывают грибы комплекса видов *F. solani*, продуцирующие фитотоксины, в том числе цитринин, фузариновую кислоту и радицикол [21, 22].

Известно, что бесклеточные фильтраты из культур *F. solani*, выращенных при 15, 20, 25 °С, вызывали достоверно более сильные хлорозы и некрозы листьев сои, чем штаммы, выращенные при 30 °С [23]. В наших экспериментах по оценке патогенности грибов (при 22...24 °С) отмечена частая несогласованность проявления количественных признаков заболевания при инокуляции листьев двух сортов. Достоверные различия между сортами сои при их инокуляции фузариевыми грибами, как в проявлении симптомов – некрозов и/или хлорозов листьев, так и в количественном их выражении, демонстрируют возможность успешного применения этой методики для лабораторного скрининга устойчивости сортов этой зернобобовой культуры.

Информация о точной идентификации грибов *Fusarium*, встречающихся в посевах сои, а также выявление факторов среды, влияющих на распространение отдельных видов, их взаимодействие с растением-хозяином и другими участниками инфекционного процесса – основа разработки актуальных методов защиты этой культуры.

Выводы. В результате исследований с использованием метода филогенетического анализа нуклеотидных последовательностей гена фактора элонгации трансляции EF-1α уточнена видовая принадлежность грибов *Fusarium*, выделенных из сои различного происхождения, трудно идентифицируемых по морфологическим характеристикам – *F. oxysporum*, *F. equiseti*, *F. proliferatum*, *F. solani* и *F. commune*. В лабораторных экспериментах выявлены оптимальные температуры роста штаммов (25...30 °С) и установлена высокая патогенность к сое штаммов *F. oxysporum* и *F. commune*.

Литература

1. Экспертно-аналитический центр агробизнеса. URL : <https://ab-centre.ru/news/soya-ploschadi-sborny-i-urozhaynost-v-2001-2019-gg> (дата обращения : 02.11.2022).
2. Characterization and pathogenicity of *Fusarium* species associated with soybean pods in maize/soybean strip

- intercropping* / M. Naeem, H. Li, L. Yan, et al. // *Pathogens*. 2019. Vol. 8. Article. 245. URL : <https://www.mdpi.com/2076-0817/8/4/245> (дата обращения : 22.03.2023).
3. Characterization of species of *Fusarium* causing root rot of Soybean (*Glycine max* L.) in South Dakota, USA / P. N. Okello, K. Petrovic, A. K. Singh, et al. // *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2020. Vol. 42. P. 560–571.
 4. Evaluation of pathogenic *Fusarium* spp. associated with soybean seed (*Glycine max*) in Hubei province, China / L. Zhao, X. Wei, T. Zheng, et al. // *Plant Disease*. 2022. Vol. 106. P. 3178–3186.
 5. Genetic diversity and aggressiveness of *Fusarium* species isolated from soybean in Alberta, Canada / Q. Zhou, N. Li, Chang K.-F., et al. // *Crop Protection*. 2018. Vol. 105. P. 49–58.
 6. Действие фунгицидов на рост патогенов сои из рода *Fusarium* / А. С. Орина, Н. П. Шпилова, Е. Л. Гасич и др. // *Защита и карантин растений*. 2019. № 3. С. 17–19.
 7. Leslie J. F., Summerell B. A. *The Fusarium Laboratory Manual*. Blackwell Publishing : Ames, IA, USA, 2006. 388 p.
 8. Multiple evolutionary origins of the fungus causing Panama disease of banana : concordant evidence from nuclear and mitochondrial gene genealogies / K. O'Donnell, H. C. Kistler, E. Cigelnik, et al. // *PNAS*. 1998. Vol. 95. P. 2044–2049.
 9. DNA sequence-based identification of *Fusarium* : a work in progress / K. O'Donnell, B. K. Whitaker, I. Laraba, et al. // *Plant Disease*. 2022. Vol. 106. P. 1597–1609.
 10. Natural deoxynivalenol occurrence and genotype and chemotype determination of a field population of the *Fusarium graminearum* complex associated with soybean in Argentina / G. Barros, M. S. Alaniz Zanon, A. Abod, et al. // *Food Additives and Contaminants : Part A*. 2012. Vol. 29. P. 293–303.
 11. Diaz Arias M. M., Leandro L. F., Munkvold G. P. Aggressiveness of *Fusarium* species and impact of root infection on growth and yield of soybeans // *Phytopathology*. 2013. Vol. 103. P. 822–832.
 12. Identification of *Fusarium* species associated with soybean root rot in Sichuan Province, China / X. Chang, H. Dai, D. Wang, et al. // *European Journal of Plant Pathology*. 2018. Vol. 151. P. 563–577.
 13. One Fungus, One Name : Defining the genus *Fusarium* in a scientifically robust way that preserves longstanding use / D. M. Geiser, T. Aoki, Ch. W. Bacon, et al. // *Phytopathology*. 2013. Vol. 103. P. 400–408.
 14. *Fusarium commune* is a new species identified by morphological and molecular phylogenetic data / K. Skovgaard, S. Rosendahl, K. O'Donnell, et al. // *Mycologia*. 2003. Vol. 95. P. 630–636.
 15. Phylogenetic analysis and molecular typing of trichothecene-producing *Fusarium* fungi from Russian collections / A. A. Stakheev, L. V. Samokhvalova, O. D. Mikityuk, et al. // *Acta Naturae*. 2018. Vol. 10. No. 2. P. 79–92.
 16. Грибы рода *Fusarium* на клубнях картофеля / А. Ф. Белосохов, М. М. Ярмеева, А. М. Долгов и др. // *Современная микология в России*. 2022. Т. 9. С. 250–252.
 17. First report of *Fusarium commune* causing root rot of soybean seedlings in Indiana / C. Detranaltes, M. Saldanha, S. Scofield, et al. // *Plant Disease*. 2022. Vol. 106. Article 3216. URL : <https://apsjournals.apsnet.org/doi/10.1094/PDIS-04-22-0870-PDN> (дата обращения : 22.03.2023).
 18. Choi H.-W., Kim S., Hong S. K. Diversity and pathogenic characteristics of *Fusarium* species isolated from wilted soybeans in Korea // *The Korean Journal of Mycology*. 2020. Vol. 48. P. 297–312.
 19. First report of *Fusarium proliferatum* causing root rot in soybean (*Glycine max* L.) in Canada / K. F. Chang, S. F. Hwang, R. L. Conner, et al. // *Crop Protection*. 2015. Vol. 67. P. 52–58.
 20. Early physiological responses of *Arabidopsis thaliana* cells to fusaric acid : toxic and signaling effects / B. Bouizgarne, H. El-Maarouf-Bouteau, C. Frankart, et al. // *New Phytologist*. 2006. Vol. 169. P. 209–218.
 21. Hartman G. L., Huang Y. H., Li S. Phytotoxicity of *Fusarium solani* culture filtrates from soybeans and other hosts assayed by stem cuttings // *Australasian Plant Pathology*. 2004. Vol. 33. P. 9–15.
 22. Identification of multiple phytotoxins produced by *Fusarium virguliforme* including a phytotoxic effector (FvNISI) associated with sudden death syndrome foliar symptoms / H. X. Chang, L. L. Domier, O. Radwan, et al. // *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 2016. Vol. 29. No. 2. P. 96–108.
 23. Hartman G. L., Chang H.-X., Leandro L. F. Research advances and management of soybean sudden death syndrome // *Crop Protection*. 2015. Vol. 73. P. 60–66.

Поступила в редакцию 10.02.2023

После доработки 22.03.2023

Принята к публикации 18.04.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ МЕХАНИЗМОВ СВЯЗЫВАНИЯ ГЕРБИЦИДОВ С БЕЛКАМИ-МИШЕНЯМИ СОРНЫХ РАСТЕНИЙ МЕТОДАМИ *IN SILICO**

И.Э. Памирский¹, кандидат биологических наук, П.Д. Тимкин², Э.А. Тимофеев³, Д.Д. Котельников³, Л.Н. Алексейко⁴, доктор химических наук, С.В. Климович⁴, Е.А. Бородин³, доктор медицинских наук, К.С. Голохваст¹, доктор биологических наук

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий
Российской академии наук,
630501, Новосибирская обл., пос. Краснообск, ул. Центральная, 2б
E-mail: parimski@mail.ru

²Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт сои»,
675027, Амурская область, Благовещенск, ул. Игнатьевское шоссе, 19

³Амурская государственная медицинская академия,
675009, Амурская область, Благовещенск, ул. Горького, 95

⁴Гомельский государственный медицинский университет,
246000, Республика Беларусь, Гомель, ул. Ланге, 5

Исследования проводили с целью изучения молекулярных механизмов связывания гербицидов (пиноксаден, квизалофоп-*P*-тефурил, прометрин, метрибузин, метсульфурон-метил) с белками-мишенями (ацетил-КоА-карбоксилаза, ацетолактат-синтаза, цитохром P450, 4-гидроксифенилпируват диоксигеназа) сорных трав, произрастающих в Сибири: овсюг обыкновенный (*Avena fatua* L.), пырей ползучий (*Elymus repens* (L.) Gould), щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus* L.), марь белая (*Chenopodium album* L.), щетинник зеленый (*Setaria viridis* (L.) P. Beauv). Работу выполняли в Новосибирской области в 2022–2023 гг. С использованием биоинформационных методов были созданы виртуальные трехмерные комплексы пестицидов и их мишеней. Предложен новый подход к выявлению параметров полости сайтов связывания, который заключается в совмещении метода выравнивания и технологии машинного обучения. Проведена стыковка пестицидов с мишенями. Расчет энергии связывания указывает на высокую степень устойчивости комплексов лиганд-белок. Предложенный подход *in silico* может быть полезен для выяснения поведения гербицидов при связывании с ферментами сорняков. Подобный подход позволяет глубже понять механизм действия и экотоксикологические аспекты применения пестицидов. Исследованные комплексы гербицидов и белков обладают потенциальной высокой стабильностью ввиду низкой энергии связывания с рецепторами, которая варьирует от –5,60 до –13,24 ккал/моль. Величина энергии связывания не показала прямой зависимости от количества аминокислотных остатков лиганд-связывающего сайта. В целом исследование дополнило некоторые аспекты молекулярных механизмов связывания гербицидов с белками-мишенями сорных трав, однако требуется проведение более глубокого изучения с целью локализации критических аминокислотных точек, участвующих в биологических функциях белков-мишеней.

STUDY OF MOLECULAR MECHANISMS OF HERBICIDE BINDING TO TARGET PROTEINS OF WEEDS BY *IN SILICO* METHODS

I.E. Pamirsky¹, P.D. Timkin², E.A. Timofeev³, D.D. Kotelnikov³, L.N. Alexeyko⁴, S.V. Klimovich⁴, E.A. Borodin³, K.S. Golokhvast¹

¹Siberian Federal Research Center of Agricultural Biotechnology, Russian Academy of Sciences,
630501, Novosibirskaya obl., Novosibirskii r-n, pos. Krasnoobsk, ul. Tsentralnaya, 2b
E-mail: parimski@mail.ru

²Federal scientific center All-Russian research institute of soybean breeding,
675027, Amurskaya obl., Blagoveshchensk, Ignat'evskoe sh., 19

³Amur state medical academy,
675009, Amurskaya obl., Blagoveshchensk, ul. Gor'kogo, 95

⁴Gomel state medical university,
246000, Republic of Belarus, Gomel, ul. Lange, 5

The aim of this study was to study of the molecular mechanisms of herbicide binding (pinoxaden, quizalofop-*P*-tephuryl, prometryn, metribuzin, metsulfuron-methyl) to target proteins (acetyl-CoA carboxylase, acetolactate synthase, cytochrome P450, *p*-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase) of the weed species growing in Siberia: wild oat *Avena fatua* (L.), wheatgrass *Elymus repens* (L.), amaranth *Amaranthus retroflexus* (L.), common lamb's quarters *Chenopodium album* (L.), bristlegrass *Setaria viridis* (L.). The work was carried out in the Novosibirsk region in 2022–2023. Using bioinformatic methods, virtual three-dimensional complexes of pesticides and their targets were created. A new approach has been proposed to identify the parameters of the cavity of binding sites, which consists in combining the alignment method and machine learning technology. Docking of pesticides with targets was carried out. The calculation of the binding energy indicates a high degree of stability of the ligand-protein complexes. The *in silico* approach we proposed may be useful for elucidating the behavior of herbicides when bound to weed enzymes. This approach allows a deeper understanding of the mechanism of action and ecotoxicological aspects of the use of pesticides. The studied complexes of herbicides and proteins have a potential high stability due to the low binding energy with receptors, which varies from –5.60 to –13.24 kcal/mol. The binding energy value did not show a direct dependence on the number of amino acid residues of the ligand-binding site. In general, the study supplemented some aspects of the molecular mechanisms of binding herbicides to target proteins of weeds, however, a more in-depth study is required in order to localize critical amino acid points involved in the biological functions of target proteins.

Ключевые слова: пестициды, гербициды, биоинформатика, лиганд, мишень, целевой фермент, овсюг, пырейник, щетинник, щирица, пиноксаден, квизалофоп-*P*-тефурил, прометрин, метрибузин, метсульфурон-метил.

Key words: pesticides, herbicides, bioinformatics, ligand, target, target enzyme, wild oat, wheatgrass, bristlegrass, amaranth, pinoxaden, quizalofop-*P*-tephuryl, prometryn, metribuzin, metsulfuron-methyl

* работа выполнена в соответствии с грантом № 220-2961-3099 в рамках Постановления Правительства России № 220.

Сорные растения выступают важным биологическим препятствием для выращивания культур по всему миру. Против них эффективно используют различные довсходовые и послевсходовые гербициды на основе химических соединений различных классов (фенилпирозолы, арилоксифеноксипропионаты, триазины и др.). Так, пиноксаден в дозе 20 г д.в./га в серии экспериментов независимо от фазы развития (3...4 или 6...7 листьев) полностью подавлял рост овсяга [1]. В опыте по изучению резистентности к гербицидам *Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv пиноксаден в дозировке 55 г/га при появлении на растениях трех-пяти язычковых листьев продемонстрировал на 30-й день после обработки контроль над всеми шестью биотипами ежовника в среднем на 99 %, что также выразилось в наименьшей сухой биомассе [2]. В тепличных условиях пиноксаден в дозах 10 г д.в./га и выше со смесью поверхностно-активных веществ (метиловый эфир жирных кислот, этоксилят спирта и нефтяные дистилляты) повреждал более 95 % растений *Setaria pumila* (Poir.) Roem. & Schult [3]. В посевах сои на различных типах почв метрибузин контролировал *Setaria spp.* от 5 % до 83 %, а его совместное применение с изоксафлутолом в низких и средних дозах приводило к синергетическому повышению эффективности контроля численности сорняка [4]. Значительно меньшая плотность *Chenopodium album* (L.) была зарегистрирована при послевсходовом применении сульфосульфурона в дозе 25 г/га с метсульфурон-метилом в дозе 4 г/га [5]. Метсульфурон-метил в дозе 4 г/га на 89,7 % обеспечивал подавление *C. album* (L.) на пшеничных полях [6]. В двухлетнем опыте послевсходовое применение метсульфурон-метила в дозе 3...4 г/га в сочетании с 0,2 % поверхностно-активного вещества снижало численность популяции (эффективность до 70 %) и общую сухую массу *C. album* (L.) на 45-й день [7]. Обработка метсульфурон-метилом в дозе 4 г/га в течение 3 недель обеспечила 71 % подавление растений *C. album* (L.), высаженных в горшечный грунт на основе торфа [8].

В то же время многие сорняки способны вырабатывать различные механизмы устойчивости к гербицидам. Например, по результатам дозозависимого эксперимента и анализа активности фермента ацетил-КоА-карбоксилазы (далее АСС), выявлена устойчивость к пиноксадену у биотипа овсяга из Чили (собиран в посевах озимой пшеницы в Темуко) [9]. Точечная мутация обнаружена в триплете аспарагиновой кислоты в положении аминокислоты 2078, что привело к триплету глицина. Также сообщалось, что целевой фермент АСС в устойчивых биотипах содержит нечувствительную к гербицидам форму.

Эксперименты в теплице с диким овсом по схеме доза-реакция (0, 6, 18, 60, 180 и 360 г д.в./га, обработка в фазе 4 листа) показали, что по сравнению со средними значениями для двух восприимчивых S-популяций популяции R3 и R4 (собираны с производственных полей ячменя) были в 7 раз более устойчивы к пиноксадену [10]. Авторы не обнаружили с использованием секвенирования ДНК и аллель-специфических ПЦР-анализов в растениях R точечные мутации сайта-мишени, которые придают устойчивость к ингибиторам ацетоллактатсинтазы (далее ALS) или АСС. Это позволило предположить участие механизма устойчивости, не выступающего сайтом-мишенью.

В условиях теплицы у пяти из шести популяций овсяга, собранных в севооборотах с преобладанием злаков, отмечена в 11...30 раз более высокая устойчивость к пиноксадену, по сравнению с восприимчивыми

популяциями [11]. В целом исследование показало, что недостаточное разнообразие выращиваемых в севообороте культур и повторное использование гербицидов с аналогичным механизмом действия приводят к отбору устойчивых форм *Avena fatua* (L.), количество которых в полевых популяциях увеличивается.

В теплице при обработке пиноксаденом (с 1 %-ным раствором адьюванта клоквиноцета) в дозе 30 г/га две из тридцати популяций *A. fatua* (L.), собранных с засоренных полей, продемонстрировали перекрестную устойчивость [12]. Единственная восприимчивая популяция полностью контролировалась пиноксаденом. Для того чтобы понять механизмы резистентности мутаций TSR и NTSR вследствие усиленного метаболизма ингибиторами цитохрома P450 (далее CYP450) с использованием пиноксадена, авторы провели исследования на двух резистентных популяциях af11 и af28, которые показали, что опрыскивание малатионом с пиноксаденом либо контролировало, либо подавляло обе популяции. Эти результаты подтверждают наличие механизмов TSR и/или NTSR.

В эксперименте на популяции AXXZ-2 (R, наличие мутации Ala-205-Val) и JLG Y-3 (S) пиноксаден наносили в определенных дозах и через две недели измеряли надземную массу в свежем виде [13]. Популяция AXXZ-2 оказалась в 15,1 раза более устойчивой. При этом в АСС 4 популяции AXXZ-2 была обнаружена нуклеотидная замена (GAT на GAG) в положении 2078, которая отвечает за мутацию Asp2078-Glu. Других аминокислотных замен, ответственных за устойчивость к ингибиторам АСС, не выявлено. Вычислительный анализ влияния мутации Asp-2078-Glu на аффинность связывания АСС с ингибиторами АСС подтвердил наличие устойчивости *E. crus-galli* (L.) P. Beauv к пиноксадену. Установлено, что гены АСС популяции AXXZ-2 при обработке пиноксаденом активировались в 2,7 раза сильнее, чем у JLG Y-3.

В другом исследовании показано, что популяция *E. crus-galli* (L.) P. Beauv, собранная с рисовых полей прямого посева, проявляла высокую устойчивость к ряду гербицидов [14]. В частности, по сравнению с популяцией S (восприимчивая), ее устойчивость к пиноксадену была выше в 6,4 раза. По результатам выравнивания после секвенирования сходство нуклеотидных последовательностей АСС 1 и АСС 6 превышало 99 %. В то же время ни в одном из шести транскриптов АСС популяции R не обнаружено известных мутационных сайтов, ответственных за устойчивость к гербицидам, что указывает на возможное участие механизмов NTSR.

Установлено, что через 28 дней после применения флуфенацета и метрибузина контроль *Setaria viridis* (L.) P. Beauv составлял 88...95 %, через 56 дней – на 80...92 %. При этом их использование в дозе менее 0,84 кг/га было недостаточным для получения стабильного контроля над сорняком на протяжении всего сезона. [15].

Развитие устойчивости может быть обусловлено неправильным подбором и использованием гербицидов, нарушением агротехники, а также способностью растений на генетическом уровне вырабатывать невосприимчивые формы целевых ферментов. Например, сообщается, что устойчивые к ингибитору АСС биотипы сорняков, скорее всего, разовьют перекрестную устойчивость к пиноксадену [3]. В то же время, отмечается, что растения с более чем двумя копиями генов целевого участка, как правило, не приобретают признак устойчивости к гербицидам, несмотря на наличие мутации устойчивости [13].

Разработка новых пестицидов и новых подходов в их

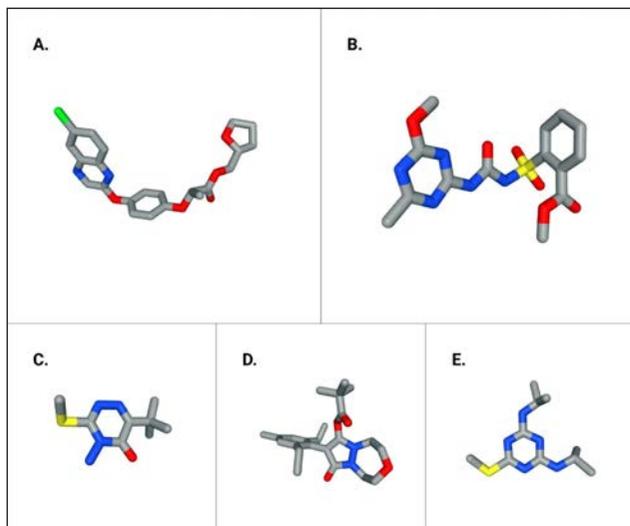


Рис. 1. Трехмерные виртуальные модели гербицидов: А – квизалофоп, В – метсульфурон, С – метрибузин, D – пиноксаден, Е – прометрин. Масштаб условный.

применении выступают важными задачами продовольственной безопасности. Очевидно, что традиционный метод случайного отбора при создании нового пестицида не может соответствовать требованиям современной эпохи, что делает еще более важным постоянное изучение достижений в смежных областях [16]. Благодаря геномике, протеомике, технологиям биоинформатики и биохимии идентифицировано множество структур потенциальных молекулярных мишеней для высокоактивных пестицидов [17]. Набирают популярность методы структурно-ориентированного молекулярного дизайна и оптимизации при разработке и изучении механизмов действия пестицидов.

Цель исследований – выявление молекулярных механизмов связывания гербицидов с белками-мишенями сорных трав, произрастающих в Сибири.

Методика. Работу выполняли в 2022–2023 гг. Изучали следующие 5 гербицидов: пиноксаден (pinoxaden), квизалофоп-Р-тефурил (quizalofop-P-tefuryl), прометрин (prometryn), метрибузин (metribuzin), метсульфурон-метил (metsulfuron-methyl). Выбор был сделан на основе информации из опытно-производственных хозяйств Новосибирской области, где препараты на основе перечисленных действующих веществ применяют для борьбы с сорными травами в основном при выращивании картофеля и злаковых культур.

Все они представляют собой довсходовые и послевсходовые синтетические гербициды, разработанные для борьбы с однолетними злаковыми и широколистными сорняками на различных сельскохозяйственных культурах. Пиноксаден это фенилпирозольный гербицид, ингибитор АСС и синтеза жирных кислот. Квизалофоп-Р-тефурил относится к группе арилоксифеноксипропионатов, ингибитор АСС. Прометрин, метрибузин и метсульфурон-метил это триазины и их производные, фотосинтетические ингибиторы транспорта электронов на участке рецептора фотосистемы II.

Наибольшие проблемы для сельского хозяйства региона создают следующие сорные виды: ежовник обыкновенный (*E. crus-galli* (L.) P. Beauv), овсюг (*A. fatua* L.), щетинник сизый (*S. Pumila*), щетинник зеленый (*S. viridis* (L.) P. Beauv), пырей ползучий (*Elymus repens* (L.) Gould), щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus* L.), пикульник обыкновенный (*Galeopsis tetrahit* L.), марь белая (*C. album* L.), горец вьюнковый

(*Fallopia convolvulus* (L.) Á. Löve). Для изучения отобраны виды, для которых белки были наиболее аннотированы в специализированных базах данных.

Данные об известных и потенциальных мишенях пестицидов брали из научной литературы и баз данных Pesticide Target Interaction Database [18] и Pesticide Properties DataBase [19]. В научной литературе представлено мало информации о мишенях исследуемых гербицидов. Сведения о структурно-функциональном устройстве белков были взяты из базы данных UniProtKB (<https://www.uniprot.org/>). В базе осуществляли поиск структур ACC (EC 6.4.1.2) для *E. repens* и *A. fatua* (L.), ALS (EC 2.2.1.6) для *A. fatua* (L.), *A. retroflexus* (L.) и *C. album* (L.), CYP450 и 4-гидроксифенилпируват диоксигеназы (HPPD, EC 2.2.1.6) для *S. viridis* (L.) P. Beauv (табл. 1).

Моделирование образования комплексов белок-гербицид требует знания примерного расположения полости лиганд-связывающего сайта белков-мишеней. Для их поиска вначале были смоделированы виртуальные модели пиноксадена, квизалофоп-Р-тефурила, прометрина, метрибузина и метсульфурон-метила (рис. 1).

Далее для осуществления докинга лигандов с их непосредственными мишенями была разработана авторская методика прогнозирования лиганд-связывающих сайтов белков-мишеней, совмещающая в себе предсказание их полостей алгоритмом P2Rank (PrankWeb) и последующую валидацию этих результатов BLAST-выравниванием референсных белков с аннотирован-

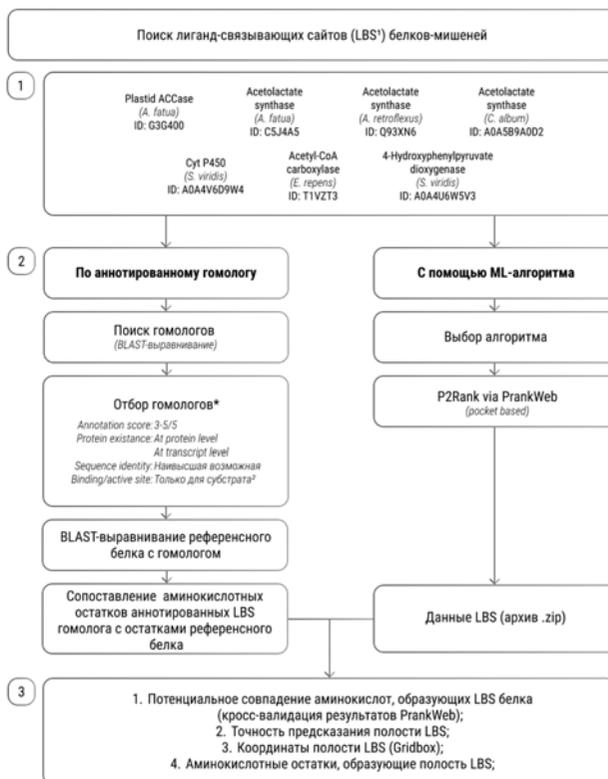


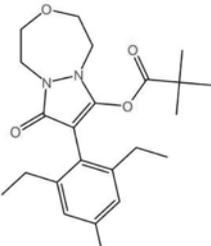
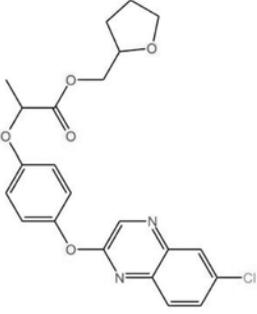
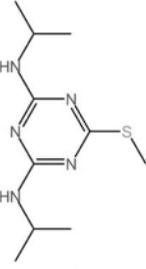
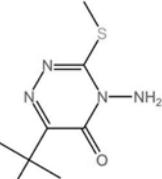
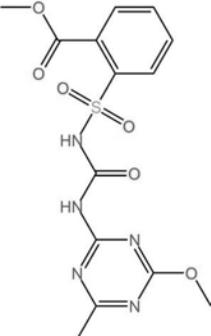
Рис. 2. Общая схема алгоритма поиска лиганд-связывающих сайтов белков-мишеней (*представленные общие критерии отбора гомологичных белков в отдельных случаях корректировались за исключением гомологов, отвечающих требованиям; 1 – от англ. – ligand-binding site; 2 – сайты, связывающие ионы и кофакторы не учитывались, за исключением отдельных случаев).

ными гомологичными структурами. Эта методика (рис. 2) позволяет оптимизировать вычисления и повысить точность результатов прогнозирования.

Метод аннотированных гомологов (см. рис. 2, слева) основан на подборе более аннотированной гомологичной структуры с использованием BLAST-выравнивания по аминокислотной последовательности белков (выполнено на ресурсе UniProtKB). Сначала проводили глобальное выравнивание для поиска пула гомологичных структур, а затем из них отбирали белки по нескольким критериям: значение очков аннотации (annotation score) – в пределах 3–5/5; наличие белка (protein existence) – подтверждается на уровне протеома/транскриптома; идентичность после-

довательности (sequence identity) – наивысшая из предложенных (при удовлетворении остальных критериев); наличие связывающих сайтов (binding site) субстрата (ионные и ко-факторные LBS не учитывали). В некоторых случаях гомологи, удовлетворяющие перечисленным параметрам, найти не удалось, поэтому критерии корректировали в соответствии с имеющимися структурами. Так, для гомолога ID B9FK36 был скорректирован только параметр «protein existence» на «inferred from homology». Для гомолога ID Q6K2E8 скорректирован критерий отбора LBS (взяты сайты, которые связывают тиаминдифосфат и флавинамидаденин динуклеотидфосфат). Гомолог ID P17597 был выбран в связи с тем, что в аннотации

Табл.1. Мишени гербицидов

Гербицид, группа веществ	Формула	Мишень	Выбранный вид сорняка
Пиноксаден, фенилпиразолы		ACC [20], ALS [21]	овсюг <i>A. fatua</i> (L.)
Квизалофоп-П-тефурил, арилоксифеноксипропионаты		ACC [22]	пырей ползучий <i>E. repens</i> (L.) Gould
Прометрин, триазины		CYP450 [23]	щетинник зеленый <i>S. viridis</i> (L.) P. Beauv
Метрибузин, триазины		HPPD [24]	щетинник зеленый <i>S. viridis</i> (L.) P. Beauv
Метсульфурон-метил, производное сульфонилмочевины		ALS [25]	щирца запрокинутая <i>A. retroflexus</i> (L.), марь белая <i>C. album</i> (L.)

лиганд-связывающих сайтов кроме непосредственных субстратов имелось описание успешного взаимодействия этих сайтов с другими ингибиторами (имидазолиномом и сульфанилмочевинной).

Следующим этапом было локальное выравнивание и сопоставление аминокислот, аннотированных в качестве лиганд-связывающих сайтов, у гомологов и референсных структур. В случае если аннотированные гомологи белков отсутствовали, использовали только данные ML-алгоритма (машинное обучение, с англ. machine learning), так как использование случайного гомолога выдает малоинформативный результат при выравнивании по первичной структуре.

Метод ML-алгоритма для поиска лиганд-связывающего сайта основан на использовании web-сервера PrankWeb [26]. Он был выбран на основании нескольких критериев: высокоинформативный результат прогнозирования, открытый доступ к ресурсу, удобный интерфейс. Кроме того, авторы сервиса отмечают, что полостная модель поиска лиганд-связывающего сайта более эффективна (выдает больше верно определенных сайтов при сравнении с экспериментально установленными), в сравнении с аналогами, а также минимизирует прогнозирование случайных лиганд-связывающих аминокислотных остатков. Суть ML-алгоритма заключается в загрузке структуры референсного белка в pdb-формате и указании желаемой цепи. Выходной результат представляет собой архив с файлами, описывающими как числовые, так и графические данные. Среди полученных данных отбирали следующие параметры: ранг прогноза (отбирали наивысший); вероятность/точность прогноза (отбирали наивысшую); координаты центра молекулярной полости (Gridbox); аминокислоты, образующие эту молекулярную полость.

Применение двух разных методов определения лиганд-связывающих сайтов в рамках общей методологии основано на их взаимодополняющем характере. Аминокислотные остатки связывающего сайта, определенные методом гомологии, могут находиться в составе полости, спрогнозированной ML-алгоритмом, что в свою очередь служит дополнительным уточнением расположения лиганд-связывающего сайта.

На основе результатов поиска вычисляли координаты молекулярной полости потенциального связывающего сайта (Gridbox) для последующей стыковки.

Поскольку перед началом исследования невозможно было определить с какими аминокислотными остатками белка-мишени должен связаться лиганд, для моделирования химического взаимодействия и проверки аффинности потенциальных лигандов к выбранным мишеням выбран метод жесткого межмолекулярного слепого докинга. Для его реализации использовали специальные автономные программы AutoDock и MGLtools [27]. MGLtools (версия 1.5.6) представляет собой графический интерфейс, облегчающий работу с AutoDock (версия 4.2).

На первом этапе белок-мишень загружали в рабочее поле MGLtools, удаляли остаточную воду и добавляли протон к аминокислотным остаткам в местах потенциальной связи с лигандами. На втором этапе добавляли лиганд и накладывали сетку (Gridbox) для указания области докинга. После указания координат сетки запускали процесс наложения сетки – в autogrid. Результатом наложения служила информация о структуре белка-мишени с указанием области стыковки. Третий этап заключался в проведении самого докинга. Для этого указывали мишень и лиганд, затем устанавливали количество попыток стыковки в указанной области (5 попыток для каждой области). По результатам докинга

создался файл в dlg-формате с подробной информацией об образованных комплексах (координаты расположения комплекса, энергия связывания, среднеквадратичное отклонение атомов и др.).

Все полученные комплексы были сконструированы с использованием программного обеспечения для визуализации PyMol версии 2.5.4 [28], после чего импортированы и визуализированы в двухмерные и трехмерные изображения с использованием Discovery Studio Visualizer (версия v21.1.0.20298) [29].

Результаты и обсуждение. В ходе определения лиганд-связывающих сайтов были получены результаты двух категорий (табл. 2). К первой из них относятся координаты центра Gridbox, который представляет собой своеобразную полость в форме параллелепипеда, очерчивающую лиганд-связывающие сайты белков.

Ко второй категории относятся аминокислотные остатки, образующие полости лиганд-связывающих сайтов, которые перекрываются как по методу гомологии, так и с использованием ML-алгоритма. Перекрытие аминокислотных остатков было выявлено у 4 из 7 белков (около 57 %). Это связано с хорошей аннотацией гомологичных структур, а также с наличием относительно точных моделей белков в базе данных UniProtKB. Для трех белков установлено по одной перекрывающейся аминокислоте, для одного белка – две аминокислоты. Отрицательные результаты перекрытия для двух других белков в основном связаны с отсутствием аннотации сайтов связывания у гомологичных структур либо с отсутствием каких-либо гомологов в базе данных. Учитывая, что для двух белков аннотированных гомологов не найдено, результаты в целом подтверждают объективность и результативность разработанного подхода для биоинформатики.

Табл. 2. Результаты определения лиганд-связывающих сайтов белков-мишеней

Референсный белок, ID UniProtKB, вид сорняка	ID UniProtKB гомолога	Координаты центра полости лиганд-связывающего сайта (Gridbox)			Перекрывающиеся аминокислоты (Ам*, номер)
		x_cent	y_cent	z_cent	
ACC ID: G3G400 <i>A. fatua</i> (L.)	ID: B9FK36	10.759	-17.808	-6.127	—
ALS ID: C5J4A5 <i>A. fatua</i> (L.)	ID: Q6K2E8	-4.595	0.530	11.679	R,148
ACC ID: T1VZT3 <i>E. repens</i> (L.) Gould	ID: Q38970	-4.860	-4.956	-9.717	R,89
CYP450 ID: A0A4V6D9W4 <i>S. viridis</i>	отсутствует**	3.797	-0.702	-4.594	—
HPPD ID: A0A4U6W5V3 <i>S. viridis</i> (L.) P.Beauv	отсутствует**	-12.448	6.496	22.544	—
ALS ID: Q93XN6 <i>A. retroflexus</i> (L.)	ID: P17597	1.162	7.183	9.926	R,241
ALS ID: A0A5B9A0D2 <i>C. album</i> (L.)	ID: P17597	-12.354	5.431	1.396	D,373 W,570

*аминокислота референсного белка в формате fasta;
**аннотированный гомолог отсутствует (координаты x, y, z были спрогнозированы ML-алгоритмом).

Для каждого белка посредством PrankWeb было описано несколько молекулярных полостей (табл. 3), в том числе для ацетил-КоА карбоксилазы *A. fatua* (L.) – 5 полостей, *E. Repens* (L.) Gould – 3; ацетолактат синтаз *A. fatua* (L.) – 4, *A. retroflexus* (L.) – 3, *C. Album* (L.) – 3; цитохрома P450 – 5; 4-гидроксифенилпируват диоксигеназы – 5 полостей. Для докинга отобрали полости с максимальной точностью прогноза.

Точность прогнозирования лиганд-связывающих сайтов составила 4,6...99,3 %, а количество аминокислотных остатков сайта равно 10...60. Для 4 из 7 мишеней точность превысила 38,8 %, что служит удовлетворительным результатом в рамках биоинформатических исследований. Наибольшее количество очков результата оценки и точность прогноза отмечены для CYP450 (ID A0A4V6D9W4, *S. viridis* (L.) P. Beauv), у которого ранее не обнаружили аннотированного гомолога. Более точное прогнозирование полости у CYP450 предположительно связано с консервативностью третичной структуры всего семейства цитохромов в результате чего алгоритму было проще решить задачу классификации. Кроме того, у исследуемого цитохрома полость находится в глубине молекулы, а доступ к ней возможен через канал.

Табл. 3. Характеристики полостей лиганд-связывающих сайтов, спрогнозированных ML-алгоритмом

Мишень, ID UniProtKB, вид сорняка	Ранг полости	Очки результата оценки (score function result)	Точность прогноза, %	Количество аминокислотных остатков полости сайта связывания (aminoacid position)
ACC ID: G3G400 <i>A. fatua</i> (L.)	1	2.08	4,6	10
ALS ID: C5J4A5 <i>A. fatua</i> (L.)	1	5.23	25,5	20
ACC ID: T1VZT3 <i>E. repens</i> (L.) Gould	1	8.30	48,8	12
CYP450 ID: A0A4V6D9W4 <i>S. viridis</i> (L.) P. Beauv	1	78.36	99,3	60
HPPD ID: A0A4U6W5V3 <i>S. viridis</i> (L.) P. Beauv	1	17.31	79,8	17
ALS ID: Q93XN6 <i>A. retroflexus</i> (L.)	1	6.89	38,8	18
ALS ID: A0A5B9A0D2 <i>C. album</i> (L.)	2	3.85	15,8	16

На основании спрогнозированных молекулярных карманов, было проведено моделирование межмолекулярных взаимодействий (табл. 4), в результате которого были получены комплексы лиганд-рецептор.

Моделирование показало, что минимальная энергия связывания варьирует от –5,60 до –13,24 ккал/моль. Такие значения указывают на высокую стабильность всех смоделированных комплексов гербицид-фермент. Это можно объяснить положением лиганда в относительно полипептидной цепи мишени и нулевым значением среднеквадратичного отклонения атомов лиганда.

Табл. 4. Результаты межмолекулярного взаимодействия

Рецептор, ID UniProtKB, вид сорняка	Лиганд	Ранг конформации	Минимальная энергия связывания (ккал/моль)
ACC ID: G3G400 <i>A. fatua</i> (L.)	пиноксаден	1	-7,81
ALS ID: C5J4A5 <i>A. fatua</i> (L.)		2	-7,40
		3	-7,01
ALS ID: C5J4A5 <i>A. fatua</i> (L.)		1	-9,83
		2	-9,43
		3	-8,78
ACC ID: T1VZT3 <i>E. repens</i> (L.) Gould	квизалофоп-П-тефурил	1	-7,30
		2	-6,09
CYP450 ID: A0A4V6D9W4 <i>S. viridis</i> (L.) P. Beauv	прометрин	1	-6,31
HPPD ID: T1VZT3 <i>S. viridis</i> (L.) P. Beauv	метрибузин	1	-7,68
ALS ID: Q93XN6 <i>A. retroflexus</i> (L.)	метсульфурон-метил	1	-13,24
ALS ID: A0A5B9A0D2 <i>C. album</i> (L.)		2	-12,27
		2	-10,45
		3	-9,85
		4	-9,73

Результаты расчета молекулярного взаимодействия показали, что фермент карбоксилаза подавляют разные гербициды, что можно объяснить особенностями конформации. Ранее было отмечено, что конформация аминокислотных остатков, как близких, так и удаленных от сайта связывания гербицидов, адаптируется для связывания различных химических классов таких соединений [30].

Предположительно прометрин, метрибузин и метсульфурон-метил, разработанные в качестве фотосинтетических ингибиторов транспорта электронов на участке рецептора фотосистемы II, способны также выражено подавлять активность таких ферментов, как CYP450, HPPD, ALS. В частности, схожие результаты получены по взаимодействию метсульфурон-метила и дрожевой ALS (считается высококачественной моделью растительного фермента). При исследовании этого кристаллического комплекса показано, что ароматическое кольцо способно к небольшому перемещению из стороны в сторону, но мостик из сульфонилмочевины плотно прилегает к окружающему карману мишени [31].

Согласно расчетам докинга, смоделированные комплексы обладают высокой потенциальной стабильностью, которая обусловлена такими взаимодействиями, как силы Ван-дер-Ваальса, водородные и гидрофобные связи

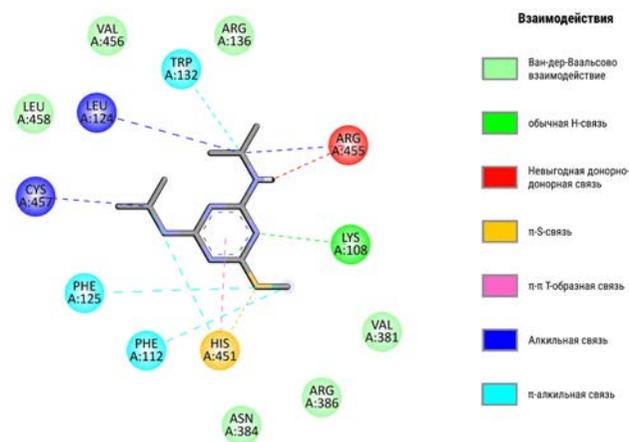


Рис. 3. Пример двухмерной визуализации комплекса прометрин-СYP450.

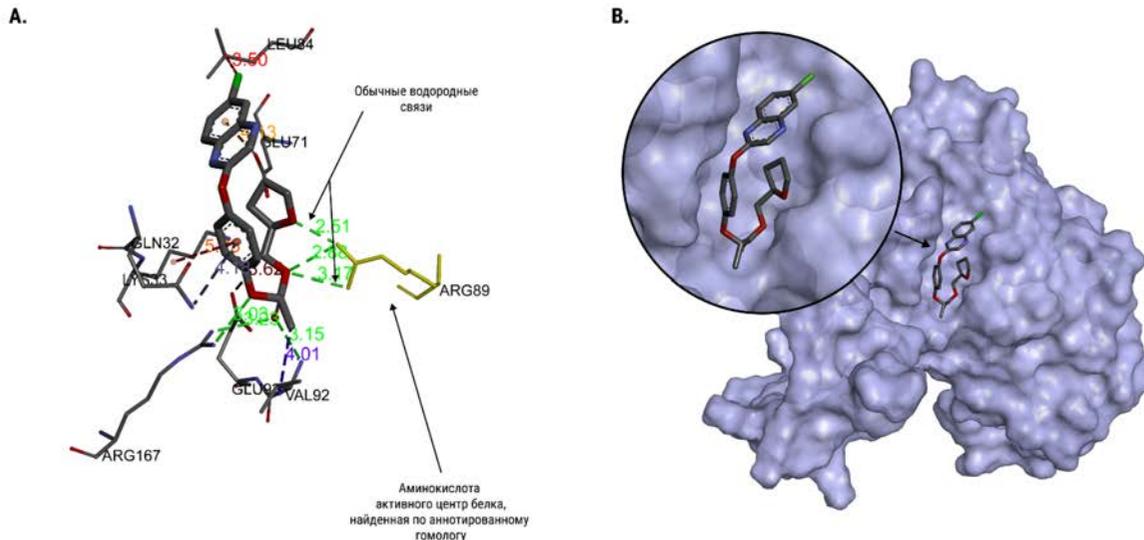


Рис. 4. Пример визуализации комплекса АСС и исоафлутол-*П*-тефурил в трехмерном пространстве: А – лиганд и аминокислотные остатки (ARG89 и др.) белка-мишени, участвующие в связывании (цифрами показана длина связи в ангстремах), В – общий вид комплекса с отображением общей молекулярной поверхности белка-мишени.

(рис. 3 и 4). Это косвенно подтверждает сильный ингибирующий эффект исследуемых гербицидов и согласуется с экспериментальными данными из литературы. Гербициды показали потенциал ингибирования ферментов в основном благодаря образованию прочных взаимодействий между боковыми цепями аминокислот. Полученные результаты можно считать относительно объективными, поэтому их могут использовать и другие исследователи в своих биоинформатических экспериментах.

Выводы. Предложенный подход выявления параметров полости сайтов связывания *in silico*, который заключается в совмещении метода выравнивания и технологии машинного обучения, можно использовать для выяснения поведения гербицидов при связывании с ферментами сорняков с точностью прогноза до 99,3 %.

Исследованные комплексы гербицидов и белков обладают потенциальной высокой стабильностью ввиду низкой энергии связывания с рецепторами, которая варьирует от $-5,60$ до $-13,24$ ккал/моль. Величина энергии связывания не показала прямой зависимости от количества аминокислотных остатков лиганд-связывающего сайта.

В целом исследование дополнило некоторые аспекты молекулярных механизмов связывания гербицидов с белками-мишенями сорных трав, однако требуется проведение более глубокого изучения с целью локализации критических аминокислотных точек, участвующих в биологических функциях белков-мишеней.

Литература

1. Chauhan B. S. The world's first glyphosate-resistant case of *Avena fatua* L. and *Avena sterilis* ssp. *ludoviciana* (Durieu) Gillet & Magne and alternative herbicide options for their control // PLOS ONE. 2022. Vol. 17. No. 1. P. 1–10. URL : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0262494> (дата обращения : 10.01.2023). doi : 10.1371/journal.pone.0262494.
2. Biological efficacy of the inhibitor herbicides of acetyl coenzyme a carboxylase and acetolactate synthase and the presence of resistance in *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv / J. Bolaños-Jiménez, E. Uscanga-Mortera, J. Antonio Tafoya-Razo, et al. // Agrociencia. 2018. Vol. 52. No. 5. P. 713–723.
3. Peppers J., Gonçalves C., McElroy J. Rate response of select grass weeds to pinoxaden // Weed Technology.

2020. Vol. 34. No. 6. P. 818–823. doi : 10.1017/wet.2020.65.
4. Isoxaflutole and metribuzin interactions in isoxaflutole-resistant soybean / A. Smith, N. Soltani, A. Kaastra, et al. // Weed Science. 2019. Vol. 67. No. 5. P. 485–496. doi : 10.1017/wsc.2019.25.
5. Effect of irrigation, pre and post-emergence herbicides on *Chenopodium album* in wheat (*Triticum aestivum* L.) / K. Lakra, P.K Kumar., K. Husain, et al. // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 2021. Vol. 10. No. 1. P. 2757–2760. doi : 10.22271/phyto.2021.v10.i1am.13773.
6. Tewari A. N., Rathi K. S., Singh B. Efficacy of metsulfuron methyl on associated weeds in wheat (*Triticum aestivum*) // Indian Journal of Agricultural Sciences. 1998. Vol. 68. No. 2. P. 121–122.
7. Effect of metsulfuron-methyl against broad leaf weeds in wheat (*Triticum aestivum* L. emend. Fiori and Paol.) / R. K. Singh, S. K. Verma, S. K. Prasad, et al. // Journal Crop and Weed. 2015. Vol. 11 (Special Issue). P. 161–166.
8. Bio-ionic Liquids as Adjuvants for Sulfonylurea Herbicides / K. Marcinkowska, T. Praczyk, B. Łęgosz, et al. // Weed Science. 2018. Vol. 66. No. 3. P. 404–414. doi : 10.1017/wsc.2017.85.
9. Mechanism of resistance to ACCase-inhibiting herbicides in wild oat (*Avena fatua*) from Latin America / H. Cruz-Hipolito, M. D. Osuna, J. A. Dominguez-Valenzuela, et al. // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2011. Vol. 59. No. 13. P. 7261–7267. doi : 10.1021/jf201074k.
10. Characterisation of *Avena fatua* populations with resistance to multiple herbicides / B. K. Keith, E. A. Lehnhoff, E. E. Burns, et al. // European Weed Research Society. 2015. Vol. 55. No. 6. P. 621–630. doi : 10.1111/wre.12172.
11. First report on assessing the severity of herbicide resistance to ACCase inhibitors pinoxaden, propaquizafop and cycloxydim in six *Avena fatua* populations in Ireland / V. B. Alwarnaidu Vijayarajan, P. D. Forristal, S. K. Cook, et al. // Agronomy. 2020. Vol. 10. No. 9. P. 1–13. URL : <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/9/1362> (дата обращения : 10.01.2023). doi : 10.3390/agronomy10091362.
12. The occurrence of herbicide-resistant *Avena fatua* (wild oats) populations to ACCase-inhibiting herbicides in Ireland / R. Byrne, A. V. Vijaya Bhaskar, J. Spink, et al.

- // *Irish Journal of Agricultural and Food Research*. 2021. Vol. 60. No. 1. P. 59–64. doi :10.15212/ijafir-2020-0127.
13. A novel mutation Asp-2078-Glu in ACCase confers resistance to ACCase herbicides in barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) / J. Fang, Z. He, T. Liu, et al. // *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 2020. Vol. 168. No 104634. P. 1–8. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048357520301292> (дата обращения : 10.01.2023). doi : 10.1016/j.pestbp.2020.104634.
 14. Metabolic Resistance to Acetyl-CoA Carboxylase-Inhibiting Herbicide Cyhalofop-Butyl in a Chinese *Echinochloa crus-galli* Population / Q. Yang, X. Yang, J. Zhu, et al. // *Agronomy*. 2022. Vol. 12. No. 2724. P. 1–9. URL : <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/11/2724> (дата обращения : 10.01.2023). doi : 10.3390/agronomy12112724.
 15. Effects of pre-emergence applications of flufenacet plus metribuzin on weeds and soybean (*Glycine max*) / N. Soltani, B. Deen, S. Bowley, et al. // *Crop Protection*. 2005. Vol. 24. No. 6. P. 507–511. doi : 10.1016/j.cropro.2004.09.018.
 16. Zhao W., Huang Y., Hao G. Pesticide informatics expands the opportunity for structure-based molecular design and optimization // *Advanced Agrochem*. 2022. Vol. 1. No. 2. P. 139–147. doi : 10.1016/j.aac.2022.11.006.
 17. Review on Structures of Pesticide Targets / X. Li, X. Yang, X. Zheng, et al. // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21. No. 19. P. 1–6. URL : <https://www.mdpi.com/1422-0067/21/19/7144> (дата обращения : 10.01.2023). doi : 10.3390/ijms21197144.
 18. PTID : an integrated web resource and computational tool for agrochemical discovery / Gong J., Liu X., Cao X., et al. // *Bioinformatics*. 2013. Vol. 29. No 2. P. 292–294. doi : 10.1093/bioinformatics/bts651.
 19. An international database for pesticide risk assessments and management / K. A. Lewis, J. Tzilivakis, D. Warner, et al. // *Human and Ecological Risk Assessment : An International Journal*. 2016. Vol. 22. No. 4. P. 1050–1064. doi : 10.1080/10807039.2015.1133242.
 20. Yu L. P., Kim Y. S., Tong L. Mechanism for the inhibition of the carboxyltransferase domain of acetyl-coenzyme A carboxylase by pinoxaden // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010. Vol. 21. No. 107. P. 22072–22077. doi : 10.1073/pnas.1012039107.
 21. Kuk Y. I., Bugos N. R. Cross-resistance profile of mesosulfuron-methyl-resistant Italian ryegrass in the southern United States // *Pest Management Science*. 2007. Vol. 63. No. 4. P. 349–357.
 22. Kinetics of the two forms of acetyl-CoA carboxylase from *Pisum sativum* / L. Dehaye, C. Alban, C. Job, et al. // *European Journal of Biochemistry*. 1994. Vol. 225. No 3. P. 1113–1123.
 23. Role of Cytochrome P450 enzymes in plant stress response / B. A. Pandian, R. Sathishraj, M. Djanaguiraman, et al. // *Antioxidants (Basel)*. 2020. Vol. 9. No. 5, P. 1–15. URL : <https://www.mdpi.com/2076-3921/9/5/454> (дата обращения : 10.01.2023). doi : 10.3390/antiox9050454.
 24. Activity of mesotrione on resistant weeds in maize / P. Sutton, C. Richards, L. Buren, et al. // *Pest Management Science*. 2002. Vol. 58. No. 9. P. 981–984. doi : 10.1002/ps.5.
 25. Expression of acetohydroxyacid synthase isozyme genes *ilvBN*, *ilvGM*, *ilvIH* and their resistance to AHAS-inhibitor herbicides / J. Shen, Y. Li, X. Huang, et al. // *Sheng Wu Gong Cheng Xue Bao*. 2009. Vol. 25. No. 7. P. 1007–1013.
 26. PrankWeb : a web server for ligand binding site prediction and visualization / L. Jendele, R. Krivak, P. Skoda, et al. // *Nucleic Acids Research*. 2019. Vol. 2. No. 47 (W1). P. 345–349. doi : 10.1093/nar/gkz424.
 27. Autodock4 and AutoDockTools4 : automated docking with selective receptor flexibility / G. M. Morris, R. Huey, W. Lindstrom, et al. // *Journal Computational Chemistry*. 2009. Vol. 30. No. 16. P. 2785–2791. doi : 10.1002/jcc.21256.
 28. Schrödinger L., DeLano W. PyMOL. 2020. URL : <http://www.pymol.org/pymol> (дата обращения : 01.12.2022).
 29. BIOVIA, Dassault Systèmes, Discovery Studio Visualizer. San Diego : Dassault Systèmes, 2020. URL : <https://discover.3ds.com/discovery-studio-visualizer-download> (дата обращения : 01.12.2022).
 30. Crystal structure of plant acetohydroxyacid synthase, the target for several commercial herbicides / M. D. Garcia, J.-G. Wang, T. Lonhienne, et al. // *FEBS Journal*. 2017. Vol. 284. P. 2037–2051. doi : 10.1111/febs.14102.
 31. Elucidating the specificity of binding of sulfonylurea herbicides to acetohydroxyacid synthase / J. A. McCourt, S. S. Pang, L. W. Guddat, et al. // *Biochemistry*. 2005. Vol. 44. No 7. P. 2330–2338. doi : 10.1021/bi047980a.

Поступила в редакцию 05.02.2023

После доработки 14.03.2023

Принята к публикации 11.04.2023

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ ГЕРБИЦИД АРИЗОН ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОСЕВОВ КУКУРУЗЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЫ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ*

А.П. Савва, кандидат биологических наук,
В.Д. Надыкта, академик РАН, доктор технических наук,
Т.Н. Тележенко, В.А. Суворова

*Федеральный научный центр биологической защиты растений,
350039, Краснодар, п/о 39
E-mail: savap53@mail.ru*

Исследования проводили с целью определения биологической и хозяйственной эффективности гербицида Аризон, МД (75 г/л мезотриона + 30 г/л никосульфурона + 3,5 г/л флорасулама). Работу выполняли в 2020–2021 гг. на посевах гибрида кукурузы Краснодарский 291 АМВ в Краснодарском крае. Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов: гербицид Аризон, МД в нормах 1,0 и 2,0 л/га, эталоны Элюмис, МД (2,0 л/га) и Октава, МД (1,0 л/га), без гербицидов (контроль). Обработку посевов осуществляли в фазе 3...5 листьев культуры. Почвенный покров опытных участков представлен черноземом выщелоченным. Норма расхода рабочей жидкости – 200 л/га. Исходная засоренность посевов кукурузы составляла в среднем 125 экз./м². Оценку эффективности препаратов проводили по снижению численности, массы сорняков и разнице урожая зерна культуры, в сравнении с вариантом без применения гербицидов. Все виды сорняков в эксперименте (амброзия польнолистная, дурнишник калифорнийский, щирица запрокинутая, бодяк щетинистый, щетинник сизый, ежовник обыкновенный) продемонстрировали высокую чувствительность к испытываемому препарату. В вариантах с внесением 1,0 и 2,0 л/га Аризон, МД отмечен 82...100 %-ный гербицидный эффект без негативного действия на культуру и достоверное сохранение урожайности зерна кукурузы на уровне 87,0 и 102,2 %. Гербицид Аризон, МД в норме 2 л/га по эффективности действия на злаковые сорняки был равноценен, а на двудольные сорные растения превосходил эталонные препараты.

DOMESTIC THREE-COMPONENT HERBICIDE ARIZONA FOR THE PROTECTION OF CORN CROPS IN THE CENTRAL ZONE OF THE KRASNODAR TERRITORY

A.P. Savva, V.D. Nadykta, T.N. Telezhenko, V.A. Suvorova

*Federal Scientific Center for Biological Plant Protection,
350039, Krasnodar, p/o 39
E-mail: savap53@mail.ru*

Field experiments were carried out to determine the biological and economic effectiveness of the herbicide Arizona, OD (75 g/l mesotrion + 30 g/l nicosulfuron + 3.5 g/l florasulam), on crops of the hybrid corn Krasnodar 291 AMV in Krasnodar Krai. The experiments were carried out on the experimental field of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center of Biological Plant Protection" in 2020–2021 in accordance with the guidelines for testing herbicides in agriculture. The soil cover of the experimental plots is leached chernozem. The flow rate of the working fluid is 200 l/ha. In the experiments, plots with an area of 25 m² were used with a four-fold repetition with a randomized arrangement. The scheme of the experiment assumed the use of the tested herbicide Arizona, OD in the norms of 1.0 and 2.0 l/ha, standards Elumis, OD (2.0 l/ha) and Octave, OD (1.0 l/ha), control (without herbicides). During the period of 3...5 leaves of the culture, herbicides were applied. The initial contamination of corn crops averaged 125 copies/m². The effectiveness of the drugs was evaluated by reducing the number, mass of weeds and the difference in the yield of grain crops in comparison with the option without the use of herbicides. The types of weeds in the experiments (ragweed sagebrush, california durnishnik, tilted schiritsa, bristly body, gray bristle, common hedgehog) demonstrated high sensitivity to the herbicide being tested. In the variants with the introduction of 1.0 and 2.0 l/ha of the drug Arizona, OD, an 82...100 % herbicidal effect was observed without a negative effect on the crop and a reliable preserved corn grain yield (87.0 and 102.2 %). The reference preparations for the effectiveness of cereals were at the level of the tested preparation (2.0 l/ha), but were inferior in effect to dicotyledonous weeds.

Ключевые слова: препарат, гербицид, сорная растительность, эффективность, кукуруза (*Zea mays* L.), урожайность.

Key words: drug, herbicide, weed vegetation, efficiency, corn (*Zea mays* L.), yield.

В Российской Федерации Краснодарский край занимает лидирующее место по посевным площадям и производству кукурузы (*Zea mays* L.). В 2022 г. культуру выращивали на площади 509,4 тыс. га, а ее средняя урожайность составила 6,17 т/га [1, 2].

Сорная растительность – постоянно присутствующий элемент полевых ценозов, оказывающий отрицательное влияние на формирование полноценного урожая. По степени негативного действия на продуктивность культуры, она занимает первое место среди других вредоносных факторов [3].

Начальный период вегетации кукурузы наиболее благоприятен для роста и развития сорной растительности. Сорняки, как дикие сородичи, в сравнении

с культурными растениями, более приспособлены к условиям окружающей среды. Они развиваются быстрее сельскохозяйственных растений и тем самым создают серьезную конкуренцию за потребление питательных веществ, почвенной влаги и энергии солнца [4]. Вследствие этого, возможные потери урожая зерна кукурузы могут достигать 50...70 % и более [5]. Кроме того, сорная растительность создает помехи в процессе ухода за посевами и при уборке урожая, а также служит резерватом для вредителей и болезней сельскохозяйственных культур [6]. В связи с этим, использование различных методов воздействия, в том числе химических, необходимо рассматривать как обязательный элемент ее подавления в системе севооборотов [7]. В последние годы

* исследования выполнены согласно Государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР по теме № FGRN-2022-0001.

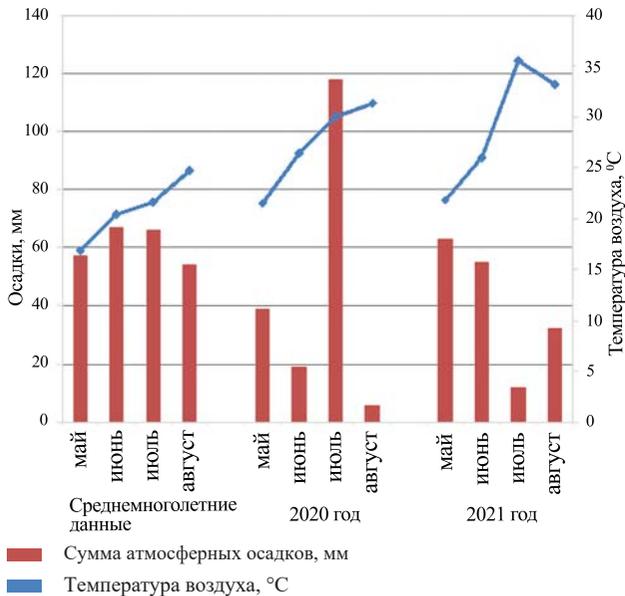


Рис. 1. Метеорологические условия вегетационных сезонов 2020–2021 гг.

доминирующим направлением борьбы с нежелательной растительностью выступает применение гербицидов на основе соединений различных химических классов [8]. Преимущество их использования, по сравнению с другими способами борьбы, заключается, прежде всего, в высокой биологической эффективности и окупаемости затрат [9].

На посевах кукурузы гербициды применяются в до-всходовый [10, 11] и послевсходовый периоды [12, 13]. Последний особенно перспективен, поскольку имеется возможность определить виды сорняков и их количество, что дает возможность выбрать наиболее эффективный препарат, а также использовать его с учетом критического периода вредоносности сорных растений в посевах культуры [14, 15].

На сегодняшний день зарегистрировано более 240 гербицидов для применения в посевах кукурузы [16]. Несмотря на представительный ассортимент, поиск и скрининг новых препаратов для эффективного подавления засорителей сельскохозяйственных культур, представляется актуальным и имеющим несомненную научную новизну и практическую значимость [17].

Необходимо отметить, что в последние годы особое внимание уделяется созданию гербицидов, содержащих несколько действующих веществ [18]. Они имеют ряд преимуществ перед однокомпонентными препаратами, к числу которых, прежде всего, относятся более широкий спектр действия, усиление гербицидного эффекта благодаря синергизму, предотвращение появления резистентности популяций сорных растений к гербицидам. Один из представителей такого класса препаратов, созданный в АО «ТПК Техноэкспорт» трехкомпонентный гербицид Аризон, МД для подавления сорной растительности в посевах кукурузы.

Цель исследований – определение биологической и хозяйственной эффективности гербицида Аризон, МД в посевах кукурузы в условиях Краснодарского края.

Для ее достижения решали следующие задачи: оценить действие препарата Аризон, МД на засоренность и отдельные виды сорной растительности посевов кукурузы в период вегетации; определить селективность нового препарата для растений культуры; провести сравнительную оценку эффективности гербицида Аризон, МД с эталонными препаратами.

Методика. Биологическую и хозяйственную оценку гербицидной активности препарата Аризон, МД на посевах гибрида кукурузы Краснодарский 291 АМВ осуществляли на протяжении 2020–2021 гг. на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр биологической защиты растений» (г. Краснодар).

Температурный режим равнинной части Краснодарского края – умеренно-континентальный. На протяжении года отмечаются резкие изменения месячных и сезонных температур воздуха. Так, в январе величина этого показателя составляет $-3...-5$ °С, в июле $+22...+24$ °С. Сумма атмосферных осадков за год варьирует в интервале от 400 до 600 мм (рис. 1). Температура воздуха в мае–августе 2020 г. превышала среднемноголетние значения на $4,8...8,7$ °С. Сумма атмосферных осадков в мае и июне была ниже нормы соответственно в 1,5 и 3,5 раза. За июль выпало около двух месячных норм. В августе отмечали дефицит влаги.

Температурный режим воздуха в мае и июне 2021 г. был выше нормы в среднем на 5 °С, в июле и августе – на 11 °С. Количество осадков в период май–август находилось на уровне среднемноголетних за исключением июля, когда их выпало в 5 раз меньше нормы.

Почвенный покров экспериментальных полевых участков – чернозем выщелоченный, легкоглинистого гранулометрического состава с содержанием гумуса в верхнем слое – 3,4 %. Реакция почвенного раствора близка к нейтральной ($pH_{\text{водн}} = 6,9$ ед). Содержание подвижного фосфора и калия по Мачигину – соответственно 179 и 304 мг/кг.

Технология выращивания кукурузы предусматривала послеуборочное дискование стерни предшественника (озимая пшеница) с последующей осенней вспашкой (на 25...27 см), в весенний период – боронование и предпосевную культивацию. Посев осуществляли сеялкой СУПН-8А во второй декаде апреля из расчета 60 тыс. семян/га.

Сорная растительность в посевах кукурузы была представлена бодяком щетинистым (*Cirsium setosum* (Willd. Bess.), щетинником сизым (*Setaria glauca* (L.) Beauv.), ежовником обыкновенным (*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.), щирицей запрокинутой (*Amaranthus retroflexus* L.), дурнишником калифорнийским (*Xanthium californicum* Greene), амброзией полыннолистной (*Ambrosia artemisiifolia* L.). В период обработки кукурузы сорные растения находились на начальных фазах развития, их количество варьировало от 10 до 35 экз./м² (табл. 1).

Посевы опрыскивали гербицидами Аризон, МД (75 г/л мезотриона + 30 г/л никосульфурона + 3,5 г/л флорасулама), Элюмис, МД (75 г/л мезотриона + 30 г/л никосульфурона) и Октава, МД (60 г/л никосульфурона + 3,6 г/л флорасулама). Два последних использовали в качестве эталонов.

Табл. 1. Фазы сорных растений в период обработки

Вид сорных растений	Фаза развития сорных растений	Количество, экз./м ²
Щетинник сизый	2...4 листа (начало кушения)	20
Ежовник обыкновенный	2...4 листа (начало кушения)	35
Амброзия полыннолиственная	2...3 пары настоящих листьев	15
Щирица запрокинутая	3...4 настоящих листьев	24
Дурнишник калифорнийский	3...5 настоящих листьев	10
Бодяк полевой	розетка (большая)	11

Табл. 2. Действие гербицида Аризон, МД на общую засоренность посевов кукурузы (среднее за 2020–2021 гг.)

Вариант	Номер учета	Количество сорных растений		Масса сорных растений					
		экз./м ²	снижение, % к контролю	г/м ²			снижение, % к контролю		
				ОЗС*	ОДС**	МДС***	ОЗС	ОДС	МДС
Аризон, МД – 1,0 л/га	2	13,6	87,3	50	33	45	88,0	94,7	84,3
	3	15,5	84,9	91	79	77	85,3	92,3	82,0
	4	17,8	82,0	-	-	-	-	-	-
Аризон, МД – 2,0 л/га	2	0	100	0	0	0	100	100	100
	3	0	100	0	0	0	100	100	100
	4	0	100	-	-	-	-	-	-
Элюмис, МД (эталон) – 2,0 л/га	2	5,4	95,0	0	70	51	100	88,2	82,2
	3	6,0	94,2	0	145	87	100	85,9	79,7
	4	6,8	93,1	-	-	-	-	-	-
Октава, МД (эталон) – 1,0 л/га	2	6,5	94,0	0	80	38	100	87,2	86,7
	3	7,2	93,0	0	156	69	100	84,8	83,9
	4	8,1	91,8	-	-	-	-	-	-
Без гербицидов (контроль)	2	107,5	-	416	625	286	-	-	-
	3	102,9	-	618	1026	428	-	-	-
	4	99,0	-	-	-	-	-	-	-

* – однолетние злаковые сорные растения; ** – однолетние двудольные сорные растения, *** – многолетние двудольные сорные растения.

Опыт закладывали в фазе 3...5 листьев кукурузы согласно предложенной производителем схеме: гербицид Аризон, МД в нормах 1,0 и 2,0 л/га, эталоны Октава, МД – 1,0 л/га, Элюмис, МД – 2,0 л/га, контроль – без гербицидов. Обработку посевов проводили опрыскивателем «PULVEREX». Расход рабочей жидкости – 200 л/га. Площадь делянок составляла 25 м² при четырехкратной повторности с рендомизированным расположением.

Закладку полевых опытов и проведение учетов выполняли согласно действующим методическим указаниям [19]. Биологическую и хозяйственную эффективность препаратов оценивали по степени снижения засоренности и урожайности культуры, в сравнении с вариантом без гербицидов (контроль). Полученные в опытах данные подвергали статистической обработке методом дисперсионного анализа с использованием Microsoft Office Excel.

Результаты и обсуждение. По данным второго учета засоренность в среднем за 2020–2021 гг. в контрольном варианте находилась на следующем уровне: ежовник обыкновенный – 33,4 экз./м²; щетинник сизый – 18,3 экз./м²; амброзия полыннолистная – 13,9 экз./м²; щирица запрокинутая – 22,3 экз./м²; дурнишник калифорнийский – 9,4 экз./м²; бодяк щетинистый – 10,2 экз./м². Общая численность сорняков в среднем была равна 107,5 экз./м², при этом сырая надземная вегетативная

масса однолетних злаковых видов составляла 416 г/м², однолетних и многолетних двудольных – 625 г/м² и 286 г/м² соответственно (табл. 2). Количество сорных растений через 45 дней после нанесения гербицидов практически не изменилось, а их биологическая масса увеличилась соответственно до 618, 1026 и 428 г/м². Испытываемый препарат Аризон, МД продемонстрировал высокую гербицидную эффективность против злаковых и двудольных сорных растений в течение двух лет (рис. 2). Биологическая эффективность испытываемого гербицида в норме 1,0 л/га составляла 82,0...87,3 %. При этом уменьшение сырой массы однолетних злаковых видов спустя 30 и 45 дней после опрыскивания составляло 85,3...88,0 %, однолетних и многолетних двудольных сорняков – 92,3...94,7 % и 82,0...84,3 %.

Применение 2,0 л/га гербицида Аризон, МД приводило к гибели сорной растительности в посевах кукурузы. Кроме того, благодаря комбинации мезотрион + никосульфурон + флорасулам, он имел преимущество в подавлении двудольных сорняков, в сравнении с эталонами, в состав которых входят только два действующих вещества: мезотрион + никосульфурон (Элюмис, МД); никосульфурон + флорасулам (Октава, МД). Это наглядно прослеживается по реакции растений амброзии полыннолистной и, в меньшей степени, дурнишника калифорнийского и бодяка щетинистого (табл. 3).

Табл. 3. Действие гербицида Аризон, МД на отдельные виды сорных растений в посевах кукурузы (среднее за 2020–2021 гг.)

Вариант	Номер учета	Снижение количества сорных растений, % к контролю					
		<i>Echinochoa crusgalli</i>	<i>Setaria pumila</i>	<i>Amaranthus retroflexus</i>	<i>Ambrosia artemisiifolia</i>	<i>Xanthium californicum</i>	<i>Cirsium setosum</i>
Аризон, МД – 1,0 л/га	2	84,1	84,2	94,2	89,2	92,6	81,4
	3	82,0	81,9	91,8	86,5	90,2	77,8
	4	79,3	79,0	89,1	82,9	86,8	75,5
Аризон, МД – 2,0 л/га	2	100	100	100	100	100	100
	3	100	100	100	100	100	100
	4	100	100	100	100	100	100
Элюмис, МД (эталон) – 2,0 л/га	2	100	100	100	79,1	96,8	78,4
	3	100	100	100	76,1	95,7	75,8
	4	100	100	100	72,0	94,5	72,5
Октава, МД (эталон) – 1,0 л/га	2	100	100	100	72,7	89,4	83,3
	3	100	100	100	70,1	81,5	80,8
	4	100	100	100	65,9	83,5	77,6
Без гербицидов (контроль)*	2	33,4	18,3	22,3	13,9	9,4	10,2
	3	31,8	17,7	20,9	13,4	9,2	9,9
	4	29,9	17,1	20,2	12,9	9,1	9,8

*в контрольном варианте представлено количество сорняков, экз./м².



Рис. 2. Эффективность гербицида Аризон, МД 30 день после обработки: а – контроль (без гербицидов); б – Аризон, МД (2,0 л/га).

Визуальные наблюдения показали, что воздействие гербицида Аризон, МД на сорняки проявлялось спустя 3...4 дня после его применения и выражалось в задержке роста и развития, осветлении точки роста и, в дальнейшем, всего растения с последующим отмиранием, которое отмечали на протяжении 2...3 недель после использования препарата в зависимости от развития сорняков и сложившихся метеорологических условий. Признаков фитотоксического действия гербицида на растениях кукурузы не наблюдали.

Применение 1,0 и 2,0 л/га гербицида Аризон, МД на посевах кукурузы в фазе 3...5 листьев позволило обеспечить достоверное сохранение 87,0 и 102,2 % урожая, по сравнению с контролем (без гербицидов), где урожайность составила 2,30 т/га (табл. 4). Достоверных различий между вариантами опыта с применением 2,0 л/га испытываемого гербицида и эталонных препаратов Элюмис, МД (2,0 л/га) и Октава, МД (1,0 л/га) не отмечено.

Табл. 4. Урожайность зерна гибрида кукурузы Краснодарский 291 АМВ при применении гербицида Аризон, МД (среднее за 2020–2021 гг.), т/га

Вариант опыта	По годам		Средняя	
	2020	2021	т/га	% к контролю
Аризон, МД – 1,0 л/га	4,45	4,15	4,30	187,0
Аризон, МД – 2,0 л/га	4,79	4,50	4,65	202,2
Элюмис, МД (эталон) – 2,0 л/га	4,67	4,38	4,53	197,0
Октава, МД (эталон) – 1,0 л/га	4,63	4,33	4,48	194,8
Без гербицидов (контроль)	2,32	2,28	2,30	100
НСР ₀₅	0,21	0,19	-	-

Выводы. Использование Аризон, МД в посевах кукурузы позволяет существенно снижать их засоренность. Биологическая эффективность в наименьшей норме применения гербицида (1,0 л/га) в центральной зоне Краснодарского края обеспечила снижение общего количества сорняков на 82,0...87,3 %, их массы – на 82,0...94,7 %.

Максимальная в опыте норма использования испытываемого препарата (2,0 л/га) приводила к 100 %-ной гибели злаковых и двудольных сорных растений в посевах кукурузы.

Комбинация мезотрион + никосульфурон + флорасулам в препарате Аризон, МД (2,0 л/га) позволила ему продемонстрировать преимущество в подавлении двудольных сорных растений (амброзия полыннолистная, бодяк щетинистый, дурнишник калифорнийский), в сравнении с эталонами Элюмис, МД (2,0 л/га) и Ок-

тава, МД (1,0 л/га), в состав которых входят только два действующих вещества: мезотрион + никосульфурон и никосульфурон + флорасулам соответственно.

Использование гербицида Аризон, МД, обеспечивало сохранение значимой части урожая кукурузы. Достоверный сохраненный урожай, по отношению к контролю (без гербицидов), составил 87,0 и 102,2 %.

Литература

1. *Бюллетени о состоянии сельского хозяйства (электронные версии): сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство / Федеральная служба государственной статистики. Москва, 2023 URL : [https://krsdstat.gks.ru/storage/mediabank/Posev\(3\).htm](https://krsdstat.gks.ru/storage/mediabank/Posev(3).htm) (дата обращения : 31.01.2023 г.)*
2. *Бюллетени о состоянии сельского хозяйства (электронные версии): сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство. М. : Федеральная служба государственной статистики, 2023. URL : <https://krsdstat.gks.ru/storage/mediabank/%D0%B2%D0%B0%BB%20%D0%B8%20%D1%83%D1%80%D0%BE%D0%B6%D0%B9%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C.htm> (дата обращения : 31.01.2023).*
3. *Mayerová M., Madaras M., Soukup J. Effect of chemical weed control on crop yields in different crop rotations in a long-term field trial // Crop Protection. 2018. Vol. 114. P. 215–222. doi : 10.1016/j.cropro.2018.08.001.*
4. *Colbach N., Gardarin A., Moreau, D. The response of weed and crop species to shading : Which parameters explain weed impacts on crop production? // Field Crops Research. 2019. Vol. 238. P. 45–55. doi : 10.1016/j.fcr.2019.04.008.*
5. *Soltani N., Dille J. A., Burke I. C. Potential corn yield losses from weeds in North America // Weed Technology. 2016. Vol. 30. No. 4. P. 979–984. <https://www.jstor.org/stable/26567654>.*
6. *Сибикеева Ю. Е., Борисов С. Ю. Сорняки-союзники грибов-фитопатогенов // Защита и карантин растений. 2013. № 3. С. 54–56.*
7. *Monteiro A., Santos S. Sustainable Approach to Weed Management : The Role of Precision Weed Management // Agronomy. 2022. Vol. 12. No.1. P. 118. URL : <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/1/118> (дата обращения : 25.01.2023). doi : 10.3390/agronomy12010118.*
8. *Young S. L. True Integrated Weed Management // Weed Research. 2012. Vol. 52. No. 2. P. 107–111. doi : 10.1111/j.1365-3180.2012.00903.x.*
9. *Walsh M., Chauhan B. S. A new approach to weed control in cropping systems // Biology, physiology and molecular biology of weeds. CRC Press, 2017. P. 45–62.*
10. *Кауцкоев М. В., Хуцинова М. М., Канукова Ж. О. Довсходовое применение гербицидов в посевах кукурузы // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 4. С. 22–28. doi : 10.30850/vrsn/2019/4/22–28.*
11. *Костюк А. В., Лукачева Н. Г. Эффективность применения гербицидов на кукурузе // Земледелие. 2015. № 4. С. 30–32.*
12. *Веневцев В. З., Захарова М. Н., Рожкова, Л. В. Эффективность применения гербицидов после всходов посевов кукурузы на зерно // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 4. С. 55–58. doi : 10.30850/vrsn/2018/4/55–58.*
13. *Хуцинова М. М. Способы защиты кукурузы от сорной растительности в послевсходовый период // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2017. № 4. С. 33–35.*

14. *Critical time for weed removal in corn as influenced by planting pattern and pre herbicides* / D. Nedeljković, S. Knežević, D. Božić, et al. // *Agriculture*. 2021. No. 11. P. 587. URL : <https://www.mdpi.com/2077-0472/11/7/587> (дата обращения : 25.01.2023). doi : 10.3390/agriculture11070587
15. Tursun N., Datta A., Sakinmaz M. S. *The critical period for weed control in three corn (Zea mays L.) types* // *Crop Protection*. 2016. Vol. 90. No. 59–65. doi : 10.1016/j.cropro.2016.08.019.
16. *Список пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. 2021 год. Справочное издание*. М. : АНО Редакция журнала «Защита и карантин растений», 2021. 816 с.
17. *Современное состояние проблемы изучения применения гербицидов (обзор публикаций за 2014–2017 гг.)* / Ю. Я. Спиридонов, С. Г. Жемчужин, И. Ю. Клейменова и др. // *Агрехимия*. 2019. № . 6. С. 81–91. doi : 10.1134/S0002188119060103.
18. *Отечественный трехкомпонентный гербицид Пиксель, МД для защиты посевов озимого ячменя в Краснодарском крае* / А. П. Савва, Т. Н. Тележенко, В. А. Суворова и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. № 3. С. 19–23. doi : 10.31857/S2500262722030048.
19. *Методические указания по регистрационным испытаниям гербицидов в сельском хозяйстве* / под. ред. В. И. Долженко. С-Пб : ВИЗР, 2013. 484 с.

Поступила в редакцию 09.03.2023

После доработки 27.03.2023

Принята к публикации 12.04.2023

Земледелие и мелиорация

УДК 631.8: 633.63 : 631.527.5 : 631.81.033

DOI:10.31857/S2500262723030092, EDN: EZPSNF

ПОТРЕБЛЕНИЕ НРК ГИБРИДАМИ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И ЗАРУБЕЖНОЙ СЕЛЕКЦИИ НА РАЗЛИЧНЫХ ФОНАХ ОСНОВНОГО УДОБРЕНИЯ В ЦЧР**О.А. Минакова, доктор сельскохозяйственных наук,
Л.В. Александрова, Т.Н. Подвигина***Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной
свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова,
396030, Воронежская обл., Рамонский р-н, пос. ВНИИСС, 86
E-mail: olalmin2@rambler.ru*

Исследования проводили с целью определения влияния уровня удобренности на урожайность и потребление НРК из почвы и удобрений сахарной свеклой в условиях ЦЧР. Работу выполняли в паровом звене зерносвекловичного севооборота в 2019–2021 гг. в Воронежской области. Схема опыта предусматривала изучение следующих вариантов: гибрид свеклы (фактор А) – РМС 120, РМС 127, Митика; удобрения (фактор В) – без удобрений, $N_{45}P_{45}K_{45} + 25$ т/га навоза, $N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ т/га навоза, $N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза, $N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза, $N_{190}P_{190}K_{190}$. Минеральные удобрения вносили под сахарную свеклу, навоз – в паровом поле. Высокая насыщенность элементами питания ($N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза и $N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза) обеспечивала формирование урожайности корнеплодов отечественных гибридов на уровне 43,2–45,1 т/га, иностранного – 48,3–51,6 т/га, что превышало величину этого показателя в неудобранных вариантах соответственно на 20,7–59,4 и 9,0–22,3 %. Выход сухого вещества с урожаем основной продукции РМС 120 и РМС 127 в удобренных вариантах составлял 11,9–15,3, Митика – 13,5–15,1 т/га. Отечественные гибриды в большей степени используют НРК удобрений, иностранный – элементы питания почвы, что ухудшает экологическую обстановку в посевах (за исключением K_2O , потребление которого отечественными гибридами, особенно РМС 127, более интенсивно). Для получения максимальных урожаев гибридов Митика, РМС 120 и РМС 127 рекомендовано применение в севообороте $N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза, РМС 127 – также и $N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ т/га навоза. Для расчета доз удобрений на планируемую урожайность рекомендуется использовать следующие нормативы выноса на 1 т основной продукции: при возделывании гибрида РМС 120 – 3,80 кг N, 1,40 кг P_2O_5 , 4,18 кг K_2O , РМС 127 – 3,44, 1,24 и 3,83 кг, Митика – 3,14, 1,09 и 2,97 кг соответственно.

CONSUMPTION OF NPK BY DOMESTIC AND FOREIGN SUGAR BEET HYBRIDS WITH DIFFERENT MAIN FERTILIZER BACKGROUNDS IN THE CENTRAL BLACK-EARTH REGION**O.A. Minakova, L.V. Alexandrova, T.P. Podvigina***Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar,
396030, Voronezhskaya obl., Ramonskii r-n, pos. VNISS, 86
E-mail: olalmin2@rambler.ru*

The investigations conducted in 2019–2021 revealed an effect of fertilizer levels on domestic and foreign sugar beet hybrids' yield and peculiarities of NPK consumption from soil and fertilizers under conditions of the Central Black-Earth Region. Fertilizer systems with a high degree of nutrient elements' saturation ($N_{135}P_{135}K_{135}$ for sugar beet in combination with 25 t/ha of manure in a fallow, and $N_{120}P_{120}K_{120}$ for sugar beet in combination with 50 t/ha of manure in a fallow) provided a high beet root yield of domestic sugar beet hybrids (43.2–45.1 t/ha) comparable to the one of the foreign hybrid (48.3–51.6 t/ha). The fertilizer level effect appeared as a substantial improvement of the domestic hybrids' productivity per 1 ha (by 20.7–59.4 % as compared to the variant without fertilizers), whereas this parameter of the foreign hybrid showed less increase (by 9.00–22.3 %). In variants with fertilizers, yield of dry matter by the crop main product of RMS 120 and RMS 127 was similar to that of Mitika hybrid (11.9–15.3 and 13.5–15.1, t/ha accordingly). The domestic hybrids generally use NPK fertilizers; the foreign one consumes nutrient elements of soil mostly. This worsens ecological conditions of fields (except K_2O which consumption by domestic hybrids, especially RMS 127, is more intensive). To obtain maximum yields it is recommended to apply $N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ t/ha of manure for both hybrids Mitika, RMS 120 and RMS 127, and also $N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ t/ha of manure for RMS 127. To calculate doses of fertilizers for planned yield obtaining, it is recommended to use the following standard removal values per 1 ton of the main product: 3.80 kg/t of N, 1.40 kg/t of P_2O_5 and 4.18 kg/t of K_2O , when cultivating the hybrid of RMS 120; 3.44, 1.24 and 3.83 kg/t, accordingly, when cultivating the hybrid of RMS 127; and 3.14, 1.09 and 2.97 kg/t, accordingly, when cultivating the hybrid of Mitika.

Ключевые слова: сахарная свекла (*Beta vulgaris* L.), импортозамещение, гибрид, урожайность, питательные элементы, коэффициент использования.

Key words: sugar beet (*Beta vulgaris* L.), import substitution, hybrid, yield, nutrient elements, utilization ratio.

Согласно «Доктрине продовольственной безопасности РФ» (2020 г.) [1] обеспечение страны сахаром собственного производства должно составлять не менее 90 %. В последние годы величина этого показателя была даже выше – 95,5 % [2]. При этом зависимость технологии выращивания сахарной свеклы (*Beta vulgaris* L.) от импорта зарубежных компонентов остается достаточно высокой [3, 4, 5]. Возделывание культуры в РФ в последние годы основано на использовании импортных гибридов (95,0–97,1 % от высеваемых) [4, 6], которые обеспечивали высокую продуктивность. Так, в 2016–2020 гг.

урожайность корнеплодов составляла 429 ц/га [7]. В современных условиях вследствие экономических санкций необходимо наращивать производство отечественных семян [8], в том числе сахарной свеклы, и шире использовать гибриды отечественной селекции [4, 9].

Формирование максимальной продуктивности сахарной свеклы в наиболее полной мере обеспечивает применение расчетных доз удобрений, что позволяет получать значительные прибавки урожая, а также сохранять почвенное плодородие [10, 11, 12]. При расчете доз удобрений на планируемую урожайность используют

такие агрохимические показатели как коэффициенты использования элементов питания из почвы и удобрений, вынос NPK на 1 т продукции; учитывают такие показатели почвенного плодородия, как содержание NPK в почве и др. [13, 14]. Величины указанных нормативов сильно зависят не только от уровня удобренности посевов, но и от биологических особенностей возделываемых гибридов, почвенно-климатических и погодных условий, способа обработки почв [15, 16, 17]. На этом основана сортовая агротехника сельскохозяйственных культур, обеспечивающая формирование значительных урожаев сырья высокого качества [18].

Кроме того, имеются сведения об изменении содержания NPK в сахарной свекле при использовании агрохимических средств [19, 20]. Установлено, что наименьший расход NPK в расчете на 1 т основной продукции (корнеплодов) с учетом побочной (листьев) обеспечивает применение оптимальных доз удобрений [16]. Изменение химического состава и урожайности оказывает сильное влияние на вынос NPK культурой [21].

Коэффициенты использования элементов питания растениями из удобрений (КИУ) в значительной мере зависят от используемых систем удобрений, обеспеченности посевов азотом, фосфором и микроэлементами, а рост удобренности приводит к снижению коэффициентов использования NPK сахарной свеклой [14, 21].

То есть, изучение содержания NPK в сухом веществе гибридов отечественной и зарубежной селекции сахарной свеклы, коэффициентов использования элементов питания из почвы и удобрений позволит установить оптимальные величины этих показателей с целью наиболее точного расчета доз удобрений на планируемую урожайность, обеспечивающих формирование высоких урожаев корнеплодов и рациональное использование удобрений.

Цель исследований – изучить потребление основных элементов питания гибридами сахарной свеклы отечественной и зарубежной селекции на фоне различных доз основного удобрения в условиях Центрально-Черноземного района РФ.

Методика. Работу выполняли в 2019–2021 гг. на опытном поле ВНИИСС им. А. Л. Мазлумова, которое находится в Рамонском районе Воронежской области, в опыте с различными агрофонами, созданными длительным применением удобрений в 9-польном зернопаропашном севообороте в паровом звене (черный пар – озимая пшеница – сахарная свекла – ячмень с подсевом клевера).

Схема опыта предусматривала изучение следующих вариантов: гибрид свеклы (фактор А) – диплоиды N-типа РМС 120 и РМС 127 (ВНИИСС им. А. Л. Мазлумова, РФ) и Митика (Lion Seeds Co., Ltd, Великобритания); удобрения (фактор В) – без удобрений, $N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза, $N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ т/га навоза, $N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза, $N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза, $N_{190}P_{190}K_{190}$. В вариантах с учетом последействия навоза в сумме поступало соответственно 205,6, 340,6, 475,6, 501,2 и 570,0 кг/га д.в. NPK. Минеральные удобрения вносили осенью перед основной обработкой под сахарную свеклу, полупрепревший навоз крупного рогатого скота – в паровом поле. Отечественные гибриды включены в Государственный реестр селекционных достижений РФ в 2010 и 2016 гг., иностранный – в 2015 г.

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный малогумусный. Агрохимическая характеристика почвы опытного участка (слой 0...20 см): содержание гумуса – 4,89...5,55 %, подвижных P_2O_5 и K_2O – 6,07...13,8 и 17,5...23,9 мг/100 г почвы соответственно по Чирикову, pH_{KCl} – 5,31...5,92, Нг – 3,51...4,93 мг-экв/100 г почвы.

Теплые периоды лет исследований характеризовались как засушливые с суммой осадков в 2019 г. 187,5 мм, в 2020 г. – 182,3 мм, в 2021 г. – 298,3 мм, средней температурой – 16,3, 16,4 и 16,7 °С соответственно, гидротермическим коэффициентом Селянинова – 0,9, 0,6 и 1,0, при среднемноголетних значениях показателей 382,2 мм, 15,9 °С и 1,27 соответственно.

Урожайность корнеплодов определяли по методике Л. А. Барштейна, Н. Г. Гизбуллина (1986), содержание в корнеплодах сухого вещества – весовым методом, содержание NPK – по В. Т. Куркаеву (1961), коэффициенты использования элементов питания из почвы и удобрений растениями сахарной свеклы для формирования основной и побочной продукции – балансовым расчетным методом, окупаемость NPK прибавкой урожая корнеплодов – расчетным методом. Статистическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа (Доспехов, 1985) с использованием ПК.

Результаты и обсуждение. Урожайность отечественных гибридов РМС 120 и РМС 127 в вариантах с удобрениями составила 37,7...45,1 и 36,2...44,0 т/га соответственно (рис. 1), иностранного – 46,0...51,6 т/га, что свидетельствует о более высокой продуктивности последнего. Наибольший в опыте уровень урожайности отечественного гибрида РМС 127 при уборке обеспечивали системы $N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза и $N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ т/га навоза; применение удобрений увеличивало сбор корнеплодов этого гибрида на 6,2...14,0 т/га (на 20,7...46,7 %), относительно контроля. Максимальную в опыте урожайность отечественного гибрида РМС 120 отмечали в вариантах $N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза, $N_{190}P_{190}K_{190}$ и $N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза. Относительно контроля прибавка составляла 9,4...16,8 т/га (33,2...59,4 %), что выше, чем у РМС 127, и свидетельствует о лучшей реакции РМС 120 на улучшение условий минерального питания. Разница в урожайности гибридов РМС 120 и РМС 127 на одних и тех же фонах удобрения была несущественной, 0,9...2,4 т/га, что ниже НСР₀₅ по фактору А (2,54 т/га).

Урожайность иностранного гибрида в вариантах с применением удобрений была выше, чем у отечественных, на 4,8...9,8 т/га (11,1...27,1 %), в контроле – на 12,2...13,9 т/га (40,7...49,1 %). Меньшая разница по величине этого показателя у отечественных гибридов, по сравнению с иностранным, в вариантах с применением удобрений свидетельствует о том, что гибриды российской селекции лучше использовали действие удобрений. Наименьшая разница в урожайности иностранного гибрида с РМС 120 отмечена в варианте $N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза (5,1 т/га), с РМС 127 – $N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ т/га навоза (4,8 т/га).

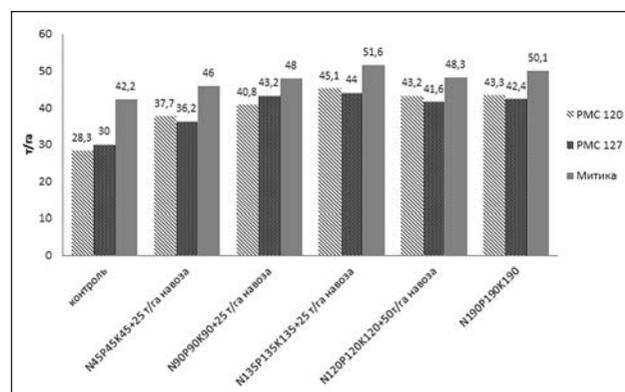


Рис. 1. Влияние удобрений на урожайность гибридов сахарной свеклы (среднее за 2019–2021 гг.; НСР₀₅ для фактора А – 2,54 т/га; для фактора В – 3,60 т/га), т/га.

Удобрения обеспечивали увеличение сбора корнеплодов гибрида Митика на 3,8...9,4 т/га (9,0...22,3 %), относительно контроля, что свидетельствует о его слабой реакции на улучшение условий питания (в отличии от отечественных гибридов, прибавка урожая которых от удобрений составляла 20,7...59,4 %).

Окупаемость 1 кг NPK удобрений прибавкой урожая корнеплодов гибрида РМС 120 составляла 26,3...45,7 кг/кг, РМС 127 – 21,7...38,8, Митики – 12,2...18,5 кг/кг. Это также указывает на то, что отечественный гибрид РМС 120 в наибольшей степени реагировал на применение удобрений, а иностранный – в наименьшей. Самая высокая окупаемость у РМС 120 отмечена в варианте $N_{45}P_{45}K_{45} + 25$ т/га навоза (45,7 кг/кг), самая низкая – $N_{190}P_{190}K_{190}$ (26,3 кг/кг), у РМС 127 – соответственно в вариантах $N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ т/га навоза (38,8 кг/кг) и $N_{190}P_{190}K_{190}$ (21,7 кг/кг), у Митики – $N_{45}P_{45}K_{45} + 25$ т/га навоза (18,5 кг/кг) и $N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза (12,2 кг/кг). Увеличение окупаемости отечественных гибридов привело к снижению окупаемости 1 кг NPK, относительно минимальной дозы $N_{45}P_{45}K_{45} + 25$ т/га навоза, на 19,7...44,1 %, иностранного – в меньшей степени, на 6,5...34,1 %, а на фоне $N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза отмечено даже небольшое ее увеличение.

Выход сухого вещества с урожаем корнеплодов отечественных и иностранного гибридов в вариантах с удобрениями был сопоставимым (рис. 2): у РМС 120 – 12,2...15,3 т/га, у РМС 127 – 11,9...14,0 т/га, у Митики – 13,5...15,1 т/га, что связано с более высоким (на 0,2...1,5 %) содержанием сухого вещества в корнеплодах отечественных гибридов. Так, в вариантах с удобрениями в корнеплодах гибрида РМС 120 оно составляло 26,1...26,9 %, РМС 127 – 24,9...26,8 %, Митика – 24,7...25,6 %. Наибольшая разница между гибридами была отмечена в вариантах с невысокой и средней насыщенностью NPK. Максимальное в опыте содержание сухого вещества в корнеплодах отечественных и иностранного гибридов отмечено при внесении $N_{45}P_{45}K_{45} + 25$ т/га навоза, а у гибрида Митика еще и в варианте с $N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза.

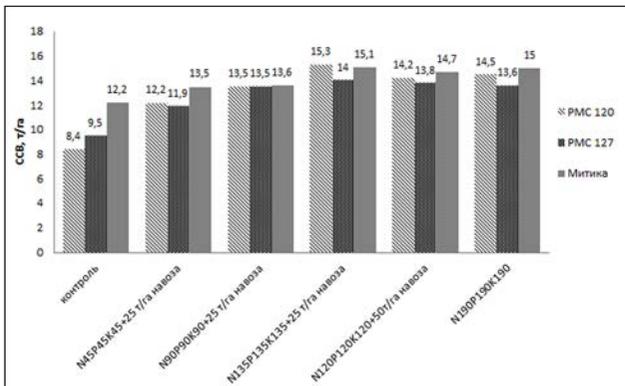


Рис. 2. Влияние удобрений на выход сухого вещества с урожаем корнеплодов гибридов сахарной свеклы (среднее за 201–2021 гг.), т/га.

Выход сухого вещества в неудобренном варианте у РМС 120 составил 8,4 т/га, РМС 127 – 9,5, Митики – 12,2 т/га, что объясняется различиями в урожайности корнеплодов. Под влиянием удобрений выявлен рост величины этого показателя, относительно контроля, у гибрида РМС 120 на 45,2...82,1 %, РМС 127 – на 25,3...47,4 и Митики – на 10,7...23,8 %.

Содержание азота в расчете на сухое вещество корнеплодов перед уборкой у гибрида РМС 120 со-

Табл. 1. Влияние удобрений на содержание NPK в корнеплодах гибридов сахарной свеклы перед уборкой (среднее за 2019–2021 гг.), % сухого вещества

Вариант	РМС 120			РМС 127			Митика		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Контроль	0,81	0,41	1,35	1,12	0,36	1,45	0,97	0,35	1,13
$N_{45}P_{45}K_{45} + 25$ т/га навоза	0,97	0,42	1,45	0,91	0,32	1,28	0,92	0,35	1,08
$N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ т/га навоза	0,81	0,42	1,33	1,03	0,40	1,25	0,90	0,42	1,05
$N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза	1,12	0,38	1,23	0,84	0,29	1,43	1,00	0,34	0,98
$N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза	1,38	0,37	1,30	1,25	0,46	1,30	0,98	0,35	1,00
$N_{190}P_{190}K_{190}$	1,25	0,27	1,48	0,93	0,51	1,43	1,12	0,41	1,03
НСР ₀₅ :									
для фактора А	N – 0,05; P ₂ O ₅ – 0,04; K ₂ O – 0,06								
для фактора В	0,05	0,02	-	-	0,02	0,07	-	-	0,05

ставляло 0,81...1,38 %, РМС 127 – 0,84...1,25 %, Митики – 0,90...1,12 % (табл. 1). Наибольшую концентрацию P₂O₅ в корнеплодах отмечали у гибрида РМС 127 (0,29...0,51 %), несколько меньше – у Митики (0,34...0,42 %), самую низкую – у РМС 120 (0,27...0,42 %). Содержание K₂O в сухом веществе корнеплодов гибридов РМС 127 и РМС 120 (1,23...1,48 и 1,25...1,43 % соответственно) было выше, чем у Митики (0,98...1,13 %). В целом самое высокое суммарное содержание NPK в корнеплодах отмечено у гибрида РМС 127, самое низкое – у Митики.

Под действием удобрений у гибрида РМС 120 происходило повышение содержания N, относительно контроля, на 0,16...0,57 %, с одновременным снижением P₂O₅ на 0,03...0,14 %. У РМС 127 отмечено увеличение концентрации P₂O₅ на 0,04...0,15 % и снижение K₂O на 0,15...0,20 %. У Митики происходило только сокращение содержания K₂O (на 0,05...0,15 %). Наименьшее количество NPK в корнеплодах гибрида РМС 120 отмечали в варианте с $N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ т/га навоза, РМС 127 – $N_{45}P_{45}K_{45} + 25$ т/га навоза и $N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза, гибрида Митика – во всех вариантах было ниже, чем в контрольном, за исключением $N_{190}P_{190}K_{190}$.

Самый низкий вынос P₂O₅ урожаем корнеплодов зафиксирован у гибрида РМС 120 (за исключением варианта $N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоз) – 27,5...46,3 кг/га (табл. 2), у гибридов РМС 127 и Митика величина этого показателя составляла 27,4...50,1 и 37,1...50,0 кг/га соответственно, что больше, чем у РМС 120, на 14,5...35,4 %. При высокой насыщенности удобрениями разница снижалась. Вынос азота урожаем корнеплодов у иностранного гибрида был на 11,2...89,7 % больше, чем у отечественных (за исключе-

Табл. 2. Влияние удобрений на выход NPK урожаем корнеплодов гибридов сахарной свеклы (среднее за 2019–2021 гг.), кг/га

Вариант	РМС 120			РМС 127			Митика		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Контроль	54,3	27,5	90,5	85,1	27,4	110	103	37,1	120
$N_{45}P_{45}K_{45} + 25$ т/га навоза	98,0	42,4	147	88,3	31,0	124	109	41,3	127
$N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ т/га навоза	86,7	44,9	142	111	43,2	135	107	50,0	125
$N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза	133	45,2	146	97,4	33,6	154	130	44,2	127
$N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза	157	42,2	148	136	50,1	142	121	43,4	124
$N_{190}P_{190}K_{190}$	141	46,3	167	99,5	38,5	153	141	44,1	129

нием варианта с применением $N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза). Наибольшую разницу отмечали в контроле, а также в вариантах с применением $N_{45}P_{45}K_{45} + 25$ т/га навоза и $N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ т/га навоза между гибридами РМС 120 и Митика. Гибриды РМС 120 и РМС 127 отчуждали с урожаем на 8,0...29,5 % больше K_2O , чем Митика, за исключением контроля, где был отмечен наибольший вынос элемента иностранным гибридом.

Удобрения повышали вынос азота урожаем корнеплодов гибрида РМС 120, относительно контроля, на 59,6...189 %, гибрида РМС 127 – на 3,8...59,8 %, гибрида Митика – на 3,9...36,9 %, P_2O_5 – соответственно на 53,5...68,4, 13,1...82,9 и 11,3...34,8 %, K_2O – на 56,9...84,5, 12,7...40,0 и 3,4...7,5 %, что свидетельствует о меньшей зависимости выноса NPK иностранным гибридом от уровня удобренности.

Максимальный в опыте суммарный вынос NPK гибридами РМС 120 и Митика отмечен в варианте $N_{190}P_{190}K_{190}$ гибридом РМС 127 – $N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза, вследствие как наибольшей урожайности, так и содержания элементов питания в корнеплодах. Минимальный вынос у всех гибридов отмечен в вариантах без удобрений.

Вынос азота в расчете на 1 т корнеплодов отечественным гибридом РМС 120 в вариантах с удобрениями был самым высоким в опыте – 3,13...4,52 кг/т (табл. 3). У гибрида РМС 127 он составлял 2,99...4,12 кг/т, Митика – 2,80...3,35 кг/т. То есть на фоне удобрений у отечественных гибридов вынос азота был выше, чем у иностранного, на 6,8...51,7 %, а на неудобренном у иностранного больше, чем у отечественных, на 11,1...17,1 %. Увеличение уровня удобренности повышало вынос азота гибридом РМС 120, относительно контроля, на 30,4...88,3 %, гибридом РМС 127 – на 18,2...62,1 %, тогда как у гибрида Митика достоверного изменения величины этого показателя не наблюдали, за исключением варианта $N_{190}P_{190}K_{190}$. Самый низкий вынос азота на единицу продукции у всех гибридов отмечен в вариантах с применением $N_{45}P_{45}K_{45} + 25$ т/га навоза, $N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ т/га навоза, а также в контроле. При действии систем $N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза и $N_{190}P_{190}K_{190}$ происходил максимальный в опыте рост величины этого показателя.

Вынос P_2O_5 был самым низким, по сравнению с другими элементами (1,01...1,40 кг/т). Наибольшей величиной этого показателя характеризовался гибрид РМС 120 (1,22...1,40 кг/т), наименьшей – Митика (1,01...1,19 кг/т). У отечественных гибридов без применения удобрений он был на 12,8...20,8 % выше, чем у иностранного, а на фоне различных доз удобрений разница в выносе P_2O_5 между ними составляла 5,0...42,1 %. Использование удобрений повышало вынос фосфора, относительно контроля, при возделывании гибрида РМС 120 на 4,1...14,8 %, РМС 127 – на 9,7...33,3 %, Митика – на 5,9...17,8 %. Наименьшее количество этого элемента

на создание 1 т продукции у всех гибридов затрачивалось в контрольном варианте, у гибридов РМС 127 и Митики еще и в варианте $N_{45}P_{45}K_{45} + 25$ т/га навоза, у РМС 120 – $N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза и $N_{190}P_{190}K_{190}$.

Вынос K_2O у гибридов РМС 120 и РМС 127 составил 4,00...4,95 и 3,75...4,48 кг/т соответственно, у Митики – 2,85...3,25 кг/т, то есть у отечественных гибридов он в одних и тех же вариантах был выше, чем у иностранного на 23,1...60,7 %. Удобрения способствовали повышению различий, наибольшими они были при внесении $N_{190}P_{190}K_{190}$. Гибрид РМС 120 затрачивал минимальное в опыте количество этого элемента на создание 1 т продукции в контроле, а также вариантах с внесением $N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза и $N_{190}P_{190}K_{190}$ гибридом РМС 127 – во всех удобренных вариантах, за исключением $N_{190}P_{190}K_{190}$ гибрида Митика – $N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ т/га навоза и $N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза. Наибольшее влияние уровня удобренности на величину этого показателя проявилось у гибрида РМС 120, ее рост, относительно контроля, составил 4,4...23,8 %, у гибридов РМС 127 и Митика наблюдали снижение на 7,1...11,8 и 3,1...12,3 % соответственно, за исключением варианта $N_{190}P_{190}K_{190}$ на гибриде РМС 127, где было отмечено небольшое, на 5,4 % повышение.

Поскольку наибольшую в опыте урожайность гибрида РМС 120 обеспечивала система удобрений $N_{135}P_{135}K_{135} + 25$, РМС 127 – $N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ и $N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза, Митика – $N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза и $N_{190}P_{190}K_{190}$ (см. рис. 1), то оптимальным показателем для этих гибридов следует считать расход NPK на 1 т продукции, соответствующий конкретной дозе (РМС 120), либо среднему арифметическому расходу NPK на фоне двух доз удобрений, обеспечивавших высокую урожайность корнеплодов (РМС 127 и Митика). Для гибрида РМС 120 оптимальный вынос с 1 т продукции N составляет 3,80 кг, P_2O_5 – 1,40, K_2O – 4,18 кг, для гибрида РМС 127 – 3,44, 1,24 и 3,83 кг/т, для гибрида Митика – 3,14, 1,09 и 2,97 кг/т соответственно. Величина этого показателя у отечественных гибридов по азоту была выше на 9,6...21,0 %, P_2O_5 – на 13,8...28,4 %, K_2O – на 29,0...40,7 %, что указывает на более высокое расходование NPK на формирование 1 т продукции. Разница выноса азота, P_2O_5 и K_2O на 1 т продукции между гибридами РМС 120 и РМС 127 составляла 10,5, 12,9 и 9,1 % соответственно, что свидетельствует о том, что ранее созданный гибрид РМС 120 отличался повышенным выносом основных элементов питания. Эту особенность следует учитывать и при использовании удобрений по рекомендациям научных учреждений. При возделывании иностранного гибрида рекомендованные научными учреждениями дозы минеральных удобрений необходимо снижать на 20,0...40,0 %, современных отечественных гибридов типа РМС 127 – на 10,0...15,0 %. Это объясняется тем, что рекомендации разрабатывались

Табл. 3. Вынос NPK на 1 т основной продукции (с учетом побочной) гибридами сахарной свеклы (среднее за 2019–2021 гг.), кг

Вариант	РМС 120			РМС 127			Митика		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
Контроль	2,40	1,22	4,00	2,53	1,14	4,25	2,81	1,01	3,25
$N_{45}P_{45}K_{45} + 25$ т/га навоза	3,13	1,36	4,70	2,99	1,09	3,90	2,80	1,03	3,15
$N_{90}P_{90}K_{90} + 25$ т/га навоза	3,68	1,39	4,40	3,21	1,25	3,75	2,84	1,19	2,98
$N_{135}P_{135}K_{135} + 25$ т/га навоза	3,80	1,40	4,18	3,67	1,22	3,90	2,93	1,09	2,85
$N_{120}P_{120}K_{120} + 50$ т/га навоза	4,52	1,22	4,28	4,12	1,52	3,95	2,98	1,07	3,05
$N_{190}P_{190}K_{190}$	4,18	1,27	4,95	4,10	1,25	4,48	3,35	1,08	3,08

достаточно давно (в 80-х гг. прошлого века), а нормативный вынос NPK на 1 т основной продукции был рассчитан на основе данных, полученных на сортах с высокими расходом основных элементов питания на единицу продукции. Вследствие этого его абсолютные значения значительно выше рассчитанных по результатам наших исследований, что при расчете удобрений на планируемую урожайность для современных гибридов приводит к получению сильно завышенных, экономически и экологически нецелесообразных доз.

Коэффициенты использования питательных веществ из удобрений основной и побочной продукцией гибридов были не одинаковыми (табл. 4). Азот удобрений использовался меньше, чем K₂O, но больше, чем P₂O₅. Наиболее интенсивно его использовал гибрид РМС 120 (КИУ=22,0...38,4 %), а также при внесении высоких доз – гибрид Митика (34,5...42,0 %). Гибрид РМС 127 использовал азот несколько слабее (1,6...39,3 %). Наибольший в опыте КИУ азота у всех гибридов отмечен при внесении N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀ + 50 т/га навоза, а у гибрида РМС 120 еще в варианте N₁₃₅P₁₃₅K₁₃₅ + 25 т/га навоза, Митика – N₁₉₀P₁₉₀K₁₉₀. Увеличение доз вносимых удобрений способствовало повышению КИУ азота у гибрида РМС 120 на 4,8...16,4 %, РМС 127 – на 7,1...37,7 %, Митика – на 30,3...37,8 %.

Табл. 4. Коэффициент использования питательных веществ из удобрений растениями сахарной свеклы (среднее за 2019–2021 гг.)

Вариант	РМС 120			РМС 127			Митика		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅ + 25 т/га навоза	22,0	4,43	44,0	1,57	21,0	38,4	-*	15,2	-
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + 25 т/га навоза	26,8	11,8	36,8	21,3	29,3	45,3	-	17,0	35,5
N ₁₃₅ P ₁₃₅ K ₁₃₅ + 25 т/га навоза	38,4	27,3	26,8	8,69	14,0	27,1	4,19	11,9	15,7
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + 50 т/га навоза	32,8	6,51	31,8	39,3	22,3	27,5	34,5	14,3	16,2
N ₁₉₀ P ₁₉₀ K ₁₉₀	28,8	2,68	51,7	-	17,4	24,1	42,0	8,95	12,3

*прочерки означают превышение выноса элемента основной и побочной продукцией в контрольном варианте над выносом в варианте с использованием удобрений.

Сильнее всего K₂O удобрений использовал гибрид РМС 120, для которого КИУ этого элемента составил 26,8...51,7 %, тогда как у РМС 127 он был равен 24,1...45,3 %, у Митики – 12,3...35,5 %. Повышение уровня удобрений уменьшало использование элемента гибридом РМС 120, в сравнении с минимальной дозой удобрений N₄₅P₄₅K₄₅ + 25 т/га навоза, на 7,2...17,2 %, РМС 127 – на 10,9...14,3 %, Митикой – 19,3...23,2 %. Более высокие КИУ K₂O отечественными гибридами отмечены при внесении N₄₅P₄₅K₄₅ + 25 т/га навоза и N₉₀P₉₀K₉₀ + 25 т/га навоза (гибридом РМС 120 – еще и N₁₉₀P₁₉₀K₁₉₀), иностранным гибридом – N₉₀P₉₀K₉₀ + 25 т/га навоза.

Менее всего растения культуры использовали P₂O₅ удобрений, его КИУ составил 2,7...27,3 %, самая высокая величина этого показателя отмечена у РМС 127 (14,0...29,3 %), несколько меньше – у Митики (9,0...17,0 %), самая низкая – у РМС 120 (2,7...11,8 %), за исключением варианта N₁₃₅P₁₃₅K₁₃₅ + 25 т/га навоза (КИУ=27,3 %). Наибольшие величины этого показателя по P₂O₅ у гибридов РМС 127 и Митика отмечены при внесении N₄₅P₄₅K₄₅ + 25 т/га навоза и N₉₀P₉₀K₉₀ + 25 т/га навоза (у РМС 127 – еще N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀ + 50 т/га навоза), у гибрида РМС 120 – N₉₀P₉₀K₉₀ + 25 т/га навоза и N₁₃₅P₁₃₅K₁₃₅ + 25 т/га навоза. Отмечена тенденция к увеличению КИУ P₂O₅

Табл. 5. Коэффициенты использования питательных веществ из почвы растениями сахарной свеклы (среднее за 2019–2021 гг.), %

Вариант	РМС 120			РМС 127			Митика		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Контроль	39,9	12,8	29,5	63,4	12,3	31,6	100,3	22,5	28,6
N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅ + 25 т/га навоза	45,7	11,5	29,1	73,0	16,1	36,6	72,7	20,5	31,6
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + 25 т/га навоза	42,0	10,0	31,5	73,9	17,8	50,9	61,2	19,6	44,5
N ₁₃₅ P ₁₃₅ K ₁₃₅ + 25 т/га навоза	29,2	14,1	35,8	52,3	14,1	40,6	52,3	16,3	33,4
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + 50 т/га навоза	92,0	11,4	43,6	94,0	22,1	32,4	88,6	22,0	39,1
N ₁₉₀ P ₁₉₀ K ₁₉₀	27,7	7,4	35,7	37,7	18,4	35,2	147,0	22,1	37,9

при повышении уровня удобренности: гибридом РМС 120 – на 2,1...22,9 %, РМС 127 – на 1,3...8,3 %, у гибрида Митика, в основном, наблюдали снижение КИУ на 0,9...6,2 %.

При увеличении доз удобрений происходило закономерное уменьшение использования P₂O₅ из почвы и повышение – K₂O, как иностранным, так и отечественными гибридами, что способствует сохранению фосфатного фонда почвы, но утилизирует значительные запасы K₂O черноземов. Коэффициент использования азота почвы отечественными гибридами повышался, относительно контроля, при внесении N₄₅P₄₅K₄₅ + 25 т/га навоза, N₉₀P₉₀K₉₀ + 25 т/га навоза и N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀ + 50 т/га навоза и снижался в других вариантах опыта, а иностранным гибридом – уменьшался во всех вариантах, за исключением N₁₉₀P₁₉₀K₁₉₀.

Коэффициенты использования питательных веществ из почвы (КИП) основной и побочной продукцией у иностранного гибрида были выше, чем у отечественных (за исключением K₂O). Так, N почвы использовался соответственно на 52,3...147,0 % и 27,7...94,0 %, P₂O₅ – на 16,3...22,5 % и 7,4...22,1 % (табл. 5). КИП K₂O отечественных гибридов был несколько выше (29,5...50,9 %), чем у иностранного (28,6...44,5 %).

Из отечественных гибридов больше всего NPK почвы использовал РМС 127, у этого гибрида также отмечена тенденция к повышению КИП при увеличении доз удобрений. КИП гибрида РМС 120 был ниже и уменьшался на фоне высоких доз удобрений N₁₃₅P₁₃₅K₁₃₅ + 25 т/га навоза и N₁₉₀P₁₉₀K₁₉₀.

В вариантах с удобрениями у гибрида Митика отмечено снижение КИП азота на 11,7...48,0 %, тогда как у гибридов РМС 120 и РМС 127 наблюдали тенденцию к его уменьшению в вариантах N₁₃₅P₁₃₅K₁₃₅ + 25 т/га навоза и N₁₉₀P₁₉₀K₁₉₀ на 10,7...12,2 и 11,1...25,7 % соответственно, а у РМС 127 еще отмечали повышение на 9,6...10,5 % в вариантах N₄₅P₄₅K₄₅ + 25 т/га навоза и N₉₀P₉₀K₉₀ + 25 т/га навоза.

Использование P₂O₅ из почвы гибридом РМС 120 снижалось, относительно контроля, на 1,3...5,4 %, за исключением системы N₁₃₅P₁₃₅K₁₃₅ + 25 т/га навоза, где произошло повышение на 1,3 %, гибридом РМС 127 – также уменьшалось на 1,8...9,8 %, а гибридом Митика – было достаточно стабильным, за исключением системы N₁₃₅P₁₃₅K₁₃₅ + 25 т/га навоза, где отмечено некоторое снижение (на 6,2 %).

На фоне удобрений отмечено достоверное увеличение КИП K₂O гибридами РМС 120 на 2,0...14,1 %, РМС 127 – на 0,8...19,3 %, иностранным – на 3,0...15,9 %.

Гибрид РМС 127 использовал почвенные запасы NPK больше, чем РМС 120, в том числе и при внесении удобрений, что несколько ухудшает экологическую обстановку в агроценозе, уменьшая запасы подвижных форм основных элементов питания в почве. Применение

удобрений в посевах гибрида РМС 120 обеспечивало более значительное снижение КИП P_2O_5 относительно контроля и, в меньшей степени, повышение КИП азота и K_2O , по сравнению с гибридом РМС 127.

Выводы. Наибольшая урожайность корнеплодов в опыте отмечена у иностранного гибрида, при этом внесение удобрений обеспечивало прибавки его урожая ниже, чем у отечественных гибридов. На фоне высоких доз удобрений урожайность гибридов РМС 120 и РМС 127 была практически на одном уровне с иностранным гибридом.

Наибольшая окупаемость 1 кг NPK дополнительным урожаем у гибридов РМС 120 и Митика достигалась в варианте с $N_{45}P_{45}K_{45} + 25$ т/га навоза, у РМС 127 – $N_{20}P_{20}K_{20} + 25$ т/га навоза. Отечественные гибриды, особенно РМС 120, лучше использовали NPK удобрений.

Повышенное потребление азота и P_2O_5 из почвы иностранным гибридом свидетельствует об ухудшении экологической ситуации в его посевах вследствие более интенсивного расхода запасов подвижных форм этих элементов питания.

Вынос азота на создание 1 т корнеплодов (с соответствующим количеством листьев) у гибрида РМС 120 составил 3,80 кг, P_2O_5 – 1,40, K_2O – 4,18 кг, у РМС 127 – 3,44, 1,23 3,83 кг, у Митики – 3,14, 1,08 и 2,97 кг соответственно. Эти величины рекомендуется использовать при расчете доз удобрений на планируемую урожайность культуры.

Рекомендованные научными учреждениями дозы минеральных удобрений при возделывании иностранного гибрида необходимо снижать на 20...40 %, а современных отечественных гибридов – на 10...15 %.

Литература.

1. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. М.: ФГБНУ «Росинформагротех». 2020. 26 с.
2. Прогноз производства сахара снижен до 6,2 млн тонн (обзор рынка) // Sugar.ru. URL: <https://sugar.ru/pode/41457> (дата обращения: 15.01.2023).
3. Кириллова О. В. Проблемы в системе импортозамещения в России // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2017. Т. 12. № 3 (45). С. 120–123.
4. Гончаров С. В., Подпоринова Г. К. Свеклосахарное производство: риски импортозамещения // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (54). С. 13–23.
5. Минаков И. А. Укрепление материально-технической базы аграрного производства как одно из условий обеспечения продовольственной безопасности // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2021. № 3 (66). С. 131–136.
6. Корниенко А. В., Семенихина Л. В., Мельников Ю. Н. Проблемы селекции и семеноводства сахарной свеклы в России – возможные пути решения // Сахарная свекла. 2022. № 10. С. 15–19.
7. Сельское хозяйство в России. 2021: Стат. сб. М.: Росстат, 2021. 100 с.
8. Особенности государственной поддержки и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции в условиях импортозамещения / Д. С. Неуймин, А. В. Бекетов, В. А. Кувишинов и др. // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30. № 5. С. 12–15.
9. Смирнов М. А., Налбандян А. А. Влияние УФ-излучения на сохранность маточных корнеплодов сахарной свеклы и генетическую изменчивость полученных семян // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 2. С. 53–56.
10. Продуктивность культур и балансовые коэффициенты использования элементов питания в севообороте / О. А. Силина, О. В. Чухина, С. Н. Дурягина и др. // Плодородие. 2017. № 4 (97). С. 12–15.
11. Окорков В. В. Модели продуктивности зернового севооборота на серых лесных почвах Верхневолжья // Российская сельскохозяйственная наука. 2018. № 1. С. 30–34.
12. Влияние технологий возделывания сельскохозяйственных культур на их урожайность и экономическую эффективность в севообороте / В. К. Дригидер, Е. А. Кацаев, Р. С. Стукалов и др. // Земледелие. 2015. № 7. С. 20–23.
13. Методы анализа и проектирования системы удобрения яровой пшеницы для формализации принятия решений в условиях Зауралья / Н. В. Стелных, А. Н. Копылов, Е. В. Нестерова и др. // Агрохимия. 2020. № 4. С. 19–29.
14. Алиев А. М., Старостина Е. Н., Иващенко Г. А. Влияние комплексного применения средств химизации на баланс питательных элементов в условиях Центрального Нечерноземья // Плодородие. 2022. № 6 (129). С. 52–54.
15. Завьялова Н. Е., Шишков Д. Г. Влияние минеральных удобрений на урожайность и качество сельскохозяйственных культур в длительном стационарном опыте в климатических условиях Предуралья // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2020. № 5. С. 5–17.
16. Заришняк А. С., Руцкая С. И., Колибабчук Т. В. Влияние удобрений на потребление элементов питания культурами зерно-свекловичного севооборота на черноземе оподзоленном // Агрохимия. 2003. № 6. С. 39–46.
17. Барашикова Н. В., Устинова В. В., Слепцова Н. А. Сравнительная оценка выноса питательных элементов с урожаем различными кормовыми культурами при внесении удобрений в условиях Центральной Якутии // Вестник КрасГАУ. 2018. № 4 (139). С. 41–47.
18. Актуальность разработки экологически безопасных технологий возделывания сельскохозяйственных культур / А. М. Сабирзянов, С. В. Сочнева, Н. А. Логинов и др. // Зерновое хозяйство России. 2017. № 2 (50). С. 26–29.
19. Жердецкий И. Н., Заришняк А. С., Ступенко А. В. Влияние некорневой подкормки микроэлементами на продуктивность сахарной свеклы и содержание в ней макроэлементов // Агрохимия. 2010. № 10. С. 20–27.
20. Дроздова В. В., Редина Н. Е. Влияние минеральных удобрений на питательный режим почвы, урожайность и качество корнеплодов сахарной свеклы // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 111. С. 1643–1657.
21. Коэффициенты использования элементов питания растениями в севообороте при длительном применении удобрений / Н. Д. Дуйшембиев, М. А. Ахматбеков, К. Б. Мамбетов и др. // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К. И. Скрябина. 2018. № 2 (47). С. 51–58.

Поступила в редакцию 14.02.2023
После доработки 14.03.2023
Принята к публикации 11.04.2023.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕСЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗ АЗОТНОГО УДОБРЕНИЯ НА ЯРОВОЙ ТРИТИКАЛЕ В УСЛОВИЯХ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ*

А.Д. Аленичева,

О.А. Щуклина, кандидат сельскохозяйственных наук

Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН,
127276, Москва, ул. Ботаническая, 4
E-mail: alenicheva_a@mail.ru

Азот выступает ключевым элементом достижения высокой урожайности зерновых культур. Изучение реакции новых сортов на применение азотных удобрений в полевых опытах позволяет выявить наиболее эффективные приемы для реализации потенциальной урожайности в конкретных почвенно-климатических условиях. Исследования проведены в 2020–2021 гг. в условиях Московской области на дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почвах с низким (1,3...1,7 %) содержанием гумуса. Схема опыта предполагала изучение влияния возрастающих и дробных доз азотного удобрения от 30 до 150 кг/га действующего вещества в виде аммиачной селитры (NH_4NO_3). Удобрения вносили вручную по всходам, в вариантах с дробным использованием вторую часть дозы вносили в фазе выхода в трубку. Объекты исследований – сорта яровой тритикале Тимирязевская 42 и Ботаническая 4, зарегистрированные в Государственном реестре селекционных достижений в 2022 г. Азотные удобрения увеличивали высоту растений сорта Тимирязевская 42 на 4,7...10,2 см, сорта Ботаническая 4 – на 8,7...10,1 см. При этом полегания посевов в сложившихся метеорологических условиях во всех вариантах опыта не отмечали. При внесении азотных удобрений в дозах от 90 до 120 кг/га прибавка урожайности на сорте Тимирязевская 42 составила 3,61...5,10 т/га к контролю (без внесения удобрений), на сорте Ботаническая 4 – 2,71...2,42 т/га. Наибольший в опыте сбор зерна сорта Тимирязевская 42 отмечен при внесении азотных удобрений в дозе 120 кг/га – 9,99 т/га, сорта Ботаническая 4 в дозе 90 кг/га – 7,16 т/га. Вынос элементов питания без внесения азотных удобрений и высокая урожайность, при использовании их высоких доз, свидетельствуют о большем потенциале урожайности сорта Тимирязевская 42, по сравнению с сортом Ботаническая 4.

THE EFFECTIVENESS OF APPLYING VARIOUS DOSES OF NITROGEN FERTILIZER ON SPRING TRITICALE IN THE CONDITIONS OF THE MOSCOW REGION

A.D. Alenicheva, O.A. Shchukina

Tsytyn Main Botanic Garden, Russian Academy of Sciences,
127276, Moskva, ul. Botanicheskaya, 4
E-mail: alenicheva_a@mail.ru

Nitrogen is a key element in achieving high yields of grain crops. The study of the reaction of new varieties to the use of nitrogen fertilizers in field experiments allows us to identify the most effective techniques for realizing potential yields in specific soil and climatic conditions. The research was carried out in 2020–2021 in the conditions of the Moscow region on sod-podzolic heavy loamy soils with a low humus content (1.3...1.7 %), high phosphorus content, average potassium content. The scheme of the experiment involved studying the effect of increasing and fractional doses of nitrogen fertilizer from 30 to 150 kg of active substance per hectare, introduced in the form of ammonium nitrate (NH_4NO_3). Fertilization was carried out manually by seedlings, in variants with fractional application, the second dose was introduced into the exit phase into the tube. The objects of research were the varieties of spring triticale Timiryazevskaya 42 and Botanicheskaya 4, registered in the State Register of Breeding Achievements in 2022. Nitrogen fertilizers increase the height of plants of the Timiryazevskaya 42 variety by 4.7...10.2 cm, and the Botanicheskaya 4 variety by 8.7...10.1 cm. At the same time, the lodging of crops in the prevailing meteorological conditions was not noted in all variants of the experiment. When applying nitrogen fertilizers in doses from 90 to 120 kg/ha, the increase in grain yield on the Timiryazevskaya 42 variety was 3.61...5.10 t/ha to control (without fertilizers), on the Botanicheskaya 4 variety – 2.71...2.42 t/ha. The highest yield in the experiment was obtained when applying nitrogen fertilizers on the Timiryazevskaya 42 variety at a dose of 120 kg/ha – 9.99 t/ha, on the Botanicheskaya 4 variety at a dose of 90 kg/ha – 7.16 t/ha. The removal of nutrients without fertilizers and high yields, when applying high doses of nitrogen fertilizers, indicate a higher yield potential of the Timiryazevskaya 42 variety, compared with the Botanicheskaya 4 variety.

Ключевые слова: яровая тритикале (\times Triticosecale), азотные удобрения, аммиачная селитра, сорт, урожайность, качество зерна, белок.

Key words: spring triticale (\times Triticosecale), nitrogen fertilizers, ammonium nitrate, grade, yield, grain quality, protein.

Азот (N) занимает значительное место в метаболизме растений. Все физиологические процессы в растениях связаны с белками, важным компонентом которых служит азот [1, 2]. Для увеличения урожайности сельскохозяйственных культур в условиях почв с низким плодородием азот выступает одним из самых необходимых элементов, без внесения которого невозможно производство значительного количества растениеводческой продукции [3, 4, 5]. Производство азотных удобрений в мире достигло 100 млн в год. Больше половины этого

объема используется для выращивания основных зерновых культур – пшеницы, риса, кукурузы [6]. Их применение без научного подхода приводит к снижению общего потребления азота растениями из удобрений, что в свою очередь сказывается на загрязнении окружающей среды.

Сортовая агротехника – важный аспект современного эффективного растениеводства, признанный во всем мире [7, 8]. Как правило, новые интенсивные сорта сельскохозяйственных культур обладают более высоким потенциалом урожайности, чем их предшественники.

*работа выполнена в рамках ГЗ ГБС РАН «Гибридизация у растений в природе и культуре: фундаментальные и прикладные аспекты» № Госрегистрации 122042500074–5.

Они предъявляют более высокие требования к плодородию почвы, агротехнике, средствам защиты растений и режиму минерального питания [9, 10]. Тритикале (*×Triticosecale*) – искусственно созданный и относительно новый в эволюционном смысле вид [11, 12]. Урожайность новых сортов тритикале значительно выросла за последние годы [13]. При испытании сорта Укро, включенного в Госреестр в 2000 г., средняя урожайность по Средневолжскому региону составляла 2,34 т/га, у сортов, зарегистрированных за последние 12 лет, она составляет 3,48 т/га. Максимальная урожайность в Государственном сортоиспытании отмечена у сорта яровой тритикале Доброе – 8,33 т/га. Новые сорта яровой тритикале, наряду с другими урожайными зерновыми культурами, нуждаются в научно-обоснованной корректировке доз вносимых удобрений при возделывании в различных почвенно-климатических условиях [14, 15].

Цель исследований – определить влияние азотного удобрения на урожайность новых сортов яровой тритикале в условиях дерново-подзолистых почв Московской области.

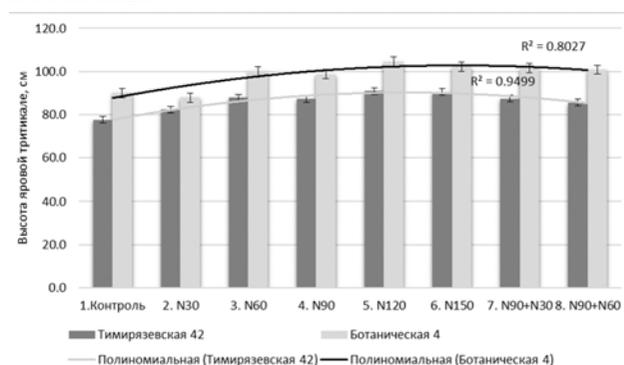
Методика. Работу проводили в 2020–2021 гг. в отделе отдаленной гибридизации ФГБУН Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина Российской академии наук (Московская область, г. о. Истра, п. Рождествено). Почва опытного участка дерново-подзолистая тяжелосуглинистая с высоким содержанием подвижного фосфора (P_2O_5) – 150...166 мг/кг и средним подвижного калия (K_2O) – 116...119 мг/кг (по Кирсанову), рН солевой вытяжки – 5,42...5,79 ед. (по ГОСТ 26483). Массовая доля органического вещества – 1,3...1,7 % (ГОСТ 26213).

Объектами исследований служили два новых сорта яровой тритикале (*×Triticosecale*) Тимирязевская 42 и Ботаническая 4, включенные в Государственный реестр селекционных достижений в 2022 г. [14]. Агротехника возделывания яровой тритикале общепринятая для зоны. Посев проводили рядовой сеялкой, норма высева – 5,0 млн шт. всхожих семян на 1 га. Схема опыта включала варианты с внесением удобрения в виде аммиачной селитры (NH_4NO_3) в дозах 30, 60, 90, 120 и 150 кг действующего вещества азота в пересчете на 1 га (далее кг/га азота) по всходам, а также дробное – 90 кг/га по всходам в сочетании с 30 и 60 кг/га в фазе выхода в трубку. Контролем служил вариант без удобрения. Размещение делянок рандомизированное, повторность – 4-кратная. Общая площадь делянки 14 м², учетная 10 м². Учеты и наблюдения проводили по общепринятым методикам, которые предусматривали фенологические наблюдения и биометрические измерения роста и развития растений по фазам вегетации. Уборку проводили селекционным комбайном SAMPO-130 при влажности зерна от 14 до 18 % (в зависимости от метеорологических условий года). Перед уборкой для определения биологической урожайности и структуры урожая с каждого варианта опыта отбирали пробный сноп с площади 0,25 м². Для оценки влияния азотного удобрения на урожайность яровой тритикале учитывали вынос макроэлементов (азот, фосфор, калий) с основной и побочной продукцией. Для анализа отбирали объединенный образец с каждого варианта. Содержание общего азота, фосфора и калия в растительном материале (зерно, солома) определяли после мокрого озольнения по К. Е. Гинзбург по стандартной методике. Оценка качества зерна изучаемых сортов проводили в лаборатории маркерной и геномной селекции ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии» на БИК анализаторе «ИнфраЛЮМ ФТ-12». Полученные данные обрабатывали методом

дисперсионного анализа (Доспехов Б. А. Методика полевого опыта, 1985) с использованием программы Excel.

В 2020 г. температурный режим был близок к средне-многолетним значениям с небольшим повышением во второй и третьей декаде июня. Количество осадков с третьей декады мая по вторую декаду июня почти в 4 раза превышало норму. Эти условия отрицательно сказались на цветении и формировании зерна яровой тритикале. В 2021 г. благоприятные условия для роста и развития яровой тритикале сложились только в первой половине вегетации. Отсутствие осадков в июле (ГТК – 0,5), когда растения яровой тритикале находились в фазе колошения-начало цветения, привело к сокращению количества колосков в колосе и зерен в колосках.

Результаты и обсуждение. Азотные удобрения, внесенные в начальные фазы вегетации, наибольшее влияние оказывают на вегетативные органы растений [16]. Изучаемые в опыте дозы оказывали влияние на высоту растений яровой тритикале, начиная с фазы выхода в трубку и до молочной спелости (см. рисунок). Растения сорта Ботаническая 4 были в среднем на 6...8 см выше, чем у сорта Тимирязевская 42, что служит их фенотипическим признаком [14, 16]. В фазе молочной спелости внесение азотного удобрения в дозах 60...90 кг/га увеличивало рост растений сорта Тимирязевская 42 на 4,7...10,2 см, сорта Ботаническая 4 – на 8,7...10,1 см. Наиболее сильное влияние на обоих сортах отмечено в варианте N_{120} . Эта доза увеличила высоту растений сорта Тимирязевская 42, по сравнению с контролем, на 17,2 %, сорта Ботаническая 4 – на 16,2 %. При этом внесение азота в дозе 150 кг/га сопровождала тенденция уменьшения высоты растений обоих сортов. В ранее проведенных исследованиях было доказано наличие генов короткостебельности (ржаного происхождения – *Ddw1* и пшеничного происхождения – *Rht-B1b*) в линиях яровой тритикале, послуживших исходным материалом для создания сорта Тимирязевская 42 [17, 18, 19]. Они действуют на высоту растений даже при высоких дозах азотного удобрения и нивелируют эффект от их внесения, что отражается на устойчивости сорта к полеганию.



Высота яровой тритикале в фазе молочной спелости в зависимости от доз азотного удобрения (среднее за 2020–2021 гг.), см.

Изучаемые в опыте сорта в сложившихся почвенно-климатических условиях продемонстрировали достаточно высокую урожайность, которая у сорта Тимирязевская 42 варьировала от 4,89 т/га в контроле до 9,99 т/га при внесении N_{120} , у сорта Ботаническая 4 – от 4,45 т/га в контроле до 7,16 т/га при использовании N_{90} (табл. 1). Применение относительно небольшой дозы азотного удобрения – 30 кг/га приводило к увеличению сбора зерна на 20,7...28,3 %. Однако такая прибавка была статистически достоверна не во все годы исследований.

Табл. 1. Урожайность зерна яровой тритикале сортов Тимирязевская 42 и Ботаническая 4 (среднее за 2020–2021 гг.)

Вариант	Тимирязевская 42, т/га	Прибавка к контролю, %	Ботаническая 4, т/га	Прибавка к контролю, %
Контроль	4,89	-	4,45	-
N ₃₀	5,90	20,7	5,71	28,3
N ₆₀	8,23	68,3	5,83	31,0
N ₉₀	8,50	73,8	7,16	60,9
N ₁₂₀	9,99	104,3	6,87	54,4
N ₁₅₀	8,13	66,3	6,68	50,1
N ₉₀ +N ₃₀	8,22	68,1	6,10	37,1
N ₉₀ +N ₆₀	7,63	56,0	6,13	37,8
НСР ₀₅	1,30	-	0,70	-

Наибольший рост урожайности, по отношению к варианту без применения азотного удобрения, отмечен при внесении азота в дозах от 90 до 120 кг/га. На сорте Тимирязевская 42 прибавки составляли 3,61...5,10 т/га, на сорте Ботаническая 4 – 2,71...2,42 т/га.

Дробное внесение азотного удобрения на сорте Тимирязевская 42 давало положительный эффект, сравнимый с применением разовой подкормки в дозах 60...90 кг/га. На сорте Ботаническая 4 эффективность дробного внесения была на уровне разовой дозы 60 кг/га. Вторая доза азотных удобрений, внесенная в фазе выхода в трубку, не влияла на урожайность, так как закладка продуктивности растений происходит в более ранние фазы. Из-за короткого вегетационного периода (по сравнению с озимыми культурами), дробное внесение азотного удобрения на яровой тритикале необходимо проводить только с целью улучшения качественных характеристик зерна.

Изучаемые сорта яровой тритикале имеют свои биологические особенности, которые проявились в разнице выноса основных элементов питания при внесении возрастающих и дробных доз азотного удобрения. Сорт Тимирязевская 42 не только характеризовался самой высокой урожайностью во всех изучаемых вариантах, но и наибольшим выносом основных элементов питания на единицу продукции (табл. 2). Вынос общего азота составлял от 21,3 до 31,9 кг/т. Закономерностей в размерах его выноса от доз азотного удобрения не отмечено. Так, самый низкий вынос зафиксирован на фоне максимальной дозы азотного удобрения N₁₅₀, а самый

Табл. 2. Вынос элементов питания с урожаем основной и побочной продукции сортами яровой тритикале (среднее за 2020–2021 гг.), кг/га

Вариант	N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
	зерно	солома	зерно	солома	зерно	солома
Контроль	83	55	46	26	31	92
	75	31	34	16	26	70
N ₃₀	134	54	70	35	35	123
	100	38	53	15	38	62
N ₆₀	152	57	69	28	55	134
	105	77	54	18	40	96
N ₉₀	162	55	72	35	29	146
	138	88	54	16	50	121
N ₁₂₀	197	63	97	48	50	154
	119	57	52	24	46	104
N ₁₅₀	125	48	72	67	30	151
	114	32	53	49	36	149
N ₉₀ +N ₃₀	140	77	70	41	51	146
	103	36	49	18	39	128
N ₉₀ +N ₆₀	144	49	76	37	44	123
	120	42	51	16	36	125

*в числителе данные по сорту Тимирязевская 42, в знаменателе – по сорту Ботаническая 4

высокий – в варианте N₃₀. Вынос фосфора растениями яровой тритикале сорта Тимирязевская 42 варьировал от 11,8 до 17,8 кг/т основной и соответствующего количества побочной продукции, калия – от 21,5 до 26,8 кг/га. Вынос элементов питания основной и соответствующим количеством побочной продукции сортом Ботаническая 4 по фосфору был ниже, чем сортом Тимирязевская 42, а по азоту и калию на одном уровне. Повышенный вынос элементов минерального питания растениями сорта Тимирязевская 42 без внесения удобрений, по сравнению с сортом Ботаническая 4, свидетельствует о более высокой его потенциальной урожайности.

Один из важных показателей эффективности азотного удобрения – качество зерна [20]. В зерне сорта яровой тритикале Тимирязевская 42 при внесении различных доз азотного удобрения накапливается от 11,2 до 14,3 % белка. Без внесения удобрения его содержание в среднем составляло 9,3 %. Сорт отзывался на дробное использование азотного удобрения увеличением содержания белка в зерне на 2...3 %, в сравнении с разовым внесением. Сорт яровой тритикале Ботаническая 4 без внесения удобрений накапливал чуть большее белка в зерне, чем Тимирязевская 42. При этом уровень обеспеченности растений азотом оказывал значительное влияние на содержание белка. В среднем без его внесения величина этого показателя составляла 11,5 %, при внесении возрастающих и дробных доз – 12,4...12,7 %.

Выводы. На дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почвах с низкой обеспеченностью гумусом без внесения удобрений сорт яровой тритикале Тимирязевская 42 формирует урожайность зерна 4,89 т/га, Ботаническая 4 – 4,45 т/га. Внесение азотного удобрения в дозах от 30 до 150 кг/га обеспечивает формирование прибавки зерна соответственно 20,7...104,3 % и 28,3...60,9 %. Наиболее эффективной дозой азота в сложившихся метеорологических условиях на сорте Тимирязевская 42 была 120 кг/га (урожайность 9,99 т/га), на сорте Ботаническая 4 – 90 кг/га (урожайность 7,16 т/га). Дробное внесение азотного удобрения (первая часть по всходам, вторая в фазе выхода в трубку) повышало сбор зерна соответственно на 2,74...3,33 т/га и 1,65...1,68 т/га, что сопоставимо с урожайностью при разовом внесении азотного удобрения в дозе 60...90 кг/га. Дробное использование удобрения не имело преимущества перед разовым, так как не обеспечило увеличения количества белка в зерне, но повышало риск полегания растений и прорастания зерна в колосе.

Литература

1. *The Efficiency of using nitrogen fertilizers in wheat crop / A. L. Agapie, N. M. Horablaga, C. Bostan, et al. // Life Science and sustainable development. 2021. Vol. 2. No. 1. URL: <https://lssd-journal.com/index.php/lssd/article/view/71> (дата обращения: 17.05.2023). doi: 10.58509/lssd.v2i1.71.*
2. *Завалин А. А. Биологический и минеральный азот в земледелии России, М.: ВНИИА. 2022. 256 с.*
3. *Сорбция аммонийного азота почвами и грунтами различного гранулометрического состава / П. А. Афанасьев, К. В. Белоусова, В. А. Литвинский и др. // Проблемы агрохимии и экологии. 2016. № 3. С. 26–29.*
4. *Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review / C. Baoqing, L. EnKe, T. Qizhuo, et al. // Agronomy for Sustainable Development. 2014. No. 34. С. 429–442.*
5. *The Influence of Plants on the Migration and Transformation of Nitrogen in Plant-Soil Systems: a Review / Z. Bei, C. Liang, J. Song, et al. // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2022. No. 22. С. 4084–4102.*

6. *Global nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice, and wheat production systems* / J. K. Ladha, A. Tirol-Padre, C. K. Reddy, et al. // *Scientific reports*. 2016. Vol. 6. No. 1. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26778035/> (дата обращения 17.05.2023). doi: 10.1038/srep19355.
7. Вынос элементов питания и окупаемость минеральных удобрений урожаям сортов озимой пшеницы в технологиях разного уровня интенсивности / Н. Я. Ребук, П. М. Политыков, В. Н. Капранов и др. // *Вестник РУДН. Серия: агрономия и животноводство*. 2019. Т. 14. № 2. С. 142–153.
8. *Influence of mineral and organic fertilizers on yield and nitrogen efficiency of winter wheat* / Š. Buráňová, J. Černý, M. Kulhánek, et al. // *International Journal of Plant Production*. 2015. Vol. 9. No. 2. С. 257–272.
9. Вильдфлуш И. Р., Козотко Е. И. Сортовая отзывчивость яровой пшеницы на условия минерального питания на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // *Почвоведение и агрохимия*. 2012. № 1. С. 82–89.
10. Сандухадзе Б. И. Журавлева Е. В. Азотная подкормка современных интенсивных сортов озимой пшеницы в условиях Центрального Нечерноземья // *Питание растений*. 2012. № 2. С. 2–6.
11. Урожайность, пластичность и стабильность озимого тритикале в условиях Московской области / И. Н. Ворончихина, В. В. Ворончихин, В. С. Рубец и др. // *Аграрный научный журнал*. 2020. № 12. С. 8–10.
12. Грабовец А. И. Проблемы селекции и семеноводства зерновых культур и перспективы научноинновационного обеспечения агропромышленного комплекса регионов // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 8. С. 10–13.
13. Крохмаль А. В., Грабовец А. И. Показатели адаптивности сортов озимого тритикале в условиях усиления аридности климата на Северо-западе Ростовской области // *Вестник Российской сельскохозяйственной науки*. 2022. № 3. С. 44–48.
14. Абделькави Р. Н. Ф., Соловьев А. А. Особенности формирования качества зерна яровой тритикале в контрастных погодно-климатических условиях // *Зерновое хозяйство России*. 2020. № 2 (68). С. 3–7.
15. *Morphophysiological features of the Reaction of the cv. ×Triticosecale Wittm. ex. Camus on Nitrogen Fertilizers in contrasting Agrometeorological Conditions* / O. Shchuklina, A. Alenicheva, I. Klimenkova, et al. // *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 10. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1010/1/012109> (дата обращения: 17.05.2023). doi: 10.1088/1755-1315/1010/1/012109.
16. Потребление азота, фосфора и калия растениями различных сортов озимой пшеницы в зависимости от условий минерального питания / О. Ю. Гудиев, Т. Г. Зеленская, А. О. Касаткина и др. // *Земледелие*. 2019. № 7. С. 24–27.
17. Тимирязевская 42 – новый сорт яровой тритикале (×Triticosecale Wittm. ex. Camus) / О. А. Щуклина, А. А. Соловьев, Е. С. Полховская и др. // *Кормопроизводство*. 2022. № 8. С. 43–46.
18. Изучение эффекта генов короткостебельности пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и ржи (*Secale cereal* L.) на примере расщепляющийся популяции яровой тритикале в условиях вегетационного опыта / П. Ю. Крушин, А. Г. Черноок, Г. И. Карлов и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2019. Т. 54. № 5. С. 920–933.
19. Анализ распределения генов короткостебельности пшеницы и ржи среди сортообразцов яровой гексаплоидной тритикале (*Triticosecale Wittm.*) / А. Д. Коришунова, М. Г. Дивашук, А. А. Соловьев и др. // *Генетика*. 2015. Т 51. № 3. С. 334–340.
20. Агротехнические и агрохимические аспекты оптимизации азотного питания озимой тритикале на дерново-подзолистой почве Центрального Нечерноземья РФ / В. В. Конончук, С. М., Тимошенко А. М. Медведев и др. // *Аграрная Россия*. 2022. № 4. С. 7–14.

Поступила в редакцию 22.03.2023

После доработки 23.04.2023

Принята к публикации 11.05.2023

Зоотехния и ветеринария

УДК 636.034:636.082

DOI: 10.31857/S2500262723030110, EDN: EZZSGM

АССОЦИАЦИЯ ПОЛИМОРФИЗМА ГЕНА КОЭНЗИМ Q9 (COQ9) С ПОКАЗАТЕЛЯМИ РЕПРОДУКТИВНЫХ КАЧЕСТВ ГОЛШТИНСКИХ КОРОВ***Н.Ю. Сафина**, кандидат биологических наук, **З.Ф. Фаттахова**, кандидат биологических наук, **Э.Р. Гайнутдинова**, аспирант, **Ш.К. Шакиров**, доктор сельскохозяйственных наукТатарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства
Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»,
420059, Казань, Оренбургский тракт, 48
E-mail: natysafina@gmail.com

Исследования проводили в 2019–2022 г. с целью изучения ассоциаций полиморфизма гена коэнзим Q9 (COQ9), влияющего на энергетические и метаболические процессы в организме, с показателями репродуктивных качеств коров-первотелок голштинской породы. Опытное поголовье (251 гол.) подбирали из животных-аналогов, содержащихся в равных условиях в хозяйстве, благополучном по инфекционным и инвазионным заболеваниям. ДНК-тестирование аллельного полиморфизма $G \rightarrow A$ (гуанин \rightarrow аденин) гена COQ9, вследствие которого происходят изменения в окислительном фосфорилировании, что отражается на дыхательной функции митохондрий, осуществляли методом ПЦР-ПДРФ. В локусе гена COQ9 – BstMB I идентифицированы два аллеля ($A - 0,604$; $G - 0,396$) и три генотипа ($AA - 36,6\%$; $AG - 48,2\%$; $GG - 15,5\%$), что свидетельствует о генетическом биоразнообразии популяции. Хи-квадрат принимает значение намного ниже критического (0,05). Популяция находится в генетическом равновесии согласно закону Харди-Вайнберга. Изучены признаки воспроизводительной способности коров-первотелок разных генетических групп по гену COQ9. По результатам анализа взаимосвязей показателей фертильности и генотипов гена COQ9 особи с генотипом COQ9AA отличались повышенной живой массой во время осеменения и при отеле. Животные с генотипом COQ9AG характеризовались поздним возрастом первого плодотворного осеменения, при этом количество затраченных спермодоз было наименьшим. Первотелки группы COQ9AG отличались самым непродолжительным межотельным, сухостойным и сервис-периодом, и, как следствие, большим выходом живых телят, высоким индексом Дохи и коэффициентом воспроизводительной способности. Влияние генетических факторов на репродуктивные качества крупного рогатого скота позволяют разрабатывать системы управления продуктивностью сельскохозяйственных животных на основе применения молекулярно-генетических методов.

ASSOCIATION OF COENZYME Q9 (COQ9) GENE POLYMORPHISM WITH TRAITS OF REPRODUCTIVE QUALITIES OF HOLSTEIN COWS**N.Yu. Safina, Z.F. Fattakhova, E.R. Gaynutdinova, Sh.K. Shakirov**Tatar Scientific Research Institute of Agriculture – Subdivision of the Federal
State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of Russia Academy of Sciences»,
420059, Kazan, Orenburgsky tract, 48
E-mail: natysafina@gmail.com

The paper presents the results in 2019–2022 of studying the associations of polymorphism of the coenzyme Q9 (COQ9) gene, which affects the energy and metabolic processes in the body, with traits of the reproductive qualities of Holstein heifers. The experimental population was selected from animal analogues (251 heads). DNA testing of allelic polymorphism $G \rightarrow A$ (guanine \rightarrow adenine) of the COQ9 gene, which results in changes in oxidative phosphorylation, that affects the respiratory function of mitochondria, was carried out by PCR-RFLP. Two alleles ($A - 0.604$; $G - 0.396$) and three genotypes ($AA - 36.6\%$; $AG - 48.2\%$; $GG - 15.5\%$) have been identified, in the COQ9 – BstMB I gene locus, that indicates genetic biodiversity populations. The chi-square takes on a value well below the critical value (0.05). The population is in genetic equilibrium according to the Hardy-Weinberg law. The traits of the reproductive ability of cows (251 animals) of different genetic groups of the COQ9 gene have been studied. An analysis of the relationship between fertility rates and genotypes of the COQ9 gene showed that individuals with the COQ9AA genotype were characterized by increased live weight during insemination and at calving. Animals with the COQ9AG genotype were characterized by a later age of the first fruitful insemination, while the number of sperm doses spent on them was minimal. The same group of heifers had the shortest calving interval, open day and service period and, as a result, a greater yield of live calves, a high fertility index of Dohi and a reproductive ability coefficient. The data presented in our research prove the influence of genetic factors on the reproductive qualities of cattle, which makes it possible to develop systems for managing the productivity of farm animals based on the use of molecular genetics methods.

Ключевые слова: ген, генотип, полиморфизм, коэнзим Q9, COQ9, фертильность, воспроизводительные качества, отел, осеменение, первотелки, крупный рогатый скот

Key words: gene, genotype, polymorphism, coenzyme Q9, COQ9, fertility, reproductive qualities, calving, insemination, heifers, cattle

Генетическая селекция крупного рогатого скота, которую исторически проводили путем сохранения особей с желательным фенотипом в качестве родителей для последующих поколений, открывает все больше возможностей для таких новых технологий, как гентипирование, генетическое картирование и селекция

с использованием маркеров. Молочная продуктивность и репродуктивная способность коров нередко находятся в обратной зависимости – с повышением удоев снижаются воспроизводительные качества [1].

Идентификация специфических аллелей, ответственных за генетическую изменчивость воспроизво-

*подготовлено в рамках государственного задания Эколого-генетические подходы к созданию и сохранению ресурсов растений и животных, расширению их адаптивного потенциала и биоразнообразия, разработка сберегающих агротехнологий с целью повышения устойчивости производства высококачественной продукции, достижения безопасности для здоровья человека и окружающей среды. Номер регистрации: 122011800138-7

дительных качеств, расширила бы возможности отбора животных по показателям репродуктивной функции [2, 3, 4]. Многие из идентифицированных мутаций, влияющих на фертильность, на сегодняшний день, представляют собой аллели с потерей функций, которые часто летальны для эмбрионов, например, HH1 – гаплотип фертильности у голштинского крупного рогатого скота [5, 6]. Из-за отсутствия генетического контроля и неправильного подбора родительских пар в популяциях происходит накопление нежелательных аллелей [7], что в результате сказывается не только на генетическом биоразнообразии, но и на качестве потомства [8].

Ген *COQ9* (*coenzyme Q9*, *коэнзим Q9*, *кофермент Q9*) идентифицирован и охарактеризован как новый ген, который при мутации приводит к Q-дефицитному фенотипу, подобно другим генам *COQ* [9]. Однонуклеотидный полиморфизм гена *COQ9* (NC001039767.1) картирован в положении 159 в *bovine coenzyme Q9* (rs109301586) на хромосоме 18 (18:25527339). Миссенс-мутация вызывает изменение G → A (гуанин → аденин), что приводит к замене аминокислоты с аспарагиновой кислоты на аспарагин в положении 53 белка и влечет за собой изменения в окислительном фосфорилировании, что отражается на дыхательной функции митохондрий [4].

Высказано предположение, что мутация коэнзима Q9 модулирует размножение, посредством регуляции энергетического метаболизма в митохондриях, что, в свою очередь, влияет на послеродовой энергетический баланс [4]. Дефицит фермента CoQ в ооцитах у мышей, сопровождается рядом фенотипических изменений, характерных для митохондриальной дисфункции ооцитов, связанной с репродуктивным старением [10]. Кроме того, результаты исследований свидетельствуют о влиянии полиморфизма гена *COQ9* на продолжительность интервала между отелом и зачатием или длительность сервис-периода [3, 11, 12], коэффициент оплодотворяемости коров, кратность осеменения [4, 13], динамику живой массы после отела [4], потребление корма перед отелом [13]. Ранее сообщалось об отсутствии статистически значимой разницы по уровню молочной продуктивности и качественному составу молока коров разных генотипов по гену *COQ9* [4], однако другие исследователи указывают на то, что у животных с генотипом *COQ9GG* установлено повышенное содержание соматических клеток в продукции [13]. Такие результаты дают возможность предполагать, что полиморфизм гена *COQ9* может быть перспективным геном-маркером для исследований, направленных на отбор коров по репродуктивной эффективности без негативного влияния на молочную продуктивность.

Цель исследования – определение взаимосвязи полиморфизма гена *COQ9* с показателями репродуктивных качеств коров-первотелок голштинского скота.

Методика. Работу проводили в 2019–2022 гг. на биологическом материале 251 гол. коров-первотелок голштинской породы СХПК «Племенной завод им. Ленина» Атинского района Республики Татарстан. Опытное поголовье подбирали из животных-аналогов, содержащихся в равных условиях в хозяйстве благополучном по инфекционным и инвазионным заболеваниям. Отбор образцов цельной крови осуществляли в вакуумные пробирки К-3 (APEXLAB, Китай), содержащие коагулянт EDTA, из хвостовой вены животных. Все примененные международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены. На проведение исследований было получено разрешение от Комиссии по биоэтике Федерального государственного бюджетного учреждения науки

«Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» № 22/7 от 09 июня 2022 г.

Для выделения ДНК из проб использовали специальный набор («АмплиПрайм» ДНК-Сорб В), производимый ООО «ДНК-технологии» (NextBio, Россия), по методике, рекомендованной заводом-изготовителем. Фрагменты ДНК амплифицировали на программируемых термоциклерах «MyCycler» и «T100 Thermal Cycler» (BIO RAD, США) в оптимальных температурно-временных режимах, разработанных для комплекта праймеров (Евроген, Россия), со следующей олигонуклеотидной последовательностью:

COQ9 F: 5' – AGT TTC TGT TTC AGT GCC CCG – 3'

COQ9 R: 5' – GCA GGT GTT CTG ATG CCT ACC – 3' [12].

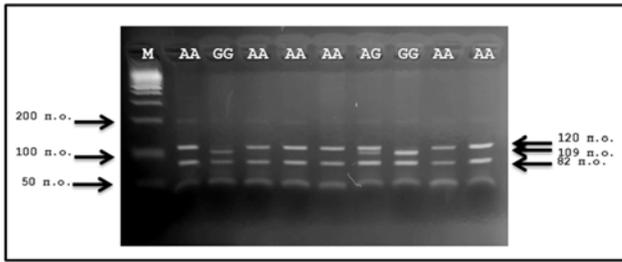
Для раствора ПЦР использовали следующие реактивы: дионизированную воду, смесь dNTPs, *Taq*-полимеразу с поставляемым буфером (СибЭнзим, Россия). Реакционные смеси, включающие в себя 2 мкл очищенной ДНК, готовили общим объемом 20 мкл. Реакционную смесь, содержащую эндонуклеазу рестрикции *BstMB I* (СибЭнзим, Россия), общим объемом 5 мкл вносили в пробирки с амплификонами и подвергали гидролизу в течение 2 ч. при температуре 65 °С. Для определения полиморфизма гена *COQ9* амплифицированные фрагменты, обработанные рестриктазой, разделяли в агарозном геле 2,6 % с добавлением 5 мкл 10 %-ного бромистого этидия в 1хТБЕ-буфере в камере для горизонтального фореза (Helicon, Россия) при напряженности электрического поля в 20 В/см в течение 20 мин. Визуализацию и фиксирование проводили с использованием системы документирования «Gel&Doc» и «GelDoc Go» с программным обеспечением «Image Lab Touch» V. 3.0 (BIO RAD, США) (Bio-Rad, США). Идентификацию генотипов осуществляли по выявляемому полиморфизму последовательностей ДНК.

Анализ показателей воспроизводительных качеств подопытных животных проводили по данным из официальной информационно-аналитической системы «СЕЛЭКС. Молочный скот 9.1.1.0» (АРМ Плинор, Россия), содержащей первичные данные племенного, ветеринарного и зоотехнического учета по стаду, установленной на ПК в отделе физиологии, биохимии, генетики и питания животных ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН. Частоту встречаемости отдельных аллелей генотипов определяли по формуле Е. К. Меркурьевой (1983), генетическое равновесие в популяциях по гену *COQ9* рассчитывали на основе закона Харди-Вайнберга методом хи-квадрат (χ^2).

Из первотелок с установленными генотипами были сформированы опытные группы для исследования хозяйственно-полезных признаков животных. Коэффициент воспроизводительной способности – показатель, характеризующий плодовитость маточного поголовья, Индекс Дохи – обобщенный показатель, отражающий пожизненную плодовитость самки, расчетный выход живых телат на 100 коров в год определяли по стандартным методикам в зоотехнии [14].

Экспериментальный материал обрабатывали в программе MS Excel на ПЭВМ методами статистического анализа. Достоверность данных между независимыми выборками проверяли с использованием *t*-критерия Стьюдента.

Результаты и обсуждение. В результате полимеразной цепной реакции, были получены цельные фрагменты длиной 202 пар оснований (п.о.). Дальнейшая их обработка эндонуклеазой рестрикции *BstMB I* и электрофоретическое разделение дали сочетания, позволившие



Электрофореграмма разделения продуктов ПЦР-ПДРФ в агарозном геле (M – ДНК-маркер 50...1000 п.о.).

идентифицировать различные генотипы по гену *COQ9* (см. рисунок), которые были представлены следующим количеством оснований: *COQ9AA* – 120 и 82 п.о.; *COQ9GG* – 109 и 82 п.о.; *COQ9AG* – 120, 109 и 82 п.о.

По результатам детекции, на основе сочетания фрагментов, были выявлены все аллели и генотипы (табл. 1), что свидетельствует о наличии генетического разнообразия по гену коэнзим *Q9* в исследуемой популяции. Установленное распределение аллелей *COQ9A* и *COQ9G* составило 0,604 и 0,396 соответственно. В поголовье наблюдали преобладание «нормального» аллеля над «мутантным». В ожидаемом распределении отмечен статистически незначимый сдвиг в сторону нарастания гомозиготности (0,2 %). При этом, например, у голштинского скота Бразилии [13] и Мексики [12] частота встречаемости аллеля *COQ9A* варьировала от 0,446 до 0,460, аллеля *COQ9G* – от 0,524 до 0,540, а соотношение аллелей *A* и *G* у американского голштинского скота в двух разных популяциях составляло 0,479 к 0,524 [4] и 0,491 к 0,509 [3] соответственно. Таким образом, в упомянутых работах зарубежных авторов, изучавших голштинский скот, в отличие от наших данных, доминировал аллель *COQ9G*, имея некоторую вариативность в распределении. Вероятно, это могло быть связано с ареалом обитания скота или обусловлено генетической наследственностью из-за отсутствия селекции.

Табл. 1. Частота встречаемости аллелей и генотипов гена *COQ9* в популяции коров-первотелок

Распределение	Генотип						Аллель		χ^2
	AA		AG		GG		A	G	
	n	%	n	%	n	%			
Наблюдаемое	91	36,3	121	48,2	39	15,5	0,604	0,396	0,02
Ожидаемое	91	36,4	120	47,9	40	15,7			

В результате оценки вариативности наблюдаемого и ожидаемого распределения идентифицированных генотипов методом хи-квадрат установлено, что исследуемая популяция находится в генетическом равновесии согласно закону Харди-Вайнберга по гену *COQ9*. Величина χ^2 (0,02) была значительно ниже критического уровня ($\chi^2_{крит} = 5,99$). Частота встречаемости генотипов *COQ9AA*, *COQ9AG* и *COQ9GG* в популяции коров-первотелок составила соответственно 36,3 %, 48,2 и 15,5 %. Как и в нашем исследовании, наибольшее число животных (53,6...56,0 %) имели гетерозиготный генотип *COQ9AG*. Однако среди гомозиготных особей в татарстанской популяции голштинских коров-первотелок наблюдается количественное преобладание генотипа *COQ9AA* над *COQ9GG*, в отличие от данных из других источников, согласно которым доля особей с генотипом *COQ9AA* в среднем составляла 17,8...20,0 %, с генотипом *COQ9GG* – 25,5...28,6 % [4, 12, 13].

Достоверно ($p < 0,05$) более ранний возраст первого плодотворного осеменения отмечен у особей с генотипом *COQ9GG*, он наступал быстрее, чем у животных с генотипом *COQ9AG*, на 0,6 мес. (табл. 2). У нетелей с генотипом *COQ9AA* отмечали промежуточное значение. По живой массе при первом осеменении первотелки с генотипом *COQ9AA* превосходили животных с генотипом *COQ9AG* на 1,4 %, *COQ9GG* – на 1,5 %. Ко времени первого плодотворного осеменения коров с генотипом *COQ9AA* эта разница увеличивалась до статистически значимой ($p < 0,05$) и составляла, в сравнении с субпопуляцией, имеющей генотип *COQ9GG*, 14,6 кг, *COQ9AG* – 12,2 кг (или 3,4 и 2,8 %). При первом отеле достоверное превышение живой массы особей с генотипом *COQ9AA* над животными с генотипом *COQ9GG* составило 11,5 кг (2,2 %; $p < 0,05$). В зарубежных исследованиях похожую картину в динамике наблюдали в виде тенденции [4]. Наблюдаемое превосходство группы с генотипом *COQ9AA*, по сравнению с *COQ9AG* было равно 5,2 кг, или менее 1,0 %.

Кратность осеменения в зависимости от генотипа по гену *COQ9* не имела статистически значимых различий, принимая минимальный уровень у особей с генотипом *COQ9AG* – 1,08, и незначительно варьируя в других группах животных от 1,14 до 1,16. Достоверно значимые ассоциации установлены в исследовании М. S. Ortega и др. при изучении фертильности голштинских коров в зависимости от гена *COQ9*, которые установили, что коровы с генотипом *COQ9AA* характеризовались лучшими генетическими достоинствами по воспроизводительной способности, в том числе минимальной кратностью осеменения и большей частотой наступления стельности [4]. Michel-Regalado и др. (2020) в своих исследованиях установили, что для осеменения *COQ9AG*-животных требуется меньше сперматозоидов, по сравнению с гомозиготными коровами [12].

Продолжительность сервис-периода отражает плодовитость животных и организацию воспроизводства стада. При сопоставлении первотелок с генотипами *COQ9AA* (132,8 дн.) и *COQ9AG* (116,3 дн.) у гетерозиготных животных наблюдается укороченный сервис-период, со статистически достоверной разницей 16,5 дней (12,4 %; $p < 0,05$). Схожие данные представлены и в других источниках [12]. Продолжительность межотельного периода в зависимости от генотипа по гену *COQ9* варьирует незначительно 385,8...389,4 дня. У особей с генотипами *COQ9AA* и *COQ9GG* длительность сухостойного периода была больше, чем у животных с генотипом *COQ9AG*, соответственно на 5,1 день (5,3 %; $p < 0,05$) и 4,6 дней (7,9 %). Другие исследователи считают, что лучшими показателями репродуктивных качеств и самым коротким интервалом от отела до следующего плодотворного осеменения отличаются коровы с генотипом *COQ9AA* [4, 13].

Судя по величине индекса плодовитости коров, введенному Дохи, возраст первого отела и продолжительность межотельного периода не у всех животных находится в диапазоне физиологических норм. В целом по изучаемой популяции он варьировал от 46,9 до 47,6 ед., что соответствует среднему значению для первотелок. Выход живых телят на 100 гол. первотелок с разными генотипами, установленный расчетным методом, свидетельствует о высокой репродуктивной функции оцениваемых животных. Между группами особей с генотипами *COQ9AG* и *COQ9AA* отмечена статистически значимая разница 5,8 гол. (6,6 %; $p < 0,05$), что выгодно характеризует гетерозиготных первотелок. Наибольший в опыте коэффициент воспроизводительной способности

Табл. 2. Показатели воспроизводительной способности коров-первотелок с разными генотипами гена *COQ9*

Показатель	Генотип AA	Генотип AG	Генотип GG
Возраст 1 плодотворного осеменения, мес.	18,1±0,31	18,2±0,25*	17,6±0,17
Живая масса при 1 осеменении, кг	422,9±3,3	416,4±3,4	416,8±5,7
Живая масса при 1 плодотворном осеменении, кг	432,2±3,9*	420,0±3,5	417,6±5,8
Живая масса при 1 отёле, кг	529,9±4,6*	524,7±4,2	518,4±3,3
Кратность осеменения	1,14±0,04	1,08±0,02	1,16±0,08
Сервис-период, дн.	132,8±6,7*	116,3±4,9	122,71±10,9
Межотёльный период, дн	389,4±6,3	385,8±5,8	387,8±8,2
Сухостойный период, дн.	58,7±1,8*	53,6±1,5	58,2±2,2
Индекс плодovitости Дохи	46,9±0,8	47,1±0,5	47,6±0,8
Выход телят на 100 коров, гол.	81,5±2,0	87,3±1,6*	85,0±2,2
Коэффициент воспроизводительной способности	0,94±0,01	0,95±0,01	0,94±0,02

**p* < 0,05 уровень значимости по отношению к меньшему показателю

отмечен в группе животных с генотипом *COQ9AG*–0,95, однако это превосходство носило характер тенденции. В разрезе других групп генотипов гена *COQ9* его уровень составил 0,94, что на 0,01 ед. (или 1,1 %) хуже показателя, наблюдаемого у *COQ9AG*-коров.

Выводы. Таким образом, данные, представленные в нашей работе, свидетельствуют о биоразнообразии и генетическом равновесии в популяции. Определены взаимосвязи полиморфизма гена *COQ9* с показателями репродуктивных качеств коров-первотелок голштинского скота, которые доказывают влияние генетических факторов на признаки воспроизводства крупного рогатого скота.

Установлено, что животные-носители гетерозиготного генотипа *COQ9AG*, несмотря на более поздний возраст первого плодотворного осеменения, характеризуются хорошим уровнем фертильности: имеют максимальный выход живых телят на 100 гол. коров и высокий коэффициент воспроизводительной способности, при относительно недолгих межотёльном, сухостойном и сервис-периодах.

Эти знания имеют теоретическую и практическую значимость и создают предпосылки, позволяющие разработать системы управления продуктивностью сельскохозяйственных животных на основе применения молекулярно-генетических, физиологических и экологических методов и подходов.

Литература:

1. Гайнутдинова Э.Р., Сафина Н.Ю., Шакиров Ш.К. Совместимость молочной продуктивности и воспроизводительной способности коров-первотелок голштинской породы // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2020. Т. 15. № 2 (58). С. 5–9.
2. *Genome-wide association study for endocrine fertility traits using single nucleotide polymorphism arrays and sequence variants in dairy cattle* / A.M.M. Tenghe, A.C. Bouwman, B. Berglund, et al. // *Journal of Dairy Science*. 2016. Vol. 99. P. 5470–5485. doi. 10.3168/jds.2015-10533.
3. *Use of single nucleotide polymorphisms in candidate genes associated with daughter pregnancy rate for prediction of genetic merit for reproduction in Holstein cows* / M.S. Ortega, A.C. Denicol, J.B. Cole et al. // *Animal Genetics*. 2016. Vol. 47. P. 288–297. doi.10.1111/age.12420
4. *A single nucleotide polymorphism in COQ9 affects mitochondrial and ovarian function and fertility in*

Holstein cows / M.S. Ortega, S. Wohlgemuth, P. Tribulo et al. // *Biology of Reproduction*. 2017. Vol. 96. No 3. P. 652–663. doi. 10.1093/biolre/iox004

5. Зиновьева Н. А. Гаплотипы фертильности голштинского скота / *Сельскохозяйственная биология*. 2016. Т. 51. № 4. P. 423–435. doi. 10.15389/agrobiology.2016.4.423rus
6. *Идентификация полиморфизма гена APAF1 у голштинского скота* / Н. Ю. Сафина, З. Ф. Фаттахова, Э. Р. Гайнутдинова и др. // *Международный вестник ветеринарии*. 2022. № 2. С. 134–139. doi. 10.52419/issn2072–2419.2022.2.134
7. *Выращивание телок для роботизированной технологии доения* / О. Б. Филиппова, А. И. Фролов, А. Н. Бетин и др. // *Эффективное животноводство*. 2022. № 4(179). С. 26–29. doi. 10.24412/cl-33489–2022–4–26–29
8. *Воспроизводительные причины коров подбора быков с учетом сходства их групп крови с аллелофондом стада* / Д. Политкин, А. Новиков, А. Хрунова и др. // *Молочное и мясное скотоводство*. 2013. № 5. С. 12–13.
9. *COQ9, a new gene required for the biosynthesis of coenzyme Q in Saccharomyces cerevisiae* / A. Johnson, P. Gin, B.N. Marbois et al. // *Journal of Biological Chemistry*. 2005. Vol. 280. P. 31397–404. doi. 10.1074/jbc.M503277200
10. *Coenzyme Q10 restores oocyte mitochondrial function and fertility during reproductive aging* / A. Ben-Meir, E. Burstein, A. Borrego-Alvarez et al. // *Aging Cell*. 2015. Vol. 14. P. 887–895. doi. 10.1111/accel.12368
11. *Discovery of single nucleotide polymorphisms in candidate genes associated with fertility and production traits in Holstein cattle* / S.D. Cochran, J.B. Cole, D.J. Null et al. // *BMC Genetics*. 2013. Vol. 14. P. 1–23. URL: <https://doi.org/10.1186/1471-2156-14-49> (дата обращения: 24.05.2022)
12. *Effect of COQ9 and STAT5A polymorphisms on reproductive performance in a Holstein cow herd in Mexico* / N.R. Michel-Regalado, M.A. Ayala-Valdovinos, J. Galindo-Garcia et al. // *Animal Reproduction*. 2020. Vol. 17. No. 3. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1590/1984-3143-AR2020-0039> (дата обращения: 05.02.2021)
13. *Silveira P.A.S. Associações de mutações genéticas com a fertilidade, produção de leite, metabolismo e saúde de vacas leiteiras: tese ... dr. vet. sc.: Data da defesa: 26.02.18. Pelotas, 2018. 97 f.*
14. Дунин И. М. Термины и определения, используемые в селекции, генетике и воспроизводстве сельскохозяйственных животных. М.: ВНИИПлем, 1996. 306 с.

Поступила в редакцию 10.02.2023
 После доработки 28.03.2023
 Принята к публикации 25.04.2023

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ВЕРБЛЮДИЦ КАЗАХСТАНСКОЙ ПОПУЛЯЦИИ

Д.А. Баймуханов¹, член-корреспондент НАН Республики Казахстан, доктор сельскохозяйственных наук,
О. А. Алиханов², кандидат сельскохозяйственных наук, С.Д. Монгуш³, кандидат сельскохозяйственных наук,
Ю.А.Юлдашбаев⁴, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук, В.А. Демин⁴, доктор сельскохозяйственных наук

¹Товарищество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственный центр животноводства и ветеринарии»,
010000 (Z10P6B8), Астана, ул. Кенесары, 40, офис 1419
E-mail: dbaimukanov@mail.ru

²Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауэзова,
130050, Шымкент, просп. Тауке-хана 5

³Тувинский государственный университет,
607000, Кызыл, ул. Ленина, 36

⁴Российский государственный аграрный университет –
Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева,
127550, Москва, ул. Тимирязевская 49

Исследования проводили с целью определения основных генетических параметров (изменчивость, наследуемость, повторяемость) признаков молочной продуктивности на современном массиве верблюдов различных пород для эффективной селекции. Объект исследования – животные породы казахский бактриан (200 голов), туркменский дромедар породы Арвана (120 голов), казахский дромедар (120 голов), разводимые на юге и юго-востоке Казахстана; монгольский бактриан тувинской популяций (30 голов), разводимый в лесостепной и сухостепной зоне Республике Тыва Российской Федерации. Возраст исследованных верблюдиц составлял от 1 до 12 лактации. Исследования проводили в 2020–2022 гг. Верблюдицы казахского бактриана способны давать за 210 дней лактации 1111,2±45,1 кг молока 4 %-ной жирности, туркменского дромедара породы Арвана – 1588,8±58,4 кг, казахского дромедара – 1870,0±47,5 кг, монгольского бактриана тувинской популяции – 933,5±29,8 кг. Коэффициент изменчивости по удою молока составил 19,7...35,9 %, по жирномолочности – 6,2...9,9 %, по белковомолочности – 3,9...7,2 %, по выходу молочного жира – 22,2...41,9 %, молочного белка – 19,5...36,9 %. Коэффициенты наследуемости по изучаемым селекционным признакам имели средние значения в пределах $h^2=0,25...0,55$. По надою за 1...2-ю лактации коэффициент повторяемости был равен 0,65...0,82, по массовой доле жира в молоке – 0,58...0,85, белка – 0,59 и 0,88, по выходу молочного жира – 0,75...0,82, молочного белка – 0,72...0,83. Коэффициент корреляции между показателями продуктивности верблюдиц первой выжеребки за 105 дней лактации и показателями за 210 дней лактации ($p < 0,001$) варьировал от +0,42 до +0,78, что указывает на надежность прогноза продуктивности по данным оценки за первые 105 дней.

GENETIC PARAMETERS OF MILK PRODUCTIVITY OF CAMELS OF THE KAZAKH POPULATION

D. A. Baimukanov¹, O. A. Alikhanov², S. D. Mongush³, Yu. A. Yuldashbayev⁴, V. A. Demin⁴

¹Limited Liability Company "Scientific and Production Center of Animal Husbandry and Veterinary",
010000 (Z10P6B8), Astana, ul. Kenesary, 40, office 1419
E-mail: dbaimukanov@mail.ru

²South-Kazakhstan State University named after M. Auezov,
130050, Shymkent, prosp. Tauke Khan, 5

³Tuva State University,
607000, Kyzyl, ul. Lenin, 36

⁴Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
127550, Moskva, ul. Timiryazevskaya, 49

The objects of research are modern arrays of camels of the Kazakh Bactrian breed, Turkmen dromedary of the Arvan breed, Kazakh dromedary bred in the south and south-east of Kazakhstan; Mongolian Bactrian of Tuvan populations bred in the forest-steppe and dry-steppe zone of the Republic of Tyva of the Russian Federation. The age of the studied camels ranged from 1 to 12 lactation. The studies were conducted in the period 2020–2022. The camels of the Kazakh Bactrian breed in the amount of 200 heads, the Turkmen dromedary in the amount of 120 heads, the Kazakh dromedary 120 heads and the Bactrian of the Mongolian breed of the Tuvan population 30 heads were studied. The camels of the Kazakh Bactrian are able to give 4 % milk in 210 days of lactation 1111.2 ± 45.1 kg, the Turkmen dromedary of the Arvan breed 1588.8 ± 58.4 kg, the Kazakh dromedary 1870.0 ± 47.5 kg, the Mongolian Bactrian of the Tuvan population 933.5 ± 29.8 kg. The coefficient of variability in milk yield for 210 days of lactation was CV = 19.7–35.9 % in camels. The coefficient of variation is 6.2–9.9 % in fat content, 3.9–7.2 % in protein content. In dairy camels, the coefficient of variability in the yield of milk fat was 22.2–41.9 %, in the yield of milk protein – 19.5–36.9 %. In dairy camels, the heritability coefficients for the studied breeding traits have average values that vary between $h^2 = 0.25–0.55$, which characterizes the stability of inheritance by descendants of productive traits of mothers. According to milk yield for 1–2 lactation, the repeatability coefficient was 0.65 ... 0.82, according to the mass fraction of fat in milk – 0.58 and 0.85, protein – 0.59 and 0.88, according to the yield of milk fat – 0.75 ... 0.82, milk protein – 0.72 ... 0.83. The correlation coefficient between the productivity indicators of camels of the first foal for 105 days of lactation and the indicators for 210 days of lactation ($P < 0.001$) varies from +0.42 to +0.78, which indicates the reliability of the forecast of productivity of camels of the first foal for 210 days of lactation according to the assessment data for the first 105 days.

Ключевые слова: верблюдицы (*Camelus bactrianus*, *Camelus dromedaries*), удои, жир, белок, наследуемость, изменчивость, повторяемость.

Key words: camels (*Camelus bactrianus*, *Camelus dromedaries*), milk yield, fat, protein, heritability, variability, repeatability.

Верблюжье молоко превосходит коровье и по своей питательной ценности довольно близко к человеческому. Оно характеризуется высокой концентрацией многих биологически активных соединений, которые необходимы для человека. Несмотря на огромную питательную ценность и пользу для здоровья людей, пищевые продукты из верблюжьего молока остаются малораспространенными [1]. Натуральное верблюжье молоко содержит много общих солей, кальция, защитных белков и таких элементов, как железо, медь и цинк. Уникальный состав верблюжьего молока делает его отличным продуктом питания для населения, проживающего в регионах (засушливых и полузасушливых), где растения (фрукты и овощи) встречаются редко. Научное понимание валового состава верблюжьего молока может побудить потребителей включить этот продукт в свой рацион и стимулировать расширение переработки верблюжьего молока и его использования в качестве компонента рациона человека [2].

Интенсивность секреции верблюжьего молока неразрывно связана с накоплением и выведением его из молочных желез по причине того, что емкость вымени у верблюдиц, как и у кобыл, намного меньше, чем у коров. Поэтому молочная продуктивность верблюдиц непосредственно связана с емкостью и молокообразующей способностью вымени [3]. При этом для формирования селекционного стада верблюдов по направлениям продуктивности необходимы сведения о продуктивном профиле всей популяции [4]. Исходя из изложенного необходимо изучение генетических параметров верблюдов, разводимые в Республике Казахстан и Республика Тыва Российской Федерации с учетом селекционируемых признаков.

Цель исследования – определение основных генетических параметров (изменчивость, наследуемость, повторяемость) признаков молочной продуктивности на современном массиве верблюдов различных пород для эффективной селекции.

Методика. Объекты исследования – современные массивы верблюдов породы казахский бактриан, туркменский дромедар породы Арвана, казахский дромедар разводимые на юге и юго-востоке Казахстана; монгольский бактриан тувинской популяций, разводимый в лесостепной и сухостепной зоне Республике Тыва Российской Федерации. Возраст исследованных верблюдиц составлял от 1 до 12 лактаций.

Табл.1. Селекционные параметры верблюдиц

Исследуемый признак	Порода			
	казахский бактриан (n=200)	туркменский дромедар Арвана (n=120)	казахский дромедар (n=120)	монгольский бактриан тувинской популяций (n=30)
Живая масса, кг	575,4±25,6	534,7±18,3	589,2±22,6	485,1±12,9
Удой молока за 210 дней лактации, кг	793,7±33,8	1925,9±60,1	1739,5±41,6	691,5±24,2
Массовая доля, %:				
жира в молоке	5,6±0,08	3,3±0,06	4,3±0,07	5,4±0,09
белка в молоке	3,9±0,05	3,7±0,04	3,9±0,04	3,8±0,05
Выход молока 4 %-ной жирности, кг	1111,2±45,1	1588,8±58,4	1870,0±47,5	933,5±29,8
Молочный жир, кг	44,4±1,2	63,5±3,1	74,8±1,9	37,3±1,1
Молочный белок, кг	31,0±0,9	71,2±1,7	67,8±1,3	26,3±0,9
Коэффициент молочности:				
при исходной жирности	1,38	3,60	2,95	1,42
при базисной жирности (4 %)	1,93	2,97	3,17	1,92
Лактационный показатель, кг	75,4	134,7	142,6	63,6

Работу выполняли в 2020–2022 гг. Изучены верблюды породы казахский бактриан в количестве 200 голов, туркменский дромедар в количестве 120 голов, казахский дромедар 120 голов и бактриан монгольской породы тувинской популяции 30 голов.

При ее проведении использовали комплекс специальных методов исследований по оценке молочной продуктивности, определяли живую массу (кг), удой молока за 210 дн. лактации (кг), массовую долю жира и белка в молоке (%), выход молочного жира и белка (кг), коэффициент молочности и лактационный показатель.

Коэффициент (индекс) молочности, характеризующий производство молока в расчете на 100 кг живой массы, определяли по формуле:

$$KM = U/J, \quad (1)$$

где *KM* – коэффициент молочности; *U* – удой за лактацию, кг; *J* – живая масса верблюдиц, кг.

Табл.2. Генетические параметры молочной продуктивности верблюдиц

Признак	Генетический параметр	Порода			
		казахский бактриан (n=200)	туркменский дромедар Арвана (n=120)	казахский дромедар (n=120)	монгольский бактриан тувинской популяций (n=30)
Удой молока за 210 дней лактации, кг	коэффициент изменчивости (CV, %)	31,5	19,7	24,2	35,9
	коэффициент наследуемости (h ²)	0,42	0,25	0,31	0,47
	коэффициент повторяемости (rs) за 1...2 лактации	0,82	0,65	0,74	0,78
Молочный жир, %	коэффициент изменчивости (CV, %)	8,7	6,2	9,1	9,9
	коэффициент наследуемости (h ²)	0,39	0,28	0,31	0,42
	коэффициент повторяемости (rs) за 1...2 лактации	0,73	0,58	0,65	0,85
Молочный белок, %	коэффициент изменчивости (CV, %)	5,4	3,9	4,8	7,2
	коэффициент наследуемости (h ²)	0,35	0,23	0,27	0,46
	коэффициент повторяемости (rs) за 1...2 лактации	0,72	0,59	0,69	0,88
Молочный жир, кг	коэффициент изменчивости (CV, %)	32,4	31,3	22,2	41,9
	коэффициент наследуемости (h ²)	0,38	0,26	0,33	0,51
	коэффициент повторяемости (rs) за 1...2 лактации	0,82	0,75	0,84	0,78
Молочный белок, кг	коэффициент изменчивости (CV, %)	31,8	19,5	21,9	39,6
	коэффициент наследуемости (h ²)	0,41	0,27	0,32	0,55
	коэффициент повторяемости (rs) за 1...2 лактации	0,79	0,72	0,81	0,83

Табл.3. Коэффициент корреляции (r) между признаками молочной продуктивности за первые 105 дней и 210 дней лактации

Признак	Порода			
	казахский бактриан (n=200)	туркменский дромедар Арвана (n=120)	казахский дромедар (n=120)	монгольский бактриан тувинской популяций (n=30)
Надой	+0,61	+0,71*	+0,75*	+0,58
Массовая доля жира	+0,49	+0,53	+0,57*	+0,43
Выход молочного жира	+0,67	+0,73*	+0,78*	+0,59
Массовая доля белка	+0,46	+0,58*	+0,56	+0,42
Выход молочного белка	+0,62	+0,72	+0,77*	+0,55

* $p < 0,001$

Лактационный показатель, отражающий суммарное количество молочного жира и белка в молоке, рассчитывали по выражению:

$$ЛП = ВМЖ + ВМБ, \quad (2)$$

где ОП – лактационный показатель; ВМЖ – выход молочного жира, кг; ВМБ – выход молочного белка, кг.

Молочную продуктивность кобыл оценивали по валовому удою молока, которую определяли путем ежемесячных контрольных доек. При оценке верблюдиц по молочной продуктивности придерживались общепринятых методических подходов. Учет удоев осуществляли методом контрольных доек, которые проводили 2 раза в месяц. Суточную молочную продуктивность определяли по следующей формуле [3]:

$$Y_c = Y_t / t \cdot 24, \quad (3)$$

где Y_c – молочная продуктивность верблюдицы за сутки, кг; Y_t – фактический дневной надой, определенный методом контрольных доений, кг; t – время участия кобылы в процессе доения от отбивки жеребят до конца последнего доения, ч; 24 – число часов в сутки.

Содержание СОМО и лактозы измеряли на приборе «Клевер-1М», молочного жира в молоке – на приборе Milkotester, общего белка – на анализаторе АМ-2. Максимальную емкость вымени определяли по методике Е. Д. Чиргина [5]. Для этого верблюдиц выдаивали после пропуска одного доения, то есть промежуток между ними специально удлиняли до 6 ч, чтобы вымя полностью заполнилось молоком. Оценку проводили на втором-третьем месяце лактации, когда емкость вымени верблюдиц была максимальна, согласно инструкции по бонитировке верблюдов пород бактриан и дромедар с основами племенной работы (Астана, 2014). Исследования осуществляли в соответствии с действующей методикой организации зоотехнических опытов.

Коэффициенты изменчивости, наследуемости, повторяемости и корреляции признаков рассчитывали с использованием общепринятых статистических методов, применяемых в зоотехнии. Наследуемость определяли с использованием коэффициентов корреляции между продуктивностью матерей по наивысшей лактации и дочерей по первой лактации. Повторяемость молочных признаков определяли на основе корреляционной связи между показателями в смежные лактации (1-я и 2-я).

Результаты и обсуждение. Наибольшей живой массой среди рассматриваемых генотипов характеризовались животные породы казахский дромедар (589,2 кг), наименьшей – монгольский бактриан тувинской популяции (485,1 кг). Аналогично распределялись и показатели удою молока жирностью 4 % за 210 дней лактации – соответственно 1870,0±47,5 кг и 933,5±29,8 кг (табл. 1).

Самой высокой вариабельностью ($CV = 19,7...35,9\%$) среди изученных продуктивных признаков характеризовались показатели удою за 210 дней первой лактации (табл. 2). То есть селекция в этом направлении будет наиболее эффективной. Изменчивость массовой доли жира и белка в молоке верблюдиц первой выжеребки не превышала 10 %, жирномолочности – составляла 6,2...9,9 %, белкомолочности – 3,9...7,2 %, что свидетельствует об относительной стабильности этих признаков. То есть селекционный эффект по жирномолочности и белкомолочности возможен только за длительный промежуток времени. Коэффициент изменчивости выхода молочного жира составляет 22,2...41,9 %, молочного белка – 19,5...36,9 %.

Коэффициент наследуемости – основной генетический параметр, который отражает долю наследственной изменчивости признака и служит селекционным показателем отбора по продуктивным качествам. У дойных верблюдиц его величина по изучаемым селекционным признакам имеет средние значения, которые варьируют в пределах $h^2 = 0,25...0,55$, что свидетельствует о стабильности наследования потомками продуктивных признаков матерей. В целом величина этого показателя свидетельствует о возможности эффективного отбора маточного поголовья как по молочной продуктивности, так и по качественным показателям – массовой доле жира и белка в молоке.

Эффективность отбора во многом зависит от повторяемости селекционного признака. В нашем исследовании она была высокой по всем продуктивным признакам. Коэффициент повторяемости по надое за 1-ю и 2-ю лактации был равен 0,65...0,82, по массовой доле жира в молоке – 0,58...0,85, массовой доле белка в молоке – 0,59...0,88, по выходу молочного жира – 0,75...0,82, молочного белка – 0,72...0,83.

Коэффициент корреляции между показателями продуктивности верблюдиц первой выжеребки за 105 дней и 210 дней лактации ($p < 0,001$) варьирует от +0,42 до +0,78, что указывает на возможность надежного прогноза продуктивности верблюдиц первой выжеребки за 210 дн. лактации по результатам оценки первых 105 дн. (табл. 3).

При отборе дойных верблюдиц по нескольким селекционным признакам рекомендуется учитывать характер связей между ними. Установлено, что при селекции, направленной на повышение абсолютного удою молока, содержание жира и белка в молоке будет

Табл. 4. Коэффициент корреляции (r) продуктивных показателей верблюдиц 1-ой выжеребки

Изучаемые признаки	Порода верблюдов			
	казахский бактриан (n=200)	туркменский дромедар Арвана (n=120)	казахский дромедар (n=120)	монгольский бактриан тувинской популяций (n=30)
Удой – массовая доля жира	-0,12*	-0,09*	-0,11*	-0,15*
Удой – массовая доля белка	-0,05*	-0,03*	-0,03*	-0,04*
Массовая доля жира – массовая доля белка	0,22*	0,19*	0,21*	0,17*
Удой – выход молочного жира	0,94*	0,95*	0,95*	0,91*
Удой – выход молочного белка	0,95*	0,96*	0,96*	0,92*

* $p < 0,001$

Табл.5. Мониторинг взаимосвязи емкости вымени верблюдиц с их молочной продуктивностью и продолжительностью хозяйственного использования

Показатель	Физиологическая емкость вымени верблюдиц, л					
	1,00...1,49	1,50...1,69	1,70...1,99	2,00...2,24	2,24...2,49	2,50...2,69
Казахский бактриан (n=50)						
Поголовье, гол.	20	15	10	5	-	-
Продолжительность хозяйственного использования, лактаций	8,0	8,0	7	7	-	-
Пожизненный удой, кг	10800	12280	12740	15750	-	-
Средний удой за лактацию, кг	1350	1535	1820	2250	-	-
Туркменский дромедар (n=50)						
Поголовье, гол.	-	5	5	15	15	10
Продолжительность хозяйственного использования, лактаций	-	8,0	8,0	7,0	7,0	6,0
Пожизненный удой, кг	-	25600	27120	26740	29400	27600
Средний удой за лактацию, кг	-	3200	3390	3820	4200	4600
Казахский дромедар (n=50)						
Поголовье, гол.	-	5	15	15	10	5
Продолжительность хозяйственного использования, лактаций	-	8,0	8,0	7,0	6,0	5,0
Пожизненный удой, кг	-	20000	22800	22050	21000	21000
Средний удой за лактацию, кг	-	2500	2850	3150	3500	4200
Монгольский бактриан тувинской популяций (n=50)						
Поголовье, гол.	20	15	10	-	-	-
Продолжительность хозяйственного использования, лактаций	8,0	8,0	7	-	-	-
Пожизненный удой, кг	4400	6240	9940	-	-	-
Средний удой за лактацию, кг	550	780	1420	-	-	-

снижаться, но с разной интенсивностью. Жирномолочность снизится в большей степени, а белкомолочность уменьшится незначительно. В то же время между массовой долей жира и белка в молоке дойных верблюдиц выявлена устойчивая положительная связь $r = +0,17$ и $r = +0,22$. Между удоем молока и выходом молочного жира и белка установлена высокодостоверная ($p \leq 0,001$) положительная ($r = 0,91 \dots 0,96$) взаимосвязь (табл. 4).

Установлена высокая корреляция между максимальной емкостью вымени верблюдиц и расчетным суточным удоем ($+0,71 \pm 0,02$), а также средним разовым удоем ($+0,85 \pm 0,03$). Полученные данные подтверждают тесную прямую зависимость между продуктивностью и емкостью вымени верблюдиц.

У 70 % поголовья верблюдиц пород казахский и монгольский бактриан емкость вымени составляла 1,00...1,69 л, у такой же доли животных породы туркменский дромедар Арвана – от 2,0 до 2,69 л, у 80 % верблюдоматок породы казахский дромедар – 1,7...2,49 л (табл. 5).

В целом верблюдоматки породы Арвана отличались более высокими удоями при относительно низком содержанием жира в молоке, по сравнению с казахскими бактрианами. По результатам анализа лактационных кривых молочной продуктивности верблюдоматок наиболее высокие суточные удои у особей разных генотипов при разведении в различных условиях отмечали на втором-третьем месяце лактации. Средняя молочная продуктивность исследуемого поголовья верблюдов за 7 месяцев лактации составила 1080,9 кг молока, со средним содержанием жира 5,1 %.

Изучение корреляционных связей дает возможность усилить эффективность отбора по продуктивному признаку путем учета других косвенных показателей и исключить нежелательные последствия при проведении односторонней селекции по одному признаку.

Выводы. Коэффициент корреляции между показателями продуктивности верблюдиц первой выжеребки за 105 дней лактации и показателями за 210 дней лакта-

ции ($p < 0,001$) варьировал от +0,42 до +0,78, что указывает на надежность прогноза продуктивности по данным оценки за первые 105 дней. Высокая повторяемость удоя между лактациями может служить обоснованием возможности увеличения продуктивности дойного стада на основе оценки верблюдиц первой выжеребки за 210 дней лактации. Их целенаправленный отбор по этому признаку для ремонта собственного стада будет способствовать ускорению генетического прогресса. При увеличении удоя молока у верблюдиц содержание жира в продукции имеет тенденцию к снижению.

Литература

1. Benmeziane-Derradji F. Evaluation of camel milk : gross composition-a scientific overview // Trop Anim Health Prod. 2021. Vol. 53. No. 2. P. 308. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11250-021-02689-0> (дата обращения : 15.01.2023) doi : 10.1007/s11250-021-02689-0.
2. Продуктивный профиль маточного поголовья верблюдов породы казахский бактриан прибалхашского типа / А. Д. Баймуканов, Ю. А. Юлдашбаев, М. Т. Каргаева и др. // Зоотехния. 2022. № 10. С. 23–25. doi : 10.25708/ZT.2022.55.72.006
3. Баймуканов А. Морфофункциональные особенности вымени верблюдиц // Верблюдоводство в Казахстане. Алматы : Бастау, 1995. Вып.1. С. 7–11.
4. Ho T. M., Zou Z., Bansal N. Camel milk : A review of its nutritional value, heat stability, and potential food products // Food Res Int. 2022. No. 153. 110870. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996921007705?via%3Dihub> (дата обращения : 11.01.2023). doi : 10.1016/j.foodres.2021.110870
5. Чиргин Е. Д. Емкость вымени кобыл русской тяжелой породы // Ветеринарный врач. 2015. № 5. С. 59–62.

Поступила в редакцию 06.03.2023
После доработки 29.03.2023
Принята к публикации 25.04.2023

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

УДК 631.331.5:635.65

DOI: 10.31857/S2500262723030134, EDN : FAEJNH

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ВЫСЕВА СЕМЯН ПРОПАШНЫХ КУЛЬТУР
ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫМИ СЕЯЛКАМИ****А.И. Завражнов¹**, академик РАН, **А.В. Балашов²**, доктор технических наук,
А.А. Завражнов¹, кандидат технических наук, **Н. Ю. Пустоваров²**, кандидат технических наук¹Мичуринский государственный аграрный университет,
393760, Тамбовская обл., Мичуринск, ул. Интернациональная, 101
E-mail: aiz@mgau.ru.²Всероссийский научно-исследовательский институт
высшего использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве,
392022, Тамбовская обл., Тамбов, пер. Ново-Рубежный, 28
E-mail: ntc.agro@yandex.ru.

Исследования проводили с целью определения качественных и энергетических показателей работы пропашной сеялки с электрическими приводами рабочих органов, оснащенной системой контроля высева семян, позволяющей обеспечить дистанционное управление посевным агрегатом. В экспериментах использовали высевающие аппараты сеялки МС-8 с приводом через редуктор от электрического двигателя постоянного тока FL57BLS04 мощностью 180 Вт и сеялки ТС-М-4150А с высевающим аппаратом производства фирмы «MaterMass» и приводом через редуктор и цепные передачи от бесколлекторного двигателя FL86BLS мощностью 220 Вт. Для энергообеспечения двигателей высевающих аппаратов применяли импульсный источник питания SDR-960-48. Качество работы высевающих аппаратов при использовании семян различных пропашных культур определяли методом фиксации временных интервалов между выбросами семян из диска высевающего аппарата с использованием датчика высева, установленного в сошнике. При изменении частоты вращения диска высевающего аппарата сеялки МС-8 от 20 до 60 об/мин коэффициент вариации выбросов семян варьировал от 0,15 до 0,35, а потребляемая мощность – от 30 до 110 Вт. Мощность на привод вентилятора не превышала 2,5 кВт, суммарная потребляемая мощность электрических двигателей на привод всех высевающих аппаратов и вентилятора – 4,0 кВт. У сеялки ТС-М-4150А потребляемая мощность на привод высевающих аппаратов несколько выше и на рабочих режимах составляет не менее 3,0 кВт. Предложена система контроля и управления высевом отечественной электрифицированной сеялкой на основе платы Arduino Uno. Ее программа включает две подпрограммы, учитывающих скорость движения посевного агрегата, на основании которой определяется частота вращения высевающего диска и количество пропусков и двойников. Использование в пропашных сеялках электрифицированного привода и системы контроля высева семян позволяет бесступенчато устанавливать норму высева семян и управлять процессом высева из кабины трактора.

CONTROL OF SOWING SEEDS OF ROW CROPS WITH ELECTRIFIED SEEDERS**A.I. Zavrazhnov¹, A.V. Balashov², A.A. Zavrazhnov¹, N. Yu. Pustovarov²**¹Michurinsk State Agrarian University
393760, Tambovskaya obl., Michurinsk, ul. Internatsional'naya, 101
E-mail: aiz@mgau.ru.²The All-Russian Research Institute
for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture,
392022, Tambovskaya obl., Tambov, per. Novo-Rubezhny, 28
E-mail: ntc.agro@yandex.ru.

The research was conducted to determine the qualitative and energy performance indicators of a precision seeder with electric drives for working tools, equipped with a seed distribution control system that allows remote control of the seeding unit. The experiments used seeders MC-8 with drive through a gearbox from a 180W DC motor FL57BLS04 and seeders TC-M-4150A with a seed distribution apparatus produced by «MaterMass» and driven through a gearbox and chain drives from a 220W brushless motor FL86BLS. The pulse power supply SDR-960-48 was used to power the seed distribution apparatus motors. The quality of operation of the seed distribution apparatus when using seeds of various row crops was determined by the method of recording the time intervals between seed ejections from the distribution disk using a seed sensor installed in the furrow opener. When changing the rotation speed of the seeder's distribution disk from 20 to 60 rpm, the coefficient of variation of seed ejections varied from 0.15 to 0.35, and the power consumption ranged from 30 to 110W. The power consumption for the fan drive did not exceed 2.5 kW, and the total power consumption of the electric motors for driving all the seed distribution apparatuses and the fan was 4.0 kW. For the TC-M-4150A seeder, the power consumption for driving the seed distribution apparatuses is slightly higher and amounts to at least 3.0 kW in operating modes. A control and management system for seeding with a domestic electrified seeder based on the Arduino Uno board was proposed. Its program includes two subprograms that take into account the speed of movement of the seeding unit, based on which the rotation speed of the distribution disk and the number of skips and duplicates are determined. The use of electrified drives and seed distribution control systems in precision seeders allows for stepless adjustment of the seed sowing rate and control of the sowing process from the tractor cabin.

Ключевые слова: посев, сеялка, электрический привод, стенд, качество, контроль, алгоритм управления высевом.**Key words:** sowing, seeder, ready drive, stand, quality, control, seeding control algorithm.

Посев пропашных культур в хозяйствах России проводят агрегатами с пневматическими сеялками отечественного и иностранного производства с элементами цифровизации (система контроля высева семян,

параллельное вождение посевных агрегатов) и механическим приводом рабочих органов [1, 2, 3]. У этих сеялок вращение высевающих аппаратов осуществляется от опорно-приводных колес через цепные передачи,

валы и коробки передач, а вращение вала вентилятора пневматических сеялок – от ВОМ трактора. Буксование опорно-приводных колес или обрыв цепных передач приводит к прекращению высева семян отдельными или всеми высевальными аппаратами сеялки [4, 5]. Нестабильная частота вращения ВОМ трактора вызывает изменение частоты вращения вала вентилятора, которое сопровождается нестабильностью присасывания семян к отверстиям высевальных дисков аппаратов. Отмеченные недостатки механических приводов рабочих органов пневматических сеялок устраняются применением электрических приводов высевальных аппаратов и вентилятора. Такие сеялки выпускают некоторые иностранные фирмы [6, 7]. Электрический привод высевальных аппаратов пневматических сеялок способствует стабилизации установленной нормы высева семян независимо от условий эксплуатации посевных агрегатов. Использование электрического привода открывает возможности для дистанционного управления каждым высевальным аппаратом сеялки и отключения одного или группы аппаратов из кабины трактора на полях со сложной конфигурацией, поворотных полосах и засеянных участках поля с помощью системы спутниковой навигации [8, 9, 10].

Для обеспечения точного высева пропашные сеялки оснащают системами контроля высева семян, которые обеспечивают оперативный контроль работы посевного агрегата и своевременно информируют механизатора о нарушениях процесса высева, отклонениях от заданных параметров работы сеялки и местах их возникновения световой индикацией или звуковым сигналом [11]. Поэтому актуальной задачей повышения эффективности посева пропашных культур в системе точного земледелия заключается в исследовании конструктивно-режимных параметров посевного агрегата с отечественной электрифицированной сеялкой, оснащенной системой контроля высева семян и управляемой автоматически, обеспечивающих выполнение технологического процесса в соответствии с агротехническими требованиями.

Цель исследований – определение качественных и энергетических показателей работы сеялки с электрическими приводами рабочих органов, оснащенной системой контроля высева семян и разработка системы автоматического управления посевным агрегатом.

Методика. Эксперименты проводили с высевальными аппаратами сеялки МС-8 с диаметром диска 168 мм и различным количеством отверстий (производитель ПАО «Миллеровосельмаш» г. Миллерово, Ростовской области) с приводом через редуктор от электрического двигателя постоянного тока FL57BLS04 мощностью 180 Вт, и сеялки ТС–М-4150А с диаметром диска 220 мм и различным количеством отверстий (производитель ЗАО «Техника-Сервис», г. Воронеж), на которую устанавливается высевальный аппарат производства фирмы «MaterMass» с приводом через редуктор и цепные передачи от бесколлекторного двигателя FL86BLS мощностью 220 Вт. Исследования выполняли на стендах, разработанных в лаборатории «Использование МТА» ВНИИТиН. Для энергообеспечения двигателей высевальных аппаратов использовали импульсный источник питания SDR-960–48. Частоту вращения электродвигателей устанавливали с помощью панели оператора МТ6071iE через блок управления бесколлекторным двигателем BLSD-50.

Оценку показателей работы высевальных аппаратов сеялок МС-8 и ТС–М-4150А с электрическим приводом вращения дисков осуществляли в ходе лабораторно-стендовых исследований на семенах пропашных

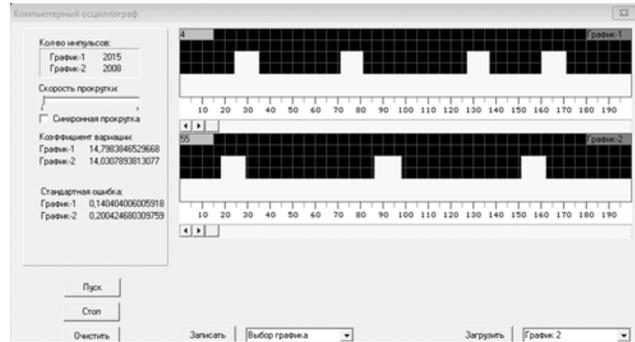


Рис. 1. Окно программы, продолжительности пролета семян между чувствительными пластинами датчика высева и временные интервалы между выбросами семян.

культур: сахарной свеклы (дражированные семена), сои, кукурузы, люпина. Качество работы высевальных аппаратов определяли методом фиксации временных интервалов между выбросами семян пропашных культур из высевального аппарата с учетом продолжительности их пролета между чувствительными пластинами датчика высева, установленного в сошнике [11, 12]. От датчика высева сигнал передавался через блок преобразования импульса к компьютеру с помощью приставки. Установленную частоту вращения диска регистрировали тахометром ТмМП-100УЗ. Продолжительность пролета семян между чувствительными пластинами датчика высева и временные интервалы между выбросами семян через заданные промежутки, выраженные в миллисекундах, отображалась на оси ординат гистограммы. Количество семян, выпавших за определенное число оборотов высевального диска, и величина коэффициента вариации распределения выбросов семян из высевального аппарата за исследуемый промежуток времени отображались на мониторе компьютера (рис. 1).

Силу тока на исследуемых режимах работы высевального аппарата при установленных частотах вращения вала электрического двигателя регистрировали по показаниям цифрового амперметра, затем с учетом напряжения, фиксируемого цифровым вольтметром, определяли потребляемую мощность электродвигателя по известной формуле. Потребную мощность на привод вентилятора, устанавливаемого на сеялку, рассчитывали

$$P_{\text{с}} = \frac{m \cdot (d_{\text{с}} - \sqrt{d_{\text{с}}^2 - \sqrt{d_{\text{отв}}^2}}) \cdot (\omega^2 \cdot R + g) \cdot k_3 \cdot k_{\text{п}} \cdot V_{\text{в}} \cdot Z \cdot N}{\delta \cdot d_{\text{отв}} \cdot \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{пр}}} \quad (1)$$

где m – масса семени, кг; $d_{\text{с}}$ – диаметр семени, м; $d_{\text{отв}}$ – диаметр отверстия, м; R – радиус окружности центров отверстий, м; ω – частота вращения высевального диска, с^{-1} ; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; k_3 – коэффициент запаса ($k_3=1,2$); $k_{\text{п}}$ – коэффициент присасывания равен отношению скорости воздуха в отверстиях к скорости воздуха в отверстиях без семени ($k_{\text{п}}=0,55 \dots 0,72$); $V_{\text{в}}$ – скорость воздушного потока в присасывающем отверстии диска, $\text{м}/\text{с}$; Z – количество отверстий на высевальном диске; N – количество высевальных аппаратов на сеялке; d – коэффициент пропорциональности, учитывающий суммарное действие различных сил; $\eta_{\text{в}}$ – КПД вентилятора; $\eta_{\text{пр}}$ – КПД привода.

Для исключения раскатывания семян по дну бороздки после их выпадения из высевального аппарата необходимо согласовывать частоту вращения высевального диска с рабочей скоростью посевного агрегата, по предложенному выражению [13]:

$$\omega_{\partial} = \frac{v_{na} \cdot q}{n} \quad (2)$$

где ω_{∂} – частота вращения высевашего диска, с⁻¹; v_{na} – рабочая скорость посевного агрегата, м/с; q – норма высева семян, шт./м; n – количество отверстий на диске, шт.

Для реализации рассматриваемого технологического процесса была разработана система контроля и управления высевом семян электрифицированной сеялки, которая содержит емкостные датчики высева, индуктивный датчик пути, контроллер с встроенными модулями контроля и управления, электродвигатель для вращения дисков высеваших аппаратов и электродвигатель для перемещения сѐмкика двойников семян, блок сбора и обработки информации. Датчики высева семян закреплены в полостях сошников всех высеваших аппаратов и соединены кабельной разводкой с блоком сбора и обработки информации. Датчик пути закреплен на раме сеялки у опорно-приводного колеса. Контроллер оснащен дисплеем, состоящим из разноцветных светодиодных модулей, и размещен в кабине трактора. Модули контроля и управления установлены в корпусе контроллера. Электродвигатели для управления вращением дисков и перемещением сбрасывателей двойников семян смонтированы в корпусах высеваших аппаратов сеялки и соединены с блоком сбора и обработки информации, который установлен на раме сеялки [14].

Управление работой посевным агрегатом с электрифицированной сеялкой должно быть интегрировано с установленным в кабине трактора контроллером системы контроля высева, энергообеспечение монитора которого осуществляется от бортовой сети трактора. Энергообеспечение модулей управления, установленных на сеялке, осуществляется модулем питания с выходным напряжением 12 В.

Результаты и обсуждение. Анализ результатов определения продолжительности пролета исследуемых семян пропашных культур между чувствительными пластинами датчика высева в зависимости от частоты вращения высевашего диска свидетельствует, что наименьшая величина этого показателя (8...9 мс) отмечена у дражированных семян сахарной свеклы, которая практически не изменялась при работе высевашего аппарата на всех режимах (рис. 2). Наибольшая продолжительность пролета (13...14 мс) фиксировалась на семенах люпина и кукурузы. При увеличении частоты вращения высевашего диска она уменьшалась на 7,3...12,8 %. Продолжительность пролета семян сои находилась в пределах 12 мс. Таким образом, с увеличением размеров семян пропашных культур продолжительность их пролета между чувствительными пластинами датчика высева возрастает.

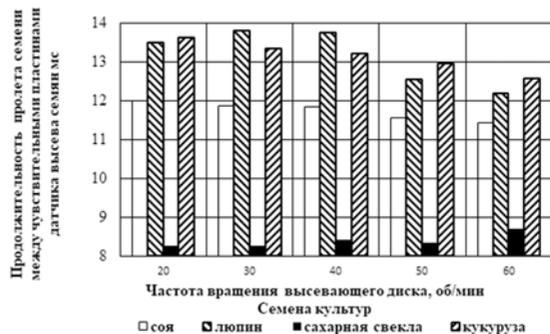


Рис. 2. Продолжительность пролета семян пропашных культур между чувствительными пластинами датчика высева.

Результаты экспериментальных исследований качественных и энергетических показателей работы высевашего аппарата сеялки ТС-М-4150А с электроприводом вращения диска (напряжение 48 В)

Частота вращения высевашего диска, об/мин	Потребляемый ток, А	Потребляемая мощность, Вт	Средний временной интервал между выбросами семян, мс
20	1,13	54,24	123,83
30	2,17	104,16	83,64
40	3,55	170,40	63,99
50	5,03	241,44	49,01
60	6,90	331,20	42,58

Анализ энергетических показателей работы высевашего аппарата сеялки ТС-М-4150А показал, что с увеличением частоты вращения высевашего диска потребляемый ток при постоянном напряжении питания электродвигателя, равном 48 В, возрастает, а временные интервалы между выбросами семян из высевашего аппарата сокращаются (см. табл.).

Мощность, потребляемая электродвигателем привода вращения диска на рабочих частотах от 30 до 50 об/мин, не превышает 250 Вт. Поэтому для стабильного энергообеспечения высеваших аппаратов 12-и рядной сеялки ТС-М-4150А на рабочих режимах требуется источник питания мощностью не менее 3 кВт. Для стабильного энергообеспечения сеялки с учетом электропривода вентилятора необходимо использовать штатный генератор трактора требуемой мощности и установить дополнительный генератор с автономным приводом от ВОМ или гидропривода. Коэффициент вариации выбросов семян пропашных культур из высевашего аппарата сеялки ТС-М-4150А при изменении частоты вращения диска с 20 до 60 об/мин составлял от 0,143 до 0,149 (рис. 3).

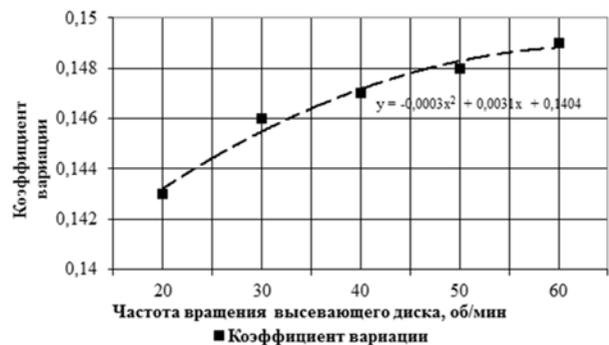


Рис. 3. Качественные показатели работы высевашего аппарата сеялки ТС-М-4150А в зависимости от частоты вращения диска.

Качественная работа сеялки ТС-М-4150А с электрическими приводами высеваших аппаратов при использовании штатных высеваших дисков с 24-мя отверстиями, поставляемых с этой сеялкой, и настройке, осуществляемой согласно руководству по эксплуатации, достигается при частоте вращения диска от 25 до 40 об/мин. В этом случае при движении посевного агрегата по полю со скоростью 5,4...11 км/ч обеспечивается 100%-ное присасывание семян ко всем отверстиям на высевашем диске и их равномерное распределение по длине ряда.

Потребляемая мощность электрическим двигателем постоянного тока FL57BLS04 для привода диска одного высевашего аппарата сеялки МС-8 при высева семян пропашных культур в зависимости от частоты его вращения варьировала от 30 до 110 Вт.

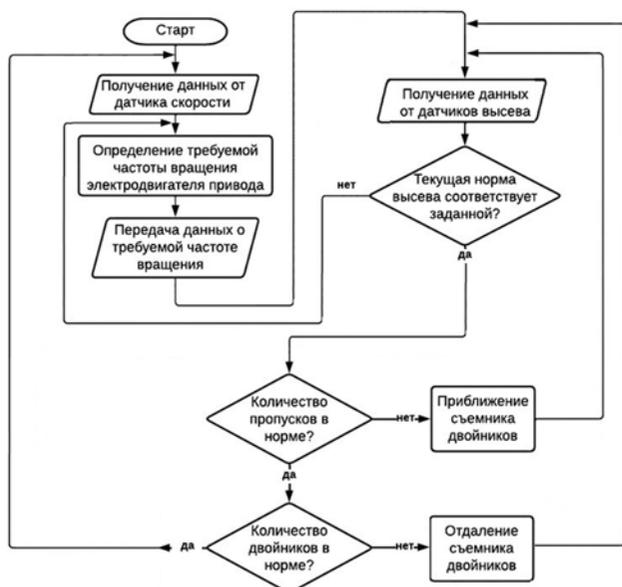


Рис. 4. Алгоритм работы системы управления высевом электрифицированной сеялкой.

В ходе лабораторно-стендовых исследований с высевом сои и подсолнечника сеялкой МС-8 при 20 отверстиях на диске и частоте вращения высевающего диска от 20 до 60 об/мин были определены качественные показатели его работы. Коэффициент вариации выбросов семян составлял от 0,15 до 0,35. При рабочей частоте вращения диска 25 об/мин обеспечивалось 100 %-ное присасывание семян к отверстиям на диске с необходимым разрежением (4,4...5,0 кПа) в вакуумной камере высевающего аппарата при отсутствии двойников и коэффициенте вариации выбросов семян, не превышающем 0,15...0,17.

По результатам численного эксперимента потребная мощность на привод вентилятора 12-и рядной сеялки МС-8 при высеве семян сои в зависимости от частоты вращения диска варьировала от 1,6 до 2,47 кВт, а суммарная потребная мощность электрических двигателей на привод всех высевающих аппаратов и вентилятора при установленной частоте вращения высевающих дисков не превышает 4,0 кВт.

Таким образом, при автоматической корректировке частоты вращения высевающего диска и перемещения сбрасывателя двойников, необходимо учитывать временные интервалы между выбросами семян и скорость движения посевного агрегата. При устойчивом и продолжительном отклонении параметров высева семян для их стабилизации необходимо настроить соответствующие рабочие органы сеялки согласно разработанному алгоритму (рис. 4) программы контроля и управления высевом электрифицированной сеялкой на основе платы Arduino UNO [15].

В системе контроля высева семян обрабатываются сигналы от датчика скорости и фиксируется текущая скорость движения посевного агрегата на определенном промежутке пути, по которой рассчитывается требуемая частота вращения электродвигателя привода высевающего диска. При значительном отклонении частоты вращения высевающих дисков от заданной в отдельных высевающих секциях осуществляется автоматическая адресная корректировка (повышение или понижение) частоты вращения электродвигателя привода высевающего диска.

Далее, на основании временных интервалов между выбросами семян определяется количество пропусков или двойников. При превышении их предельно допустимой величины этого показателя осуществляется соответствующая корректировка (приближение или отдаление) положения сбрасывателя двойников относительно отверстий на высевающем диске. После выполнения всех перечисленных действий система управления передает соответствующие команды на приводы вращения высевающего диска и перемещения сбрасывателя двойников по протоколу RS-485. Для обеспечения точного управления системой эти подпрограммы выполняются циклически.

Выводы. При изменении частоты вращения высевающего диска от 10 до 60 об/мин коэффициент вариации выбросов семян из высевающего аппарата составляет от 0,140 до 0,154. Потребная мощность электрического привода вращения высевающего диска на сеялке ТС-М-4150А на рабочих режимах работы не превышает 250 Вт, у сеялки МС-8 – 110 Вт.

Суммарная потребная мощность электродвигателей всех высевающих аппаратов и вентилятора 12-и рядных сеялок на рабочих режимах ориентировочно не превышает 4,0 кВт. Для их энергообеспечения необходимо использовать штатный генератор трактора и дополнительный генератор с приводом от ВОМ трактора или гидропривода.

Разработанный алгоритм управления работой посевным агрегатом с электрифицированной сеялкой, интегрированный с установленным в кабине трактора монитором системы контроля и управления дает возможность бесступенчато регулировать норму высева семян независимо от скорости посевного агрегата и управлять процессом высева из кабины трактора.

Литература

1. Рыбалкина Н. Н. Влияние норм высева и способов посева на урожайность сои // *Земледелие*. 2000. № 1. С. 23–25.
2. Lavrukhin P., Senkevich S., Ivanov P. Placement Plants on the Field Area by Seeding Machines: Methodical Aspects Assessment Rationality // *Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-Engineering*. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2020. P. 240–261.
3. Колчина Л. М. Автоматические системы технологического контроля посевной техники // *Техника и оборудование для села*. 2014. № 3. С. 69.
4. Лачуга Ю. Ф., Ахалая Б. Х., Шогенов Ю. Х. Новые конструкции универсальных рабочих органов почвообрабатывающей и посевной техники // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2019. № 4. С. 73–76.
5. Геометрия посева пропашных культур / А. А. Завражнов, А. И. Завражнов, А. А. Земляной и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. № 1. С. 59–66.
6. Бейлис В. М. Общие технические и технологические требования к системе инновационных машинных технологий и техники // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. № 5. С. 49–52.
7. The methodology of modeling and optimization of technologies in crop production / V. V. Mikheev, A. G. Ponomarev, P. A. Eremin, et al. // *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. Vol. 51, No. 3. P. 52–57.
8. Интенсивные машинные технологии, роботизированная техника и цифровые системы для производства основных групп сельскохозяйственной продукции / Ю. Ф. Лачуга, А. Ю. Измайлов, Я. П. Лоба-

- чевский и др. // *Техника и оборудование для села*. 2018. № 7. С. 2–7.
9. Измайлов А. Ю. Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т. 89. № 5. С. 536–538.
10. Обоснование и расчет схемы электропривода пневмосеялки агрегата комбинированного почво-обрабатывающе-посевного / В. Б. Ловкис, А. В. Захаров, Н. Н. Стасюкевич и др. // *Межведомственный тематический сборник «Механизация и электрификация сельского хозяйства»*. Минск, НППЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2016. Вып. № 50. С. 193–199.
11. Забражнов А. И., Лобачевский Я. П., Пустоваров Н. Ю. Разработка и обоснование параметров емкостного датчика высева семян пропашных культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. № 2. С. 4–9.
12. Забражнов А. И., Балашов А. В., Пустоваров Н. Ю. Результаты исследований параметров датчиков, используемых в системе контроля высева семян пропашных культур // *Наука в центральной России*. 2017. № 5(29). С. 28–35.
13. Модернизированная система контроля высева семян / А. И. Забражнов, А. В. Балашов, С. П. Стрыгин и др. // *Наука в центральной России*. 2019. № 2 (38). С. 53–60.
14. Крищенко А. В., Пустоваров Н. Ю., Стрыгин С. П. и др. Система контроля и управления высевом пропашной сеялки Патент на изобретение 2783373 С1, 11.11.2022. Заявка № 2021128065 от 23.09.2021.
15. Bistak P. *Arduino support for personalized learning of control theory basics* // *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52. No. 27. P. 217–221.

Поступила в редакцию 25.01.2023
После доработки 01.03.2023
Принята к публикации 28.03.2023

Правила для авторов

1. Редакция помещает не более двух статей одного автора в год. Это правило не распространяется на академиков и членов-корреспондентов РАН и других академий.

2. Объем статьи не менее **12 стр.**, включая таблицы (не более 4), рисунки (не более 4), библиографию (до 25 названий). Статья, набранная **крупным шрифтом через 1,5 интервала, пересылается по E-mail: nsm2308@yandex.ru.** В ней должны быть указаны **УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, степени, полное название учреждения с адресом, E-mail, реферат** объемом 200-250 слов с указанием цели опытов, объекта исследований, анализа полученных данных), **ключевые слова и все продублировано на английском языке. Таблицы и рисунки в одном файле с текстом. В тексте выделить «Методика» и «Результаты и обсуждение».** Повторение одних и тех же данных в тексте, таблицах, графиках недопустимо. В конце статьи указать номер телефона (служебный, домашний, мобильный) каждого соавтора.

3. Рисунки (графический материал) должны быть выполнены **четко, представлены на отдельном листе в формате, обеспечивающем ясность передачи всех деталей, и/или на электронном носителе** (программы «Adobe PhotoShop», «Adobe Illustrator»).

4. **Статья с большим количеством формул (не более 10) представляется на электронном носителе** – (программа «MS Equation» или подобная).

5. При описании методики исследования следует ограничиваться оригинальной ее частью, при элементном анализе приводить только усредненные данные.

6. Используемая литература приводится в порядке очередности упоминания, в тексте – цифровые ссылки в квадратных скобках. Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. Доля ссылок на источники старше 10 лет не должна превышать 30 % списка литературы, доля ссылок на публикации в журналах из ядра РИНЦ за последние 8 лет должна составлять не менее 50 % списка литературы. Желательны ссылки на журналы, входящие в базу данных Scopus и Web of Science. **Цитируемость своих работы не более 15%.**

7. При получении статьи редакция рассматривает ее соответствие тематике журнала и посылает на рецензию ведущим специалистам. Возвращение рукописи автору на доработку с копией рецензии не означает, что статья принята к печати. Датой поступления считается день получения редакцией окончательного варианта статьи.

8. Редакция посылает авторам на визу подготовленный к печати экземпляр статьи, который должен быть выслан обратно в течение суток с момента его получения.

Авторам высылается журнал в электронном виде.

С аспирантов плата за публикацию не взимается.

Для получения гонорара за публикацию в англоязычном издании авторы могут обратиться в Российское авторское общество по адресу: 123995, Москва, Б. Бронная, д. 6, стр. 1, тел.: +7 (495) 697-3335; и на сайте РАО: www.rao.ru (подвести курсор на «Правообладатели», далее на «Авторам научных статей». Здесь находятся документы для получения авторского гонорара.

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