

ISSN 2500-2627

Номер 6

Ноябрь - Декабрь 2024



# РОССИЙСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ НАУКА

*Научно-теоретический журнал*



НАУКА

— 1727 —

|                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Г. А. Романенко, Ю. Ф. Лачуга, Я. П. Лобачевский</b><br>Основные вехи становления и развития аграрной науки России (к 95-летию ВАСХНИЛ)                                                                                                                                           | 3  |
| <b>Земледелие и мелиорация</b>                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
| <b>В. К. Каличкин, Д. С. Федоров, К. Ю. Максимович</b><br>Моделирование продуктивности севооборотов с использованием адаптивной нейро-нечеткой системы вывода                                                                                                                        | 14 |
| <b>А. А. Новиков, К. А. Родин</b><br>Влияние водных режимов почвы и систем защиты растений на продуктивность картофеля в Нижневолжском регионе                                                                                                                                       | 21 |
| <b>Растениеводство, защита и биотехнология растений</b>                                                                                                                                                                                                                              |    |
| <b>А. В. Казарина, А. С. Шишина</b><br>Изучение коллекционных образцов льна масличного в условиях юга лесостепи Среднего Поволжья                                                                                                                                                    | 25 |
| <b>В. В. Пискарев, Н. И. Бойко, В. А. Апарина, Л. П. Сочалова, Е. В. Морозова, И. Н. Леонова</b><br>Изучение коллекционных образцов яровой пшеницы, несущих ген устойчивости <i>Lr23</i> , в экологических условиях Новосибирской области                                            | 31 |
| <b>Н. Н. Савельева, А. Н. Юшков, А. С. Земисов, Н. В. Борзых, В. В. Чивилев</b><br>Сорта яблони Федерального научного центра им. И. В. Мичурина как базис обеспечения селекционного преимущества биохимического состава плодов                                                       | 40 |
| <b>М. Т. Упадышев, С. С. Макаров</b><br>Современные методы оздоровления садовых культур от вирусов                                                                                                                                                                                   | 44 |
| <b>Т. В. Вострикова, Х. С. Шихалиев, С. М. Медведева, Н. В. Столповская</b><br>Поиск физиологически активных соединений среди синтезированных органических веществ хинолинового ряда                                                                                                 | 48 |
| <b>Зоотехния и ветеринария</b>                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
| <b>О. С. Шаталина, А. А. Ярышкин</b><br>Полиморфизм гена $\beta$ -казеина и его влияние на молочную продуктивность крупного рогатого скота Уральского региона                                                                                                                        | 52 |
| <b>Е. С. Федорова, Е. Г. Чугунова, М. В. Позовникова</b><br>Изменение профиля экспрессии генов <i>TRPM2</i> и <i>RYS2</i> в период созревания системы терморегуляции цыплят как результат дозированного низкотемпературного воздействия в чувствительный период раннего эмбриогенеза | 56 |
| <b>В. В. Герасименко, А. А. Еремина, М. В. Сычева, О. Ю. Ежова, В. А. Шахов, Р. З. Мустафин</b><br>Антиоксидантный статус перепелов при комплексном использовании пробиотика и цеолита                                                                                               | 63 |
| <b>И. Ю. Ездакова, О. В. Капустина, А. Г. Григорьев</b><br>Конституционные константы как биомаркеры состояния иммунной системы животных                                                                                                                                              | 68 |

**G. A. Romanenko, Yu. F. Lachuga, Ya. P. Lobachevsky**

The main milestones in the formation and development of agricultural science in Russia  
(on the 95th anniversary of the All-Union Academy of Agricultural Sciences)

3

***Agriculture and land reclamation*****V. K. Kalichkin, K. Yu. Maksimovich, D. S. Fedorov**

Modeling crop rotation productivity using an adaptive neuro-fuzzy inference system

14

**A. A. Novikov, K. A. Rodin**

The influence of waterregimes of soil and plant protection systems on potato productivity  
in the Lower Volga region

21

***Crop production, plant protection and biotechnology*****A. V. Kazarina, A. S. Shishina**

Study of collection samples of oil flax in the conditions  
of the southern forest-steppe of the Middle Volga region

25

**V. V. Piskarev, N. I. Boyko, V. A. Aparina, L. P. Sochalova, E. V. Morozova, I. N. Leonova**

Study of collection samples of spring wheat carrying the resistance gene *Lr23*  
in the environmental conditions of the Novosibirsk region

31

**N. N. Saveleva, A. N. Yushkov, A. S. Zemisov, N. V. Borzykh, V. V. Chivilev**

Apple varieties of the I. V. Michurin Federal Scientific Center as a basis for ensuring  
the breeding advantage of the biochemical composition of fruits

40

**M. T. Upadyshev, S. S. Makarov**

Modern methods for healthizing garden crops from viruses

44

**T. V. Vostrikova, Kh. S. Shikhaliev, S. M. Medvedeva, N. V. Stolpovskaya**

Search for physiologically active compounds among synthesised organic substances of the quinoline series

48

***Animal science and veterinary medicine*****O. S. Shatalina, A. A. Yaryshkin**

Polymorphism of the  $\beta$ -casein gene and its effect on the dairy productivity of cattle the Ural region

52

**E. S. Fedorova, E. G. Chugunova, M. V. Pozovnikova**

Changes in the expression profile of *TRPM2* and *RYS2* genes during the maturation of the chick thermoregulation  
system as a result of dosed low-temperature exposure during the sensitive period of early embryogenesis

56

**V. V. Gerasimenko, A. A. Eremina, M. V. Sycheva, O. Yu. Ezhova, V. A. Shakhov, R. Z. Mustafin**

Antioxidant status of quails with the complex use of probiotic and zeolite

63

**I. Yu. Ezdakova, O. V. Kapustina, A. G. Grigoriev**

Constitutional constants as biomarkers of the state immune system of animal

68

**ОСНОВНЫЕ ВЕХИ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ АГРАРНОЙ НАУКИ РОССИИ  
(К 95-ЛЕТИЮ ВАСХНИЛ)**

© 2024 г. **Г. А. Романенко**, доктор экономических наук, академик РАН, **Ю. Ф. Лачуга**, доктор технических наук, академик РАН, **Я. П. Лобачевский**, доктор технических наук, академик РАН

Российская академия наук,  
119991, Москва, Ленинский просп., 14  
E-mail: lobachevsky@yandex.ru

*В статье изложены главные этапы развития сельскохозяйственной науки в России, начиная с работ М. В. Ломоносова и до сегодняшних дней. За этот период с единичных основополагающих исследований выдающихся ученых, посвященных образованию почвы, питанию и фотосинтезу растений, была сформирована стройная система научно-исследовательских учреждений, в составе которой действовало 255 научных учреждений, 51 селекционный центр по растениеводству и животноводству, биотехнологические и технологические центры. В научных учреждениях работало более 14,5 тыс. исследователей, половину из которых составляли доктора и кандидаты наук. Современное Отделение сельскохозяйственных наук объединяет 287 членов РАН, в том числе 161 академика и 126 членов-корреспондентов. Под их научно-методическим руководством и непосредственном участии проводятся фундаментальные и поисковые научные исследования на базе научных и образовательных учреждений подведомственных Минобрнауки России и Минсельхозу России. Усилия ученых отделения позволяют ежегодно создавать около 300 новых конкурентоспособных сортов и гибридов сельскохозяйственных культур, не уступающих мировым аналогам по урожайности и качеству продукции, около 10 новых пород, типов, линий и кроссов животных и птицы, насекомых и аквакультуры, разрабатывать около 170 новых и усовершенствованных технологий и технологических процессов производства сельскохозяйственного сырья; не менее 120 технологических способов и приемов производства сельскохозяйственной продукции; 60...70 единиц машин, приборов и оборудования, 8...10 вакцин, 12...15 препаратов и дезинфицирующих средств; 7...9 биохимических средств защиты растений.*

**THE MAIN MILESTONES IN THE FORMATION AND DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL SCIENCE IN RUSSIA (ON THE 95th ANNIVERSARY OF THE ALL-UNION ACADEMY OF AGRICULTURAL SCIENCES)**

**G. A. Romanenko, Yu. F. Lachuga, Ya. P. Lobachevsky**

Russian Academy of Sciences,  
119991, Moskva, Leninskii prosp., 32a  
E-mail: lobachevsky@yandex.ru

*The article describes the main stages of development of agricultural science in Russia, starting with the works of Lomonosov M. V. and up to the present day. During this period, from individual fundamental studies of outstanding scientists devoted to soil formation, nutrition and photosynthesis of plants, a well-organised system of research institutions was formed, which included 255 research institutions, 51 selection centres for plant growing and livestock breeding, biotechnological and technological centres. More than 14.5 thousand researchers worked in research institutions, half of whom were doctors and candidates of science. The modern Department of Agricultural Sciences unites 287 members of the Russian Academy of Sciences, including 161 academicians and 126 corresponding members. Under their scientific and methodological guidance and direct participation, fundamental and exploratory research is carried out based on scientific and educational institutions subordinate to the Ministry of Education and Science of Russia and the Ministry of Agriculture of Russia. The efforts of the department's scientists make it possible to annually create about 300 new competitive varieties and hybrids of agricultural crops that are not inferior to world analogues in terms of yield and product quality, about 10 new breeds, types, lines and crosses of animals and poultry, insects and aquaculture, develop about 170 new and improved technologies and technological processes for the production of agricultural raw materials; at least 120 technological methods and techniques for the production of agricultural products; 60...70 units of machines, devices and equipment, 8...10 vaccines, 12...15 preparations and disinfectants; 7...9 biochemical plant protection products.*

**Ключевые слова:** аграрная наука, сельское хозяйство, Российская академия наук, ВАСХНИЛ, Россельхозакадемия

**Keywords:** agricultural science; agriculture; Russian Academy of Sciences; the All-Union Academy of Agricultural Sciences; Russian Agricultural Academy

**Период начального становления.** Значимый вклад в становление и развитие аграрной науки внес М. В. Ломоносов. Своим трудом «О слоях земных» М. В. Ломоносов положил начало русскому почвоведению, установил, что питание растениям доставляет воздух, поглощаемый листьями (рис. 1).

По мнению В. И. Вернадского, Михаил Васильевич Ломоносов является не только первым русским почвоведом, но и первым почвоведом в мире. В последующем особую роль в развитии аграрной науки сыграло созданное в 1755 г. Императорское Вольное экономическое

общество. Общество при участии Российской академии наук стало основой формирования школы ученых-агрономов: А. Т. Болотова, И. М. Комова, В. А. Левшина, Ф. С. Крохалева и других. Из подготовленных работ наиболее значимыми являются: «Примечание о хлебопашестве вообще», «Об удобрении земель», «О системе земледелия» и др.

Благодаря И. М. Комову в России стали известны достижения английского сельского хозяйства. книга «О земледельных орудиях» (1785 г.) явилась первым в России печатным руководством такого рода. Огром-



**Рис. 1. М. В. Ломоносов, академик Санкт-Петербургской академии наук.**

ное значение придавалось правильной обработке полей. Вспашка рекомендовалась зяблевая, и под посевы, и под пар (рис. 2).



**Рис. 2. И. М. Козов, агроном, профессор.**

В конце XVIII в. было положено начало изучению русского чернозема, намечались биологические факторы его образования, указывалось на отличие чернозема от серых лесных почв. Вместе с этим происходит улучшение почвообрабатывающих орудий, создается новое орудие – косуля, которое переворачивало пласт и отваливало его в соседнюю борозду.

М. Г. Павловым было положено начало отечественной школе агробиологии и агрохимии. Он выдвинул теорию, близкую к учению о минеральном питании, которую изложил в книге «Курс сельского хозяйства». Создал довольно полную классификацию почв: по преобладанию веществ выделены почвы глинистые, песчаные, черноземные, по количеству чернозема – жирные и тощие, по сцеплению частиц – рыхлые и плотные (рис. 3).

Крупный вклад в развитие отечественной агрохимии внесли А. П. Любоговский, И. А. Стебут и Д. И. Менделеев. Ими были сформулированы принципы построения зональных систем применения удобрений, дифференцирования их в зависимости от агрохимических свойств почв и возделываемых культур.

Д. И. Менделеев и сам закладывал опыты с удобрениями и считал, что сельское хозяйство рационально там, где имеются выгодные человеку породы животных и сорта растений, сокращаются затраты физического труда за счет применения орудий и машин. Рациональное земледелие возможно только на основе развитой



**Рис. 3. М. Г. Павлов, агробиолог, основоположник теории земледелия в России.**

промышленности, снабжающей сельское хозяйство машинами, орудиями, минеральными удобрениями. Он считал, что сельское хозяйство нуждается в гораздо больших финансовых вложениях, чем любая другая отрасль (рис. 4).



**Рис. 4. Д. И. Менделеев, русский ученый-энциклопедист: химик, физик, метеоролог, технолог, геолог, нефтяник.**

Вторая половина XIX в. отличается бурным прогрессом аграрной науки и техники. Формируется «могучая кучка» русской агрономии. Агрономия, бывшая еще при М. Г. Павлове единой, расчленилась: в ней выделились земледелие (А. В. Советов, И. А. Стебут), сельскохозяйственная химия (А. Н. Энгельгардт, Г. Г. Густавсон), почвоведение (В. В. Докучаев, П. А. Костычев), лесоводство (Г. Ф. Морозов, Г. Н. Высоцкий, М. К. Туровский), ботаника и физиология (К. А. Тимирязев).

Начались систематические исследования по разработке мер борьбы с засухой с использованием полевых защитных полос (Н. С. Мордвинов, И. Я. Данилевский, В. П. Скаржинский, В. В. Докучаев). Специальная экспедиция под руководством В. В. Докучаева создала в Каменной степи и на Украине опытные участки с системой полевых защитных лесных полос и приступила к облесению оврагов и песков.

Формирование агрономии как науки связано с именем А. В. Советова, который осуществил дифференциацию агрономии на почвоведение, агрохимию, растениеводство и селекцию.

Один из основоположников русской агрономической науки И. А. Стебут разработал первую классификацию полевых растений (выделил растения парового поля, зернового клена и лугового клена), заложил теоре-

тические основы севооборотов. Он сформулировал приемы, с помощью которых обеспечиваются высокие урожаи озимых по занятым парам, разработал указания по использованию люпина, донника, люцерны, житняка, кострца (рис. 5).



**Рис. 5. И. А. Стебут, профессор, писатель и практик по сельскому хозяйству.**

Научные труды В. В. Докучаева, основоположника школы научного почвоведения и географии почв, положили начало фундаментальному почвоведению как самостоятельной отрасли естествознания. В его капитальных работах «Итоги о русском черноземе», «Картография русских почв» изложены положения о почве как об уникальном природном теле, открыты основные закономерности генезиса и распространения почв (рис. 6).



**Рис. 6. В. В. Докучаев, геолог и почвовед, профессор минералогии и кристаллографии.**

Огромный вклад в развитие аграрной науки К. А. Тимирязева, который заложил основы физиологии растений, доказал, что разложение углекислого газа связано не с яркостью света, как это было принято считать в научных кругах, а с энергией. В области агрономии он выступал как теоретик и экспериментатор. По его мнению, центральным предметом земледелия является растение. К. А. Тимирязев впервые ввел в научную практику вегетационный опыт для изучения питания растений, положив начало развитию вегетационного метода (рис. 7).

Его основные капитальные труды озаглавлены сжато и емко – «Солнце, жизнь и хлорофилл», «Спектральный анализ хлорофилла», «Об усвоении света растениями» и другие.



**Рис. 7. К. А. Тимирязев, ученый-физиолог, естествоиспытатель.**

Свои первые опыты по изучению удобрений К. А. Тимирязев провел под руководством Д. И. Менделеева и написал сочинение «Борьба растений с засухой» – по сути, программу развития сельского хозяйства.

Под влиянием К. А. Тимирязева появились первые научные труды, посвященные лучшему устройству и ведению сельскохозяйственных работ с применением осушения. Труды А. Т. Болотова, В. А. Левшина, А. А. Самбровского, Ф. В. Удолова были заложены подходы к улучшению земель с помощью культуртехники, внесения удобрений, травосеяния, подбора сельскохозяйственных культур применительно к природным условиям и свойствам почв. Велась работа по улучшению сырых лугов, осушению переувлажненных лесных почв.

**Начало селекционно-семеноводческой работы в России относится к 80-м годам XIX в.** Известный селекционер Е. А. Грачев создал множество сортов овощей и картофеля, в том числе свыше 30 сортов редиса, 15 сортов салатного сельдерея (рис. 8).



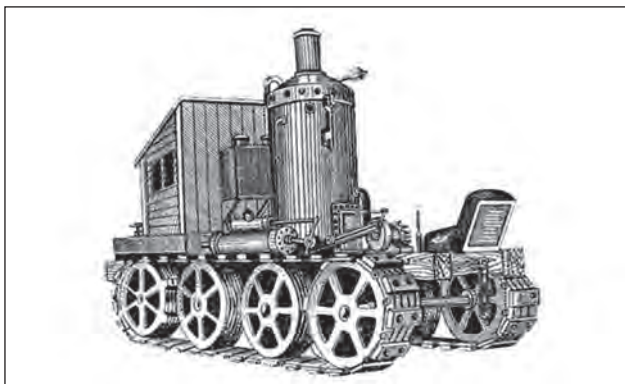
**Рис. 8. Е. А. Грачев, селекционер-овощевод.**

В конце XIX – начале XX в. в России были созданы первые селекционные учреждения. В 1884 г. было организовано Полтавское опытное поле, где А. Е. Зайкевич начал изучение сортового состава русских видов пшеницы и люцерны. В 1886–1899 гг. были открыты Немерчанская и Уладово-Люлинецкая опытно-селекционные станции по сахарной свекле.

Первую в мире комбинированную зерноуборочную машину предложил и построил в 1868 г. русский изобретатель А. Р. Власенко, который назвал ее жнеей-

молотилкой. Постановлением общего собрания членов Вольного экономического общества за это изобретение он был награжден золотой медалью. Но в условиях России его комбайн не нашел применения, и подобная машина появилась в США только в 1879 г.

В 1879 г. волжский изобретатель Ф. А. Блинов запатентовал машину с гусеничным устройством ходовой части. Уже на следующий год он демонстрировал ее на выставке в городе Вольске (рис. 9).



*Рис. 9. Первый гусеничный трактор конструкции Ф. А. Блинова.*

В конце XIX в. началось активное оснащение сельского хозяйства техническими средствами. Одновременно с этим активно развивались исследования по почвоведению, земледелию, семеноводству, племенному животноводству, кооперации, экономике.

Особую значимость имеет становление, развитие и размещение научно-опытных учреждений в различных регионах России.

Решающую роль в этом принадлежала трем выдающимся ученым и организаторам аграрной науки: И. А. Стебуту – председателю Ученого комитета Министерства земледелия, П. А. Костычеву – директору Департамента Министерства земледелия и А. С. Ермолову – министру земледелия.

**Важнейшие достижения аграрной науки под эгидой ВАСХНИЛ.** 25 июня 1929 г. Совет народных комиссаров СССР принял постановление «Об организации Всесоюзной академии им. В. И. Ленина» как высшего научного центра страны в области сельского хозяйства.

Президентом ВАСХНИЛ был назначен Н. И. Вавилов, выдающийся организатор биологической и сельскохозяйственной науки, гениальный ученый, заложивший фундамент новых научных направлений в растениеводстве, ботанике, генетике, селекции и других науках, крупнейший географ-путешественник, талантливый педагог. Н. И. Вавиловым осуществлено системное становление сельскохозяйственной науки в стране. По его инициативе и при непосредственном руководстве созданы крупные научно-исследовательские институты с широкой сетью филиалов и опытных станций. В системе ВАСХНИЛ развернулись широкие исследования по многим направлениям сельскохозяйственной науки. Глубокие исследования по созданию новых сортов сельскохозяйственных культур были проведены Д. Л. Радзинским, Н. В. Рудницким, А. П. Шехурдиным. Были созданы научные школы В. В. Докучаевым и А. Н. Костычевым в области почвоведения, агролесомелиорации, лесоводства. Академик ВАСХНИЛ В. П. Горячкин создал новое направление науки – «Земледельческую механику». Получило активное развитие зоотехническая наука благодаря трудам академиков ВАСХНИЛ

М. Ф. Иванова, В. К. Милованова, М. М. Завадовского. Ветеринарно-медицинская наука получила дальнейшее развитие в трудах академика К. И. Скрябина, основателя отечественной школы гельминтологов, академика ВАСХНИЛ С. Н. Вышелесского. Результаты научных исследований российских ученых-селекционеров академиков ВАСХНИЛ В. С. Пустовойта, П. Н. Лукьяненко, М. И. Хаджинова, В. Н. Мамонтовой, И. А. Мазлумова, П. Н. Константинова и многих других получили высокую оценку и признание научной общественности России и многих зарубежных стран.

С 1932 по 1992 г. было проведено 148 сессий и общих собраний ВАСХНИЛ. Часто практиковались выездные сессии в регионах, структура хозяйства которых соответствовала проблематике обсуждавшихся вопросов. Первая подобная сессия проходила в 1932 г. в городе Острове Псковской области и была посвящена развитию льноводства, в Ташкенте – с рассмотрением вопросов ирригации и хлопководства, в Алма-Ате – овцеводства, в Целинограде и Шортанды – целинного земледелия, Новосибирске и Тюмени – сельского хозяйства Западной Сибири, Саратове и Волгограде – борьбы с засухой, Ростове-на-Дону – преодоления ветровой эрозии, Минске – освоения и использования болотных и заболоченных земель, Смоленске – развития Нечерноземной зоны России.

53 селекционных центра и 200 разноплановых селекционно-опытных учреждений проводили исследования и практические работы по 180 сельскохозяйственным культурам. Ежегодно в среднем создавалось 700–800 новых сортов и гибридов, 150–200 из них активно внедрялись в производство.

С 1971 по 1991 г. создано и районировано 1100 сортов и гибридов зерновых, зернобобовых, крупяных культур и кукурузы, 700 – кормовых, 150 – картофеля. Все поля в стране засеивались только отечественными высокопродуктивными семенами.

Ученые за время существования ВАСХНИЛ вывели 11 высокопродуктивных пород крупного рогатого скота, 16 пород свиней, 30 – овец, 11 – лошадей, 7 пород птицы. В колхозах и совхозах страны преобладал породный скот.

В период действия ВАСХНИЛ 70 ученых стали лауреатами Ленинских и Государственных премий, 60 – заслуженными деятелями науки и техники, 35 членов академии удостоены звания Героя Социалистического Труда. Академики В. Я. Юрьев, Т. С. Мальцев, и В. Н. Ремесло удостоены звания Героя Социалистического Труда дважды. Трое академиков – Б. А. Рунов, В. Г. Трушечкин и Х. А. Хачатрян – удостоены звания Герои Советского Союза за мужество, проявленное в годы Великой Отечественной войны.

Значительно увеличилась доля научных разработок, освоенных производством и дающих высокий экономический эффект. 37 академиков и 21 член-корреспондент избраны членами зарубежных академий и научных обществ, почетными докторами университетов.

Членами академии подготовлено 600 докторов и более 5,5 тыс. кандидатов наук.

В составе ВАСХНИЛ на начало 1992 г. было 158 академиков, 146 членов-корреспондентов и 80 иностранных членов. Из 304 членов ВАСХНИЛ 202 человека трудилось на территории Российской Федерации.

**Агроэкономическая наука.** В нашей стране, особенно после 1929 г., экономическим исследованиям придавалось большое социальное и политическое значение.

Огромный вклад в аграрную экономическую науку внесли представители организационно-

производственной школы, особенно А. В. Чаянов, Н. Д. Кондратьев, Н. П. Макаров, А. Н. Челинцев, Л. Н. Литошенко.

А. В. Чаянов показал некапиталистическую сущность трудового крестьянского хозяйства. Н. Д. Кондратьев считал, что Россия при правильной организации сельскохозяйственного производства, внедрении результатов передовых научных исследований может стать крупнейшим экспортером продовольствия. Он предлагал «дать простор здоровой инициативе массового сельскохозяйственного производителя на аграрном фронте».

Активное развитие агроэкономической науки началось со второй половины 50-х гг., когда в предмет научных исследований вернулись такие категории, как себестоимость, цена, рентабельность, прибыль.

Получило широкое применение математическое моделирование и социально-экономическое прогнозирование. Пионерами этого направления применительно к аграрной сфере были академики ВАСХНИЛ В. С. Немчинов и С. С. Сергеев, профессора Р. Г. Кравченко, Э. Н. Крылатых, В. П. Можин, В. В. Милосердов. Восстанавливалась сеть научно-исследовательских учреждений экономического профиля. В Москве был создан Всесоюзный НИИ экономики сельского хозяйства с филиалами в Ростове-на-Дону, Воронеже и Саратове. Затем – в Киеве, Минске, Вильнюсе, Кишиневе, Алма-Ате, Ташкенте, Тбилиси, Новосибирске, Ленинграде, Фрунзе.

**Земледельческая наука.** Значимые исследования в ВАСХНИЛ занимали исследования по земледелию, почвоведению, лесоводству и гидромелиорации. По этим направлениям был накоплен богатый материал, выдвинулось много талантливых ученых.

В конце 1950-х гг. и особенно в 1960-х гг. в стране резко усилилась дефляция почв, охватив огромные территории европейской и азиатской частей Союза. Работами Т. С. Мальцева и А. И. Бараева, их подвижничеством, организацией совместной работы большого отряда ученых и специалистов пыльные бури были приостановлены. Начала действовать почвозащитная система земледелия.

Обширными экспериментальными исследованиями было доказано, что гумус могут накапливать не только многолетние растения, как считалось раньше, но при определенных условиях и однолетние (рис. 10).



*Рис. 10. Т. С. Мальцев – выдающийся ученый-аграрник, почетный академик ВАСХНИЛ, дважды Герой Социалистического Труда.*

Большой вклад в науку о земле внесли академики ВАСХНИЛ С. С. Соболев – в эрозиоведение, И. И. Синягин, В. Д. Панников, В. В. Егоров, Н. П. Панов – в почво-

ведение, Б. А. Неунылов, Д. А. Кореньков – в агрохимию. Т. Н. Кулаковская предложила систему обеспечения плодородия почв для обширной лесолуговой зоны, И. С. Шатилов разработал методы программирования урожаев и воспроизводства плодородия почвы с учетом охраны природной среды, Л. Л. Шишов – серию моделей точного описания процессов, происходящих в почве при различных уровнях интенсивности ее обработки, С. Г. Скоропанов – технологии по окультуриванию торфяников, мелиорации заболоченных земель (рис. 11).



*Рис. 11. И. С. Шатилов – крупный ученый в области земледелия и растениеводства, Герой Социалистического Труда.*

Реальный результат дали исследования по контурно-мелиоративному земледелию, которое обеспечивает сохранение природных ресурсов и высокую адаптивность к исторически сложившимся формам хозяйствования.

В этот период была реализована Государственная программа «Плодородие почв». Над ее реализацией работал ряд научных коллективов при непосредственном участии членов академии А. Н. Каштанова, И. С. Шатилова, Н. З. Милащенко, Б. Б. Шумакова, Л. Н. Петровой, М. К. Сулейменова. Были решены биолого-экологическая и организационно-экономическая проблемы.

**Лесоводческая наука и агролесомелиорация.** Развивая идеи Г. Ф. Морозова, М. М. Орлова, В. Н. Сукачева, ветераны лесоводческой науки, члены ВАСХНИЛ И. С. Мелехов, А. Д. Букштынов, В. Г. Нестеров совместно с коллегами из исследовательских институтов и вузов разработали комплексы мер по созданию экологически устойчивых, высокопродуктивных лесов и их многоцелевого использования. Под руководством И. С. Мелехова создана принципиально новая динамическая модель классификации типов лесов и вырубок как научно обоснованная база лесовосстановления и лесопользования.

Академиком А. С. Яблоковым, членами-корреспондентами С. С. Пятницким, А. В. Альбенским, Г. П. Озолиным, Г. Я. Маттисом решен ряд генетических проблем селекции и ускорения роста орехоплодных, ультраскороспелости тополей с продуктивностью древесины до 20...40 м<sup>3</sup>/га в год.

Развивались исследования по пирологии, в результате чего были разработаны мероприятия по обнаружению и тушения лесных пожаров, существенно уменьшился ущерб от них. Активно внедрялись исследования механизации лесного дела под руководством академика ВАСХНИЛ Н. А. Моисеева.

Активно развивалось важное направление сельскохозяйственной науки – агролесо- и фитомелиорация. Под

руководством академиков Г. Н. Высоцкого и Н. И. Суса, а затем В. Н. Виноградова, Е. С. Павловского осуществлялись крупномасштабные работы по созданию биологически продуктивных, экономичных и экологических агролесоландшафтов.

**Гидромелиорация.** Гидромелиоративная наука с первых дней существования ВАСХНИЛ активно развивалась. Ее основные положения разработаны академиками А. И. Стойновичем, Н. И. Железновым, А. Ф. Миддендорфом, Г. И. Вильдом, А. И. Воейковым.

Основы современной мелиоративной науки заложены академиком ВАСХНИЛ А. Н. Костяковым, создавшим плодотворную научную школу. Ее основные положения развивали академики Е. В. Оппоков, В. Г. Глушков, Б. А. Шумаков, С. Ф. Аверьянов, И. А. Шаров, В. В. Пославский, А. Н. Асоченский, А. И. Мурашко.

**Агрохимия.** Исследования ученых ВАСХНИЛ дали мощный толчок развитию химизации сельского хозяйства. Агрохимия как наука ведет свое начало с середины XIX в. Ее основу заложили М. Г. Павлов, Д. И. Менделеев, А. Н. Энгельгардт, позднее К. К. Гедройц. С 1931 г. функционировала географическая сеть опытных станций по испытанию удобрений. Она включала свыше 350 учреждений, размещенных по всей территории бывшего Советского Союза. Это позволило сформировать научные основы применения удобрений и химических средств защиты растений в различных почвенно-климатических зонах страны.

**Растениеводство и селекция.** Выдающийся ученый Н. И. Вавилов охватывал все стороны растениеводческой науки и, прежде всего, генетические основы повышения биологического потенциала возделываемых культур с их иммунитетом к стрессовым и другим неблагоприятным факторам. Он создал теоретические основы селекции, не устаревшие до настоящего времени. Первые научные работы гениального биолога посвящены иммунологии и выполнены еще в студенческие годы в стенах и на опытных полях Тимирязевки. Исследования Н. И. Вавилова успешно продолжили А. П. Шехурдин, П. П. Лукьяненко, В. Н. Ремесло, В. Н. Мамонтова, П. Ф. Гаркавый и другие. М. И. Хаджинову принадлежит открытие цитоплазматической мужской стерильности, Ф. Г. Кириченко и И. Г. Ка-

линенко создали сорта озимых твердых и тургидных пшениц, В. С. Пустовойт – подсолнечник беспрецедентно высокой масличности. Р. Г. Бутенко вместе с Ю. Ю. Глебой и К. М. Сытником сделали открытие, доказав факт двуродительского наследования генов цитоплазмы при неполовых скрещиваниях. Каждый из названных ученых – крупная личность в отечественной науке (рис. 12).

П. П. Лукьяненко и В. С. Пустовойт совершили научный подвиг мирового значения. Их сорта, как и сорта В. Н. Мамонтовой, не уходят с полей вот уже много десятилетий. Эти высокопродуктивные сорта являются донорами для большого числа новых сортов, их посевы занимают миллионы гектаров как в нашей стране, так и за ее рубежами. Это – целая эпоха в мировой селекции культурных растений.

Плодотворно работали члены ВАСХНИЛ И. Г. Калининко, Д. А. Долгушин, Г. С. Галеев, П. И. Альсмиг, Г. И. Тараканов, И. П. Калинина, Ю. М. Пучков, В. М. Шевцов, А. М. Шевченко, М. М. Мирзаев, Е. Н. Седов, Н. А. Родина, Э. Д. Неттевич, С. И. Гриб. Их усилиями были созданы сорта и гибриды зерновых колосовых культур с потенциалом продуктивности 100 ц/га и более, кукурузы – 150, картофеля – 800–1000, плодов 800, семян люцерны – более 10 ц/га. Получены озимые твердые пшеницы, неосыпающиеся сорта гороха, ряд сортов зерновых, устойчивых к ржавчине, люпина – к фузариозу, яблони – к парше.

Вопросами адаптивной генетики плодотворно занимался академик А. А. Жученко, автор нескольких крупных монографий по этой проблеме.

Исключительная роль в развитии растениеводства принадлежит ВИРу – детищу Н. И. Вавилова, в котором создана крупнейшая в мире коллекция семян культурных растений, содержащая более 60 тыс. образцов, и она постоянно пополняется. С этой целью каждый год работали десятки экспедиционных отрядов. ВИР обеспечивает исходным материалом для селекции 52 центра России и других государств СНГ. В свою очередь, для пополнения коллекции и проведения исследований ВИР получает образцы растений из других стран.

**Защита растений.** Наука о защите растений также имеет свою богатую историю, огромный багаж знаний и разработок. Первый президент ВАСХНИЛ Н. И. Вавилов придавал огромное значение развитию этого направления. С первых лет создания ВАСХНИЛ велись работы по биологическим методам защиты растений от болезней и вредителей. Для этой цели был создан институт биометодов, возглавляемый Н. А. Филипповым. Агротехнические и механические способы защиты растений разрабатывались членами ВАСХНИЛ Н. М. Кулагиним, В. Н. Щеголевым и Н. Н. Архангельским.

Большие заслуги в разработке общей теории и физиолого-биохимических основ иммунитета к возбудителям болезней принадлежат М. С. Дунину и В. Ф. Пересыпкину.

Ведущим направлением в этой отрасли науки выступает управление фитосанитарным состоянием агроценозов путем разработки интегрированных систем защиты растений и карантина. В этом плане плодотворны труды членов академии Ю. Н. Фадеева, К. В. Новожилова, П. И. Сусидко, В. Ф. Самерсова, С. Н. Алимухамедова, М. П. Лесового. В результате их исследований в 2–3 раза сокращены потери продукции от болезней и вредителей, резко уменьшился расход пестицидов.

**Зооинженерная наука.** В конце 1920-х гг. закладывались основы зоотехнической науки. У ее истоков стояли П. Н. Кулешов, Н. П. Чирвинский, М. Ф. Иванов,



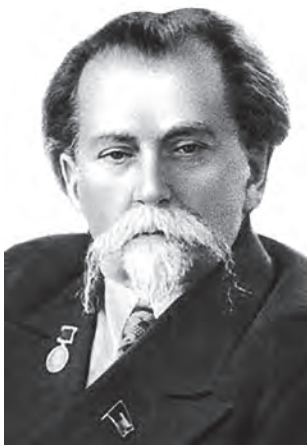
Рис. 12. Выдающиеся ученые-селекционеры, академики (слева направо): дважды Герой Социалистического Труда В. С. Пустовойт, Герой Социалистического Труда М. И. Хаджинов и дважды Герой Социалистического Труда П. П. Лукьяненко.

Е. Ф. Лискун. Одновременно с ВАСХНИЛ создается и ВИЖ (Всесоюзный институт животноводства), система племенных рассадников и хозяйств. Научные исследования разветвляются по всему спектру проблем животноводства, создаются основы развития отрасли. На этом фоне следует особо отметить такие открытия мирового уровня, как создание впервые в мире профессором И. И. Ивановым метода искусственного осеменения сельскохозяйственных животных и способа длительного хранения гамет, разработанного академиком ВАСХНИЛ В. К. Миловановым и профессором И. И. Соколовской. Метод криоконсервации половых клеток широко используется в животноводстве и медицине всего мира. Мировое животноводство своим ускоренным прогрессом во многом обязано этим выдающимся достижениям (рис. 13).



**Рис. 13. Академик ВАСХНИЛ В. К. Милованов – крупный ученый в области биологии воспроизведения животных.**

**Ветеринарная медицина.** В отечественной ветеринарии сформировались крупные школы мирового масштаба. Это, прежде всего, школа гельминтологов академика ВАСХНИЛ, члена АН СССР и АМН СССР К. И. Скрябина. Труды ученых научной школы Скрябина с 1935 г. животноводство было очищено от паразитирующих гельминтов (рис. 14).



**Рис. 14. Академик ВАСХНИЛ, академик АН СССР и академик АМН СССР К. И. Скрябин – выдающийся ученый, создатель науки гельминтологии в ветеринарии, медицине и биологии, Герой Социалистического Труда.**

Крупная фигура в мировой и отечественной ветеринарной медицине А. Х. Мальцев. На основе его открытия создана в Институте экспериментальной ветеринарии высокоэффективная вакцина против трихофитии, или стригущего лишая кожи крупного рогатого скота. Вакцина запатентована в 23 странах, включая США, экспортируется в десятки стран мира. Это открытие позволило полностью ликвидировать заболевание крупного рогатого скота стригущим лишаем, на которое приходилось 40 % всех заболеваний в животноводстве.

В институтах ВАСХНИЛ академиком С. Н. Вышеселским и его соратниками И. А. Бакуловым, В. П. Урбаном, Я. Р. Коваленко созданы вакцины и сыворотки против таких опасных болезней, как сибирская язва, ящур, бруцеллез, туберкулез, чума свиней.

Школа ветеринарной санитарии, гигиены и экологии, основанная академиками ВАСХНИЛ А. А. Поляковым и В. С. Ярных, известна далеко за пределами страны, признана Всемирной организации здравоохранения. Под руководством академика ВАСХНИЛ В. П. Шишкова разработана технология получения противолейкозного антигена.

**Наука о переработке продукции.** В ВАСХНИЛ были заложены научные основы переработки и хранения сельскохозяйственной продукции. В результате исследований были существенно снижены потери сырья, увеличен ассортимент и улучшено качество продукции.

Научные школы академиков ВАСХНИЛ И. А. Рогова, Н. Н. Липатова, В. И. Ивашова, Н. Г. Саришвили, членов-корреспондентов В. В. Молочникова, Т. В. Чижикова осуществили ряд работ биотехнологических направлений, освоение которых позволило получать высококачественные молочные, мясные, плодоовощные, хлебные, кондитерские и другие продукты, напитки, обогащенные ценными питательными веществами.

**Механизация и электрификация сельскохозяйственного производства.** Научное сообщество по праву признает академика ВАСХНИЛ и почетного академика АН СССР Василия Прохоровича Горячкина основоположником науки о сельскохозяйственных машинах и механизмах, или, как он сам называл это направление науки, «Земледельческой механики» (рис. 15).



**Рис. 15. Академик ВАСХНИЛ и почетный академик АН СССР В. П. Горячкин.**

В. П. Горячкин чрезвычайно активно и результативно сочетал науку, преподавание и внедрение научных разработок в практику. Будучи профессором Тимирязевской академии, он поставил новый курс «Сельскохозяйственные машины и двигатели», с 1913 г. руководил организованной им машиноиспытательной станцией, а с 1931 г. – созданным по его предложению Всесоюзным

институтом механизации сельского хозяйства (ВИМ). Академик В. П. Горячкин заложил основы современной науки о механизации сельского хозяйства, разработал общую теорию почвообрабатывающих машин, молотильных систем, теорию масс и скоростей применительно к сельскохозяйственным машинам, создал более 30 оригинальных измерительных приборов, разработал новые методы экспериментального исследования машин, сформировал первый атлас чертежей косилок, жаток и сноповязалок. Он видел технику в органической связи с живой природой и этим в известной мере предвосхищал кибернетику и бионику. Подготовил целую плеяду ученых и инженеров-практиков. Среди его учеников – продолжатели его традиций академики ВАСХНИЛ В. И. Желиговский, М. Х. Пигулевский, М. В. Сабликов, Б. С. Смирновский, И. Ф. Василенко, П. М. Василенко, А. Н. Карпенко, В. Н. Болтинский, М. Н. Летошнев, Н. Д. Лучинский, Б. Г. Турбин, Г. И. Назаров и другие талантливые ученые.

Исследованиями В. Н. Болтинского и его учеников созданы научные основы повышения рабочих скоростей машинно-тракторных агрегатов. Это было новое направление, получившее признание в мировой науке и практике.

Исследованию техники, ее обслуживанию, проблемам инженерно-технической службы посвящены работы академиков А. И. Селиванова, М. С. Рунчева, В. И. Чернованова, профессора Ю. И. Киртбая и их коллег. Эти исследования позволили эффективно организовать эксплуатацию тракторов и комплексов сельскохозяйственных машин.

Вопросам электрификации и электромеханизации всегда придавалось приоритетное значение. В этой области фундаментальные работы осуществлены академиками ВАСХНИЛ И. А. Будзко, М. Т. Ефремовым, П. Н. Листовым, Л. Г. Прищепом. Ими создана научная база применения электроэнергии в различных сферах сельскохозяйственного производства, включая животноводство, в развитии электроэнергетического строительства.

Ученые ВАСХНИЛ были выполнены пионерские исследования по электронизации и автоматизации сельскохозяйственного производства. Членами ВАСХНИЛ И. А. Будзко, И. Ф. Бородиным, Л. И. Гром-Мазничевским, И. П. Ксеневичем, И. С. Нагорским, И. И. Мартыненко, Л. В. Погорелым создана и реализуется программа по автоматизации на основе электроники, по конструированию ферм-автоматов и других предприятий, оптимизации рабочих процессов. Массовое освоение этих разработок позволило в несколько раз повысить производительность труда.

Особенно актуальными стали ресурсосбережение и надежность техники. Этими проблемами углубленно занималась группа ученых во главе с академиками ВАСХНИЛ М. М. Северным и В. М. Кряжковым.

Огромным достижением ученых ВАСХНИЛ стало создание Систем машин как научно-обоснованной совокупности технических средств сельскохозяйственного назначения со взаимно гармонизированными параметрами. Бал совершен принципиальный переход от разработки отдельных, не связанных друг с другом машин, к созданию комплексов согласующихся технических средств для реализации интенсивных технологий возделывания широкого спектра сельскохозяйственных культур.

С 1956 по 1990 г. было создано 8 Систем машин, разработано и поставлено на производство несколько тысяч наименований машин и оборудования для рас-

тениеводства, животноводства, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции. Основным разработчиком Систем машин выступил Всесоюзный институт механизации (ВИМ).

Президентами ВАСХНИЛ назначались и избирались выдающиеся ученые, внесшие огромный вклад в развитие сельскохозяйственной науки: Н. И. Вавилов, А. И. Муралов, Т. Д. Лысенко, М. А. Ольшанский, П. П. Лобанов, П. П. Вавилов, А. А. Никонов.

**Период деятельности Российской академии сельскохозяйственных наук, 1992–2013 гг.** Указом Президента Российской Федерации 30 января 1992 г. создана Российская академия сельскохозяйственных наук (Россельхозакадемия) на базе ВАСХНИЛ.

В соответствии с Уставом Российская академия сельскохозяйственных наук стала высшей самоуправляемой научной организацией в системе агропромышленного комплекса и осуществляющей научное обеспечение агропромышленного производства в Российской Федерации. Она объединила действительных членов и членов-корреспондентов, иностранных членов, избранных общим собранием Академии, ученых научно-исследовательских учреждений, высших учебных заведений, других научно-технических организаций; координировала и направляла их усилия на развитие фундаментальных и приоритетных прикладных исследований в области сельского, водного, лесного хозяйств, пищевой и перерабатывающей промышленности, других отраслей, работающих на агропромышленный комплекс; обеспечивала подготовку научных кадров, осуществляла научно-техническое сотрудничество с зарубежными странами. Главной задачей научных учреждений стало развитие фундаментальных и приоритетных прикладных исследований.

В системе Россельхозакадемии был сосредоточен основной научный потенциал агропромышленного комплекса Российской Федерации, в ее структуре действовало 255 научных учреждений, 51 селекционный центр по растениеводству и животноводству, биотехнологические и технологические центры. В научных учреждениях Россельхозакадемии работало более 14,5 тыс. исследователей, половина из них – доктора и кандидаты наук.

В составе Россельхозакадемии 150 академиков и 145 членов-корреспондентов из числа выдающихся ученых России, а также 186 иностранных членов Академии.

Научно-производственная инфраструктура Россельхозакадемии включала обширную экспериментально-опытную базу, в состав которой входили свыше 300 организаций научного обслуживания и свыше 100 экспериментально-промышленных предприятий.

Опытно-производственные хозяйства общей площадью 5,1 млн га земли, в том числе 1,7 млн га пашни, 316 тыс. голов крупного рогатого скота, 115 тыс. свиней, 40 тыс. овец и 1,8 млн голов птицы.

Ежегодно хозяйства Россельхозакадемии производили более 400...450 тыс. т семян высших репродукций зерновых, масличных и других сельскохозяйственных культур, более 9 тыс. голов племенных животных.

Основным научным и научно-организационным структурным формированием Россельхозакадемии были девять отраслевых отделений: отделение экономики и земельных отношений, отделение земледелия, отделение мелиорации, водного и лесного хозяйства, отделение растениеводства, отделение защиты растений, отделение зоотехнии, отделение ветеринарной медицины, отделение механизации, электрификации и автоматизации, от-

деление хранения и переработки сельскохозяйственной продукции. Одно региональное отделение и три научно-методических региональных центра, два отраслевых научно-методических центра – по агрохимии и агрохимическому обслуживанию и проблемам мелиорации земель и водного хозяйства, которые объединили ученых одной или нескольких смежных специальностей, членов Академии по соответствующему профилю. Отраслевые отделения работали по фундаментальным и важнейшим прикладным исследованиям по закрепленной отрасли науки; координировали деятельность научных учреждений, предприятий и организаций, входящих в его состав; организовывали подготовку научных кадров и осуществляли другие важные функции.

Бессменным президентом Россельхозакадемии работал Геннадий Алексеевич Романенко, выдающийся ученый и организатор, внесший огромный вклад в развитие отечественной сельскохозяйственной науки (рис. 16). Вице-президентами Россельхозакадемии на период присоединения ее к Российской академии наук работали академики Андрей Леонидович Иванов, Юрий Федорович Лачуга, Андрей Борисович Лисицын, Иван Васильевич Савченко, Иван Григорьевич Ушачев, Владимир Иванович Фисинин.



Рис. 16. Академик Г. И. Романенко, президент Российской академии сельскохозяйственных наук.

**Присоединение Россельхозакадемии к Российской академии наук. Создание Отделения сельскохозяйственных наук РАН.** Федеральным законом от 27 сентября 2013 г. № 253-ФЗ «О Российской академии наук, реорганизации государственных академий наук и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» Россельхозакадемия присоединена к Российской академии наук в качестве Отделения сельскохозяйственных наук РАН с передачей подведомственных академии научных и производственных организаций в ведение ФАНО России, а впоследствии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Основной задачей и функциями Отделения стали проведение фундаментальных и поисковых научных исследований, финансируемых за счет средств федерального бюджета, экспертиза планов НИР и отчетов о их реализации, программ, проектов и других документов, представляемых министерствами и ведомствами Российской Федерации; мониторинг и оценка результатов научной деятельности государственных научных организаций, независимо от их ведомственной принадлежности; популяризация и пропаганда науки, научных знаний, достижений науки и техники, сохранение и развитие научных школ, систематизация

багажа знаний для последующих поколений молодых ученых аграрной науки, обеспечение преемственности поколений научных работников в тесной связи их с учеными научных организаций и отделений Российской академии наук.

После слияния Россельхозакадемии с Российской академией наук с 2013 по 2017 г. вице-президентом РАН, курирующим ОСХН РАН, работал академик РАН Г. А. Романенко.

С 2017 по 2022 г. вице-президентом РАН, курирующим ОСХН РАН, работала академик И. М. Донник.

С 2022 г. курирующим отделением вице-президентом стал академик РАН Н. К. Долгушкин.

Академик РАН Ю. Ф. Лачуга возглавлял отделение в качестве академика-секретаря с 2013 по 2022 г.

Академик РАН Я. П. Лобачевский избран академиком-секретарем и возглавляет отделение с 2022 г.

Многофункциональность сельского хозяйства, особенности регионального создания новых конкурентоспособных сортов и гибридов сельскохозяйственных культур, пород, типов и кроссов животных и птицы, разработки и использования разных видов машин и оборудования для разнообразного сельскохозяйственного производства послужили основанием для создания при Отделении сельскохозяйственных наук РАН шести секций по основным приоритетным направлениям исследований сельскохозяйственной сферы науки: экономики, земельных отношений и социального развития села (руководитель направления – заместитель академика-секретаря Отделения, академик РАН А. И. Алтухов); земледелия, мелиорации, водного и лесного хозяйства (руководитель направления – заместитель академика-секретаря Отделения, академик РАН А. А. Завалин); растениеводства, защиты и биотехнологии растений (руководитель направления – заместитель академика-секретаря Отделения, академик РАН В. М. Косолапов); зоотехнии и ветеринарии (руководитель направления – заместитель академика-секретаря Отделения, академик РАН Н. А. Зиновьева); механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства (руководитель направления – заместитель академика-секретаря Отделения, академик РАН А. С. Дорохов); хранения и переработки сельскохозяйственной продукции (руководитель направления – заместитель академика-секретаря Отделения, академик РАН А. Н. Петров).

Ученые секции экономики, земельных отношений и социального развития села ежегодно разрабатывают различные виды научной продукции, издают более 60 книг, монографий, учебников и учебных пособий. Научный совет секции рассматривает вопросы научного обеспечения развития агропромышленного комплекса, земельных отношений и эффективного использования земельных ресурсов. Повышение степени научного обеспечения развития АПК страны в последние годы (2018–2023 гг.) оказало существенное влияние на увеличение производства сельскохозяйственной продукции и ее качество.

По направлению земледелия, мелиорации водного и лесного хозяйства ежегодно разрабатываются свыше 60 видов научной продукции, включающей адаптивно-ландшафтные системы земледелия; технологии и перспективные мелиоративные и лесохозяйственные комплексы; методы эффективного использования различных элементов питания растений; деятельности почвенных микроорганизмов в системе «почва – растение». Созданный при этой секции научный Совет рас-

смаатривает вопросы разработки новых, перспективных технологий и технологических систем производства сельскохозяйственной продукции, современные пути сохранения и повышения плодородия почв, новые методы внесения удобрений с их характеристикой, определяет актуальную тематику для научных исследований.

Результаты научных исследований по секции земледелия, мелиорации, водного и лесного хозяйства позволяют ежегодно издавать около 70 книг, монографий, учебников и учебных пособий, опубликовать свыше 1150 статей, из которых 980 – в журналах, индексируемых в Web of Science, Scopus, РИНЦ.

По направлению растениеводства, защиты и биотехнологий растений проводятся научные исследования по совершенствованию системы селекции и семеноводства сельскохозяйственных культур; развития и использования генофонда растений; созданию новых сортов и гибридов сельскохозяйственных культур; проблемам химической и биологической защиты растений; оптимизации разработки и создания генно-модифицированных организмов и ряда других проблем. Созданный по этому направлению научный Совет рассматривает перспективные вопросы совершенствования системы селекции, разработки новых методов биотехнологии, способствующих созданию новых конкурентоспособных сортов и гибридов сельскохозяйственных культур, перспективы развития растениеводства как одной из важнейших отраслей сельского хозяйства.

В результате ежегодно создается около 300 сортов и гибридов сельскохозяйственных культур, освоение которых в производстве в сочетании с сортовыми технологиями обеспечили производство зерна в стране на уровне свыше 120 млн т. Созданные новые сорта озимой пшеницы обеспечили урожайность более 150 ц/га в бункерном весе.

Результаты научных исследований по этому направлению позволили издать свыше 90 книг, учебников и учебных пособий, монографий, опубликовать 2700 статей, из которых свыше 2000 – в журналах, индексируемых в Web of Science, Scopus, РИНЦ.

Ученые секции зоотехнии и ветеринарии проводят исследования генетических технологий, современных технологий разведения различных видов животных и птицы, аквакультуры, оценки племенной ценности животных на основе использования полногеномных данных, прогнозов геномной племенной ценности, новых современных технологий содержания и кормления различных видов животных и птицы.

По результатам научных исследований этого направления ежегодно издается свыше 80 книг, монографий, учебников и учебных пособий, опубликовывается около 1800 статей, из которых 1700 – в журналах Web of Science, Scopus, РИНЦ. Ученые секции ежегодно получают свыше 100 видов научной продукции, способствующей созданию новых, не уступающих мировым аналогам пород, типов и кроссов животных, птиц, насекомых и аквакультуры с высокой продуктивностью и качеством продукции.

Секция механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства разрабатывает теоретические создания новых автоматизированных и роботизированных машин и оборудования для обеспечения эффективных процессов в растениеводстве и животноводстве, механизации возделывания сельскохозяйственных культур, их уборки, переработки и хранения продукции, обработки различных видов почв, создания беспилотных летательных аппаратов,

для внесения минеральных удобрений и средств защиты растений, интеллектуальных систем.

Созданный при секции научный Совет рассматривает перспективные вопросы разработки и внедрения цифровых технологий, искусственного интеллекта в сельскохозяйственные технологии, создание и применение новых биоматериалов, применения возобновляемых источников энергии, создания биомашинных систем.

По результатам научных исследований учеными секции разработаны около 70 видов научной продукции, издано около 40 книг, монографий, учебников и учебных пособий, публикуется более 1600 статей, из которых 1500 – в изданиях Web of Science, Scopus, РИНЦ. Ученые ежегодно получают не менее 80 патентов.

Секция хранения и переработки сельскохозяйственной продукции разрабатывает технологии создания безопасных продуктов питания, создает технические средства для из реализации, осуществляет оценку сельскохозяйственного сырья и контроль их качества. Научный Совет, созданный при секции хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, рассматривает вопросы разработки новых современных методов контроля продукции, эффективных способов ее хранения, новых методов, контролирующих процессы фальсификации продуктов питания, и другие проблемы.

По результатам научных исследований издано около 20 книг, монографий, учебников и учебных пособий, опубликовано около 750 статей, из которых свыше 600 – в журналах Web of Science, Scopus, РИНЦ. Ученые секции ежегодно получают свыше 30 патентов.

Результаты научных исследований и публикационной активности способствуют эффективному научному обеспечению развития отрасли хранения и переработки сельскохозяйственной продукции.

При Отделении сельскохозяйственных наук РАН осуществляет свою деятельность Отдел сельскохозяйственных наук РАН в качестве структурного подразделения президиума РАН. Отдел возглавляет начальник Отдела, непосредственно подчиняющийся академику-секретарю Отделения сельскохозяйственных наук РАН.

Отдел включает шесть секторов по основным приоритетным направлениям исследований, деятельность которых осуществляется в сочетании с деятельностью шести секций Отделения сельскохозяйственных наук.

Научно-организационная деятельность Отдела осуществляется в соответствии с Уставом РАН и Положениями о деятельности Отделения и Отдела сельскохозяйственных наук РАН, утвержденными постановлением президиума РАН.

Отделение сельскохозяйственных наук объединяет 287 членов РАН, в том числе 161 академика и 126 членов-корреспондентов.

Под их научно-методическим руководством и непосредственным участием проводятся фундаментальные и поисковые научные исследования на базе научных и образовательных учреждений, подведомственных Минобрнауки России и Минсельхозу России.

Научные исследования проводятся по всем пунктам основных направлений фундаментальных исследований, обозначенных Программой фундаментальных научных исследований на долгосрочный период 2021–2030 годов, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 31 декабря 2020 г. № 3684-р по всем основным вышеупомянутым приоритетным направлениям.

Научно-исследовательскую работу выполняют в настоящее время 105 федеральных государственных научных бюджетных учреждений, подведомственных Минобрнауки России, с участием свыше 9 тыс. научных работников (исследователей), в том числе свыше 1,6 докторов и более 3 тыс. кандидатов наук, 161 академик РАН и 126 членов-корреспондентов РАН.

Усилия ученых отделения позволяют ежегодно создавать около 300 новых конкурентоспособных сортов и гибридов сельскохозяйственных культур, по урожайности и качеству продукции не уступающих мировым аналогам, около 10 новых пород, типов, линий и кроссов животных и птицы, насекомых и аквакультуры, разрабатывать около 170 новых и усовершенствованных

технологий и технологических процессов производства сельскохозяйственного сырья; не менее 120 технологических способов и приемов производства сельскохозяйственной продукции; 60...70 единиц машин, приборов и оборудования, 8...10 вакцин, 12...15 препаратов и дезинфицирующих средств, 7...9 биохимических средств защиты растений. Ученые и специалисты отделения получают ежегодно не менее 700 патентов на изобретения и селекционные достижения.

Результаты деятельности Отделения сельскохозяйственных наук внесли весомый вклад в дальнейшее развитие агропромышленного комплекса, обеспечение продовольственной безопасности и повышение уровня жизни населения нашей страны.

## Земледелие и мелиорация

УДК 631.1/004.048

DOI 10.31857/S2500262724060025 EDN RVENXI

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ СЕВООБОРОТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНОЙ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ ВЫВОДА

© 2024 г. В. К. Каличкин, доктор сельскохозяйственных наук, Д. С. Федоров,  
К. Ю. Максимович, кандидат биологических наук

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук,  
630501, Новосибирская обл., Новосибирский р-н, пос. Краснообск  
E-mail: vk.kalichkin@gmail.com

*Исследование проводили с целью разработки модели и осуществления прогнозирования продуктивности севооборотов на основе адаптивного нейро-нечеткого вывода. В работе использовали материалы длительных полевых опытов (данные по 9 видам севооборотов, ориентированных на производство зерна), проведенных в Новосибирской области в 1999–2019 гг. В процессе работы применяли алгоритм обучения искусственной нейронной сети с использованием гибридного метода оптимизации, сочетающего метод наименьших квадратов и метод обратного распространения ошибки, для задания нечеткого правила с подходящими функциями принадлежности с учетом входных и выходных данных. На основе использования адаптивного нейро-нечеткого моделирования и среды разработки MATLAB создана модель продуктивности севооборотов ANFIS. Сформированные в процессе обучения ANFIS правила позволяют с достаточно высокой точностью детерминировать значимые комбинации факторов, определяющие продуктивность заданных севооборотов. При осуществлении прогнозного моделирования на примере трех видов севооборотов выявлено существенное влияние озимых культур и элементов плодосмена на устойчивость севооборотов к неблагоприятным условиям атмосферного увлажнения и эффективность применения агрохимических средств. Результаты комплексного анализа с использованием различных метрик точности (коэффициент детерминации – 0,78; корень из среднеквадратичной ошибки – 5,66; средняя абсолютная ошибка – 4,31; средняя абсолютная ошибка в процентах – 20,07 %) свидетельствуют о достаточно хорошей предиктивной способности модели. Разработанная модель ANFIS демонстрирует высокую способность учитывать сложные нелинейные взаимосвязи между признаками, влияющими на продуктивность севооборотов, и может быть использована в принятии производственных решений при краткосрочном и долгосрочном планировании.*

### MODELING CROP ROTATION PRODUCTIVITY USING AN ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM

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

Siberian Federal Research Center of Agricultural Biotechnology,  
Russian Academy of Sciences,  
630501, Novosibirskaya obl., Novosibirskii r-n, pos. Krasnoobsk  
E-mail: vk.kalichkin@gmail.com

*The study was conducted with the goal of developing a model and forecasting crop rotation productivity using adaptive neuro-fuzzy inference. The work utilized data from long-term field experiments (data from 9 types of crop rotations focused on grain production) conducted by the Siberian Research Institute of Agriculture and Chemicalization of Agriculture (Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences) from 1999 to 2019. During the study, an artificial neural network (ANN) training algorithm was applied using a hybrid optimization method, combining the least squares method and backpropagation, to set up fuzzy rules with appropriate membership functions based on input and output data. Based on the use of adaptive neuro-fuzzy modeling and the MATLAB development environment, ANFIS crop rotation productivity model has been developed. The ANFIS rules formed during training allow for fairly accurate determination of significant factor combinations that influence the productivity of the given crop rotations. In predictive modeling of three types of crop rotations, the significant role of winter crops and crop rotation elements in enhancing crop rotation resilience to adverse atmospheric moisture conditions and improving the effectiveness of agrochemical application was revealed. A comprehensive analysis using various accuracy metrics (coefficient of determination – 0.78; root mean square error – 5.66; mean absolute error – 4.31; mean absolute percentage error – 20.07 %) indicates the model has good predictive ability. The developed ANFIS model demonstrates a strong ability to account for complex nonlinear relationships between the features influencing crop rotation productivity and can be used in production decision-making for short- and long-term planning.*

**Ключевые слова:** севооборот, моделирование продуктивности, интеллектуальное земледелие, искусственный интеллект, машинное обучение, ANFIS.

**Keywords:** crop rotation, productivity modeling, intelligent farming, artificial intelligence, machine learning, ANFIS.

В современном земледелии в связи с возможными изменениями климата, необходимостью сокращения использования химических веществ, усиления комплексной борьбы с вредителями и болезнями сельскохозяйственных культур возродилась популярность севооборота как ключевой концепции реализации систем земледелия [1, 2]. В длительных полевых опытах установлено,

что бессистемное размещение сельскохозяйственных культур, повторное и бессменное возделывание большинства из них приводит к ухудшению плодородия зональных почв, повышению засоренности посевов и поражению растений вредителями и болезнями, что в конечном итоге вызывает снижение продуктивности сельскохозяйственных земель [3, 4].

В мировой науке развиваются две категории подходов к прогнозированию продуктивности и формированию севооборотов: теоретический, основанный на знаниях, и подход машинного обучения, основанный на данных. В качестве примера первого подхода можно привести программный инструмент ROTAT, который был разработан для обеспечения всех теоретически возможных севооборотов с конкретным набором культур и применяет фильтры для уменьшения общего количества севооборотов в соответствии с агрономическими критериями (правилами). Аналогичным образом основанная на правилах модель ROTOR генерирует севообороты с учетом заранее определенных процессов растениеводства с фиксированными датами посева и уборки урожая. Общее количество технически возможных севооборотов сокращается посредством набора критериев исключения, связанных с питанием растений, пораженностью сорняками и фитосанитарными последствиями. Еще одно программное обеспечение для линейного программирования представлено инструментом CropRota. В нем выводятся типичные, а не теоретические севообороты, подходящие для систем моделирования землепользования, путем интеграции агрономических правил и наблюдаемых данных о конкретном землепользовании [5, 6]. Предлагаются также многоцелевые модели смешанного линейного программирования с целочисленными и бинарными переменными решения задачи планирования севооборота [7]. Основной недостаток этих методов – неспособность адаптироваться к меняющимся условиям, поскольку модели рассматриваются в качестве статической концепции.

В качестве примера подходов второй категории, основанных на применении искусственного интеллекта (ИИ), можно назвать AI4CROPR – метод определения матриц севооборота с использованием индексов вегетации (VI), полученных на основе дистанционного зондирования, кластеризации и ИИ [8]. Для прогнозирования индексов вегетации возделываемых культур применяется экстремальный градиентный бустинг (XGBoost) с использованием исторических данных об урожайности. Нормализованные значения VI в различных кластерах в дальнейшем применяются для создания матрицы севооборотов. Система поддержки принятия решений Fruchtfolge позволяет оптимизировать выбор культур в севообороте с использованием больших данных и пространственного моделирования [9]. Рекуррентные нейронные сети (RNN) в архитектуре Seq2Seq могут быть использованы для прогнозирования наиболее вероятных сценариев севооборотов в соответствии с историческими данными по возделыванию сельскохозяйственных культур [10]. Для прогнозирования наиболее вероятных культур в севообороте, возделываемых в  $n+1$  году, могут быть использованы цепи Маркова [11].

Системы на основе ИИ, например искусственные нейронные сети (ИНС), используются для реализации сложных функций в различных областях. Однако ИНС выступают моделями «черного ящика», и поэтому сложно или невозможно объяснить результаты их работы. Чтобы сделать результаты интеллектуальных моделей более приближенными к ожидаемым результатам в типичных ситуациях, появилась концепция нечетких систем. Нечеткие системы – это системы или правила, основанные на знаниях, то есть действующие на основе опыта эксперта. Отправной точкой для построения нечеткой системы служит получение набора нечетких правил «если – то» из знаний эксперта или из данных в анализируемой предметной области. В поисках согласованной синергии между обучающей способностью

ИНС и возможностью представления проблем в более интерпретируемом виде были предложены модели, которые используют лучшее из обеих концепций для формирования гибридных систем [12]. Среди этих систем можно отметить адаптивную нейро-нечеткую инференционную систему (Adaptive neuro-fuzzy inference system – ANFIS), в русском переводе часто называемую адаптивной системой нейро-нечеткого вывода [13, 14, 15].

ANFIS с использованием набора входных-выходных данных создает систему нечеткого вывода и тем самым похожа на нейронные сети с переменной структурой. Это означает, что определение ее структуры выполняется в соответствии с данными. Настройка параметров ANFIS может быть выполнена посредством обратного распространения ошибки и/или иных алгоритмов [16]. Следующим шагом выступает объединение нечетких лингвистических правил в единую систему. Это важный аспект теории нечетких систем, который обеспечивает систематический процесс преобразования базы знаний в нелинейное отображение [17, 18].

В отечественном научном сообществе интерес к этой предметной области невелик. В качестве примера можно привести работу [19], в которой использовали ANFIS для классификации болезней растений. Входными данными системы служили текстурные признаки Харалика, извлеченные из изображений растений. Модель классификации болезней достигала 85 % точности.

Цель исследований – разработать модель и осуществить прогнозирование продуктивности севооборотов с использованием адаптивного нейро-нечеткого вывода на основе анализа данных длительных полевых опытов.

**Методика.** Нейро-нечеткое моделирование продуктивности севооборотов проводили с использованием материалов длительных полевых опытов, проведенных в лесостепи Приобья Новосибирской области Сибирским НИИ земледелия и химизации сельского хозяйства СФНЦА РАН в течение 1999–2019 гг. В опытах изучали 9 видов севооборотов, ориентированных на производство зерна: бессменная пшеница (А), пшеница – овес – пшеница – ячмень (В), вико – овес (на зерно) – пшеница – пшеница – ячмень (С), рапс – пшеница – пшеница – ячмень (D), пар – пшеница – пшеница – ячмень (Е), пар – озимая рожь – пшеница – ячмень (F), донник – озимая рожь – пшеница – ячмень с подсевом донника (G), клевер – озимая рожь – пшеница – ячмень с подсевом клевера (H), вико – овес (на зеленую массу) – пшеница – пшеница – ячмень (I). Все севообороты реализованы во времени и пространстве в 3-кратной повторности на делянках размером 475 м<sup>2</sup>, всего экспериментальных полей севооборотов 104. В расчетах использованы временные ряды продуктивности севооборотов, выраженные в зерн.ед./га с севооборотной площади. Использованы данные, полученные на 3 уровнях применения агрохимических средств (уровнях интенсификации): без удобрений и пестицидов (экстенсивный) (1), удобрения + гербициды (нормальный) (2), удобрения + фунгицид + гербицид + инсектициды (интенсивный) (3) [20]. Для оценки продуктивности севооборотов был проведен перерасчет фактической урожайности изучаемых культур в зерновые единицы (зерн.ед.) с использованием коэффициентов перевода продукции растениеводства (в соответствии с Приказом Минсельхоза России от 29.04.2022 N 273 Об утверждении Порядка отбора проектов мелиорации). Атмосферное увлажнение в годы проведения опытов учитывали посредством применения стандартизированного индекса осадков (Standardized Precipitation

Index – SPI), который позволяет представить в числовом виде степень увлажнения/засушливости территории. Возможность использования индекса SPI в качестве информативного показателя степени атмосферного увлажнения территории и эффективность его применения при оценке изменчивости и прогнозировании урожайности продемонстрирована ранее [21]. За основной SPI, участвующий в математических расчетах, принята средняя величина атмосферного увлажнения в период с мая по июль за 4 года ротации каждого из анализируемых севооборотов. Для расчетов SPI использованы временные ряды по данным поста метеонаблюдений г. Новосибирска (источником данных был web-ресурс <http://www.pogodaiklimat.ru>). Расчеты SPI выполнены в программном обеспечении Drought Indices Calculator (DrinC) с открытым исходным кодом (<https://drought-software.com>) [22]. Степень проявления увлажненности/засушливости территории оценивали по следующей шкале варьирования SPI: экстремально влажно – 2,0+; сильно влажно – от 1,5 до 1,99; умеренно влажно – от 1,0 до 1,49; норма – от –0,99 до +0,99; умеренно сухо – от –1,0 до –1,49; сильно сухо – от –1,5 до –1,99 и экстремально сухо – –2,0 и менее [23].

Разработанная модель ANFIS, реализованная в среде MATLAB, имеет три входные переменные:

уровень интенсификации – дискретная переменная (1, 2, 3), соответствующая трем уровням применения техногенных средств;

SPI – непрерывная переменная, характеризующая степень атмосферного увлажнения;

вид севооборота – дискретная переменная (от А до I, соответствующая различным видам севооборотов).

Модель ANFIS была обучена с использованием гибридного метода оптимизации, сочетающего метод наименьших квадратов и метод обратного распространения ошибки с использованием 80 % данных для обучения и 20 % для тестирования модели. Процесс обучения проводился в течение 150 эпох, что обеспечило достаточную сходимость модели. Выбор количества эпох основывался на анализе кривой обучения, которая показывает зависимость ошибки от числа итераций. Ошибка обучения стабилизируется примерно после 100 эпох, что подтверждает адекватность выбранного числа итераций.

**Результаты и обсуждение.** ANFIS объединяет концепции нечеткой логики и нейронных сетей, что позволяет системе обучаться на основе имеющихся данных и адаптировать параметры функций принадлежности и весовые коэффициенты правил для минимизации ошибки между расчетными и фактическими

значениями выходной переменной. Нечеткие выходы, полученные в результате срабатывания правил, агрегируются и дефазифицируются для получения четкого выходного значения из результатов.

Структура разработанной модели ANFIS состоит из пяти последовательных слоев, объединенных в три основных блока (рис. 1).

Блок I состоит из входного слоя (Input layer) с тремя переменными и слоя фазификации (Fuzzification layer). Каждая входная переменная характеризуется своими функциями принадлежности (ФП). В слое фазификации происходит преобразование четких входных значений в степени принадлежности к нечетким множествам по формуле:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x), \quad (1)$$

где  $O_i^1$  – выход  $i$ -го узла первого слоя,  $\mu_{A_i}(x)$  – функция принадлежности для нечеткого множества  $A_i$ ,  $x$  – входное четкое значение,  $i$  – индекс узла в первом слое.

Блок II состоит из слоя нечетких правил (Neurologic rules) и слоя нормализации (Normalization layer). Этот блок реализует механизм нечеткого логического вывода Такаги – Сугено. Он включает в себя слой нечетких правил и слой нормализации. В слое нечетких правил каждый узел соответствует одному правилу. В этой модели использована база из 81 правила, что соответствует всем возможным комбинациям входных переменных ( $3 \times 3 \times 9 = 81$ ). Каждое правило имеет вид «ЕСЛИ (входная переменная 1 есть А) И (входная переменная 2 есть В), И (входная переменная 3 есть С), ТО (выход есть Z)», где А, В, С – нечеткие множества, а Z – линейная функция входных переменных. Выход узла рассчитывается как произведение степеней принадлежности входов:

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \cdot \mu_{C_i}(z), \quad (2)$$

где  $O_i^2$  – выход  $i$ -го узла второго слоя,  $w_i$  – сила срабатывания  $i$ -го правила,  $\mu_{A_i}(x)$ ,  $\mu_{B_i}(y)$ ,  $\mu_{C_i}(z)$  – функции принадлежности для нечетких множеств  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  соответственно,  $x, y, z$  – входные четкие значения для трех входных переменных,  $i$  – индекс правила.

В слое нормализации происходит вычисление нормализованной силы срабатывания каждого правила:

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=0}^n w_i}, \quad (3)$$

где  $O_i^3$  – выход  $i$ -го узла третьего слоя,  $\bar{w}_i$  – нормализованная сила срабатывания  $i$ -го правила,  $w_i$  – сила срабатывания  $i$ -го правила,  $\sum_{i=0}^n w_i$  – сумма сил срабатывания всех правил.

Блок III состоит из выходного слоя (Output layer). Представлен одной выходной переменной  $f(u)$ , которая соответствует продуктивности севооборота, выраженной в зерн.ед./га. В этом слое происходит дефазификация – преобразование нечетких выводов в четкое значение:

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i z + s_i), \quad (4)$$

где  $O_i^4$  – выход  $i$ -го узла четвертого слоя,  $\bar{w}_i$  – нормализованная сила срабатывания  $i$ -го правила,  $f_i$  – линейная функция входных переменных для  $i$ -го правила,  $p_i, q_i, r_i$  – коэффициенты при входных переменных  $x, y, z$  соответственно,  $s_i$  – свободный член в линейной функции,  $x, y, z$  – входные четкие значения.

Общий выход системы рассчитывается как:

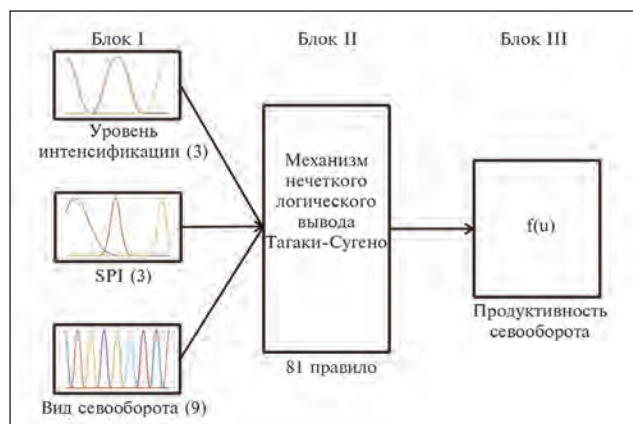


Рис. 1. Структура ANFIS в общем виде.

$$f(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \bar{w}_i f_i}{\sum_{i=0}^n \bar{w}_i}, \quad (5)$$

где  $f(u)$  – окончательный выход системы (продуктивность севооборота),  $\bar{w}_i$  – нормализованная сила срабатывания  $i$ -го правила,  $f_i$  – линейная функция входных переменных для  $i$ -го правила.

Формулы и общая структура ANFIS основаны на работе J. S. Jang [24], а также подробно описаны в работе [25].

Для каждого входного значения в пределах соответствующего диапазона определяется степень принадлежности к каждому нечеткому множеству. Степень принадлежности может иметь значения от нуля до единицы. Для выходного параметра лингвистические термины присваиваются синглтонам (паттернам проектирования), что служит особой характеристикой для FIS Такаги – Сугено. В модели ANFIS определены ФП для каждой переменной, использованы следующие их типы: уровень интенсификации – три кусочно-линейные функции (а); SPI – три гауссовы функции (б); вид севооборота – девять кусочно-линейных функций (с) (рис. 2).

Выбор типов ФП обусловлен характером входных данных. Кусочно-линейные функции хорошо подходят для дискретных переменных, таких как уровень интенсификации и вид севооборота, так как они позволяют четко разграничить категории. Гауссовы функции выбраны для SPI, поскольку они обеспечивают плавный переход между категориями, что более адекватно отражает непрерывную природу этой переменной.

Сформированные в процессе обучения ANFIS правила отражают сложные взаимосвязи между входными переменными (уровень интенсификации, SPI и вид севооборота) и выходной переменной (продуктивность севооборота). Анализ правил позволяет выявить наиболее значимые комбинации факторов, влияющих на продуктивность. В качестве примера приведем несколько правил:

ЕСЛИ (уровень интенсификации 1) И (SPI *низкий*), И (вид севооборота А) ТО (продуктивность *низкая*).

ЕСЛИ (уровень интенсификации 1) И (SPI *низкий*), И (вид севооборота В) ТО (продуктивность *низкая*).

ЕСЛИ (уровень интенсификации 1) И (SPI *средний*), И (вид севооборота С) ТО (продуктивность *средняя*).

ЕСЛИ (уровень интенсификации 1) И (SPI *средний*), И (вид севооборота D) ТО (продуктивность *средняя*).

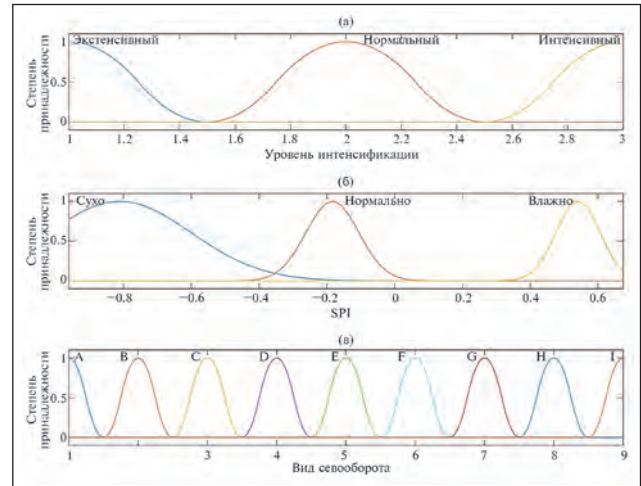


Рис. 2. Функции принадлежности ANFIS: а) уровень интенсификации; б) SPI; в) вид севооборота.

ЕСЛИ (уровень интенсификации 1) И (SPI *высокий*), И (вид севооборота Е) ТО (продуктивность *высокая*).

ЕСЛИ (уровень интенсификации 1) И (SPI *высокий*), И (вид севооборота F) ТО (продуктивность *высокая*).

Для более наглядного представления зависимостей между входными и выходной переменными были построены поверхности отклика (рис. 3). Эти поверхности демонстрируют нелинейный характер взаимосвязей между входными переменными.

В частности, можно отметить, что при взаимодействии между SPI и уровнем интенсификации (рис. 3а) наблюдается тенденция к увеличению продуктивности севооборотов при повышении уровня применения технологий средств, особенно в благоприятных условиях увлажнения (высокие значения SPI). Эффективность повышения уровня интенсификации варьируется в зависимости от вида севооборота (рис. 3б), что указывает на необходимость дифференцированного подхода к управлению различными севооборотами. Различные виды севооборотов демонстрируют разную устойчивость к уменьшению атмосферного увлажнения вегетационного периода, что отражается в вариациях продуктивности при изменении SPI (рис. 3с).

Для оценки эффективности модели был проведен комплексный анализ с использованием различных метрик. Среднеквадратичная ошибка (RMSE) составила 5,66, а средняя абсолютная ошибка (MAE) – 4,31, что свидетельствует о достаточно хорошей точности

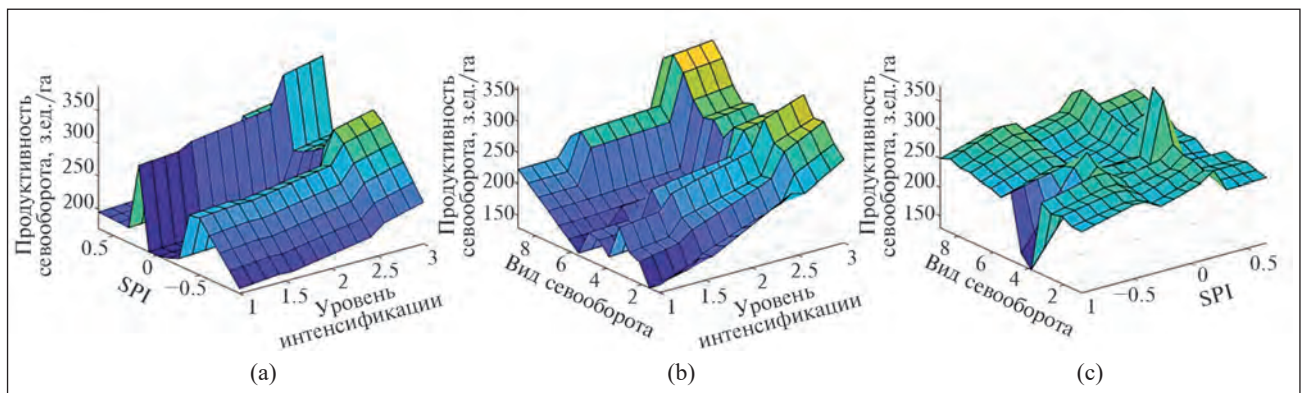


Рис. 3. Поверхности отклика ANFIS: а) зависимость продуктивности от SPI и уровня интенсификации; б) зависимость продуктивности от уровня интенсификации и вида севооборота; в) зависимость продуктивности от вида севооборота и SPI.

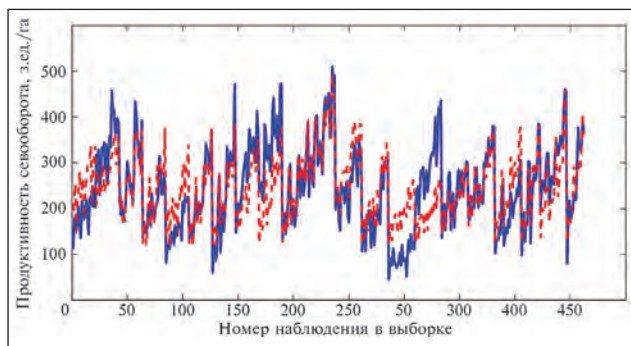


Рис. 4. Фактические и прогнозные значения продуктивности севооборотов.

прогнозов. Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) в 20,07 % представляет оценку о том, что прогнозы в среднем отклоняются от фактических значений на одну пятую. Коэффициент корреляции Пирсона ( $r$ ), равный 0,78, подтверждает сильную положительную связь между предсказанными и фактическими значениями. Медианная абсолютная ошибка (MedAE) и среднее абсолютное отклонение (MAD) достигают значений 3,21 и 7,43 соответственно.

Визуальный анализ фактических и прогнозных значений продуктивности севооборотов показывает, что модель в целом хорошо улавливает тенденции изменения продуктивности, хотя и присутствуют некоторые отклонения, особенно в экстремальных точках (рис. 4).

На основе разработанной модели ANFIS была проведена серия прогнозов (27 шт.) продуктивности севооборотов при различных входных параметрах (см. табл.).

В качестве примера прогностических возможностей модели ANFIS приведены три вида наиболее репрезентативных севооборотов в лесостепи Сибири. В севообороте с паром и яровыми культурами в засушливых условиях при всех уровнях интенсификации существенно снижается продуктивность, в сравнении с севооборотом с озимой рожью. Причем без примене-

ния агрохимических средств ее снижение составляет 44,5 %. При использовании удобрений и гербицидов относительная разница в продуктивности севооборотов не уменьшается, несмотря на то, что в абсолютных величинах она в целом увеличивается. Продуктивность этих севооборотов в засушливых условиях выравнивается только при комплексном применении агрохимических средств (удобрения + фунгицид + гербицид + инсектицид).

В благоприятных условиях атмосферного увлажнения продуктивность этих севооборотов выравнивается и закономерно увеличивается с повышением уровня интенсификации. В условиях атмосферного переувлажнения продуктивность севооборота с яровыми культурами на экстенсивном уровне уменьшается на 16 %, в сравнении с севооборотом с озимой рожью. На нормальном и интенсивном уровне продуктивность этих севооборотов практически выравнивается.

Результаты этого моделирования подчеркивают значение озимых культур (в нашем случае озимой ржи) в повышении устойчивости севооборотов к неблагоприятным условиям (атмосферная засуха и переувлажнение) и стабилизации продуктивности в сравнении с севооборотом с яровыми культурами. Результаты моделирования также отражают значение агрохимических средств в повышении устойчивости севооборотов к неблагоприятным условиям атмосферного увлажнения и повышения их продуктивности.

Моделирование продуктивности севооборотов показало также важность включения элементов плодосмена в чередование культур. Так, зернотравяной севооборот (клевер – озимая рожь – пшеница – ячмень с подсевом клевера) более устойчив к засушливым условиям вегетационного периода и переувлажнению, особенно при увеличении применения агрохимических средств. В целом продуктивность этого севооборота в различных условиях атмосферного увлажнения была выше на экстенсивном уровне на 1220 зерн.ед./га зернопарового севооборота с зерновыми культурами и на 810 зерн.ед./га зернопарового севооборота с озимой рожью. На интенсивном уровне различие в продуктивности севооборотов уменьшалось в сравнении с зернопаровым севооборотом до 910 зерн.ед./га, а в сравнении с зернопаровым севооборотом с озимой рожью увеличивалось до 850 зерн.ед./га.

**Выводы.** Адаптивная нейро-нечеткая система вывода (ANFIS) может эффективно решать нелинейные задачи, представляя собой комбинацию ИНС и нечетких систем. Вследствие синергизма этих двух подходов она обладает преимуществами получения хороших результатов в ситуациях, когда данные неточны и противоречивы.

В модели ANFIS применяли алгоритм обучения ИНС с использованием гибридного метода оптимизации, сочетающего метод наименьших квадратов и метод обратного распространения ошибки, для задания нечеткого правила с подходящими функциями принадлежности с учетом входных и выходных данных. Для уровня интенсификации и вида севооборота использовали кусочно-линейные функции принадлежности, а для индекса увлажнения/засушливости (SPI) – гауссовы функции.

Среднеквадратичная ошибка (RMSE) составила 5,66, а средняя абсолютная ошибка (MAE) – 4,31, что свидетельствует о достаточно хорошей точности прогнозов. В целом показатели точности модели демонстрируют хороший баланс между точностью и обобщающей способностью, делая ее пригодной для практического применения. Однако наличие ошибок также указывает на потенциал для дальнейшей опти-

Фрагмент базы прогнозов продуктивности севооборотов

| Вид севооборота                                                | Уровень интенсификации | SPI   | Прогнозируемая продуктивность, зерн.ед./га |
|----------------------------------------------------------------|------------------------|-------|--------------------------------------------|
| Пар – пшеница – пшеница – ячмень (Е)                           | экстенсивный           | -1,10 | 994                                        |
|                                                                |                        | 0,27  | 1735                                       |
|                                                                |                        | 1,35  | 1461                                       |
|                                                                | нормальный             | -1,05 | 1265                                       |
|                                                                |                        | 0,17  | 2854                                       |
|                                                                |                        | 1,15  | 2204                                       |
|                                                                | интенсивный            | -1,14 | 2415                                       |
|                                                                |                        | 0,08  | 3024                                       |
|                                                                |                        | 1,18  | 2869                                       |
| Пар – озимая рожь – пшеница – ячмень (F)                       | экстенсивный           | -1,12 | 1792                                       |
|                                                                |                        | -0,01 | 1900                                       |
|                                                                |                        | 1,38  | 1734                                       |
|                                                                | нормальный             | -1,13 | 2311                                       |
|                                                                |                        | -0,60 | 2542                                       |
|                                                                |                        | 1,12  | 2152                                       |
|                                                                | интенсивный            | -1,15 | 2371                                       |
|                                                                |                        | -0,54 | 3178                                       |
|                                                                |                        | 1,11  | 2919                                       |
| Клевер – озимая рожь – пшеница – ячмень с подсевом клевера (Н) | экстенсивный           | -1,14 | 2071                                       |
|                                                                |                        | -0,33 | 3065                                       |
|                                                                |                        | 1,16  | 2718                                       |
|                                                                | нормальный             | -1,05 | 2420                                       |
|                                                                |                        | -0,22 | 3233                                       |
|                                                                |                        | 1,10  | 2866                                       |
|                                                                | интенсивный            | -1,12 | 3274                                       |
|                                                                |                        | 0,12  | 4070                                       |
|                                                                |                        | 1,09  | 3678                                       |

мизации, возможно, путем включения дополнительных признаков или увеличения объема обучающей выборки.

Прогнозное моделирование на примере трех видов севооборотов продемонстрировало правдоподобные закономерности изменения их продуктивности. Это позволило выявить существенное влияние озимых культур и элементов плодосмена на устойчивость севооборотов к неблагоприятным условиям атмосферного увлажнения и эффективность применения агрохимических средств.

Разработанная модель ANFIS демонстрирует способность учитывать сложные нелинейные взаимосвязи между признаками, влияющими на продуктивность севооборотов. Адаптивное нейро-нечеткое моделирование продуктивности севооборотов открывает возможности по принятию обоснованных решений по плану посевов и севообороту. Поскольку это динамичный процесс, его можно включить в последовательность разработки других плановых и адаптивных решений, принимаемых на годовом и долгосрочном уровнях.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Исследования выполнены согласно Государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР по теме No FNUU-2022–0001.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Литература.

1. Schöning J., Wachter P., Trautz D. Crop rotation and management tools for every farmer?: The current status on crop rotation and management tools for enabling sustainable agriculture worldwide // *Smart Agricultural Technology*. 2023. Vol. 3. P. 100086. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277237552200051X> (дата обращения: 01.08.2024).
2. Review on the contribution of farming practices and technologies towards climate-smart agricultural outcomes in a European context / K. T. Erekaloo, S. M. Pedersena, T. Christensena, et al. // *Smart Agricultural Technology*. 2024. Vol. 7. P. 100413. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375524000182> (дата обращения: 01.08.2024).
3. Юшкевич Л. В., Чибис В. В. Особенности формирования полевых севооборотов в условиях лесостепи Западной Сибири // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. 2021. № 9 (174). С. 3–9. doi: 10.36718/1819-4036-2021-9-3-9.
4. Фитосанитарное состояние и урожайность озимой пшеницы в севооборотах лесостепной зоны Поволжья / А. Л. Тойгильдин, М. И. Подсевалов, И. А. Тойгильдина и др. // *Аграрная наука*. 2022. Т. 354. № 11–12. С. 82–87. doi: 10.32634/0869-8155-2021-354-11-12-82-87.
5. Model-based design of crop diversification through new field arrangements in spatially heterogeneous landscapes. A review / I. M. Hernández-Ochoa, T. Gaiser, K.-C. Kersebaum, et al. // *Agronomy for Sustainable Development*. 2022. Vol. 42. No. 4. P. 74. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-022-00805-4> (дата обращения: 04.08.2024).
6. AI-and data-driven crop rotation planning / S. Fenz, T. Neubauer, J. K. Friedel, et al. // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 212. P. 108160. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169923005483> (дата обращения: 01.08.2024).
7. Multi-objective models for crop rotation planning problems / R. D. S. G. Pontes, D. N. Brandão, F. L. Usberti, et al. // *Agricultural Systems*. 2024. Vol. 219. P. 104050. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X24002002> (дата обращения: 19.08.2024).
8. AI-and data-driven pre-crop values and crop rotation matrices / S. Fenz, T. Neubauer, J. Heurix, et al. // *European Journal of Agronomy*. 2023. Vol. 150. P. 126949. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030123002174> (дата обращения: 07.07.2024).
9. Pahlmeyer C., Kuhn T., Britz W. «Fruchtfolge»: A crop rotation decision support system for optimizing cropping choices with big data and spatially explicit modeling // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 181. P. 105948. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169920331537> (дата обращения: 07.07.2024).
10. Dupuis A., Dadouchi C., Agard B. Methodology for multi-temporal prediction of crop rotations using recurrent neural networks // *Smart Agricultural Technology*. 2023. Vol. 4. P. 100152. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375522001162> (дата обращения: 07.06.2024).
11. Dupuis A., Dadouchi C., Agard B. Predicting crop rotations using process mining techniques and Markov principals // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 194. P. 106686. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169922000035> (дата обращения: 09.07.2024).
12. de Campos Souza P. V. Fuzzy neural networks and neuro-fuzzy networks: A review the main techniques and applications used in the literature // *Applied soft computing*. 2020. Vol. 92. P. 106275. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494620302155> (дата обращения: 12.08.2024).
13. Remya S., Sasikala R. Performance evaluation of optimized and adaptive neuro fuzzy inference system for predictive modeling in agriculture // *Computers & Electrical Engineering*. – 2020. Vol. 86. P. 106718. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790620305735> (дата обращения: 05.08.2024).
14. Rathnayake N., Dang T. L., Hoshino Y. A novel optimization algorithm: Cascaded adaptive neuro-fuzzy inference system // *International Journal of Fuzzy Systems*. 2021. Vol. 23. No. 7. P. 1955–1971. doi: 10.1007/s40815-021-01076-z.
15. Remya S. An adaptive neuro-fuzzy inference system to monitor and manage the soil quality to improve sustainable farming in agriculture // *Soft Computing*. 2022. Vol. 26. № 23. P. 13119–13132. doi: 10.1007/s00500-022-06832-3.
16. Modeling and simulation of a multi-parametric fuzzy expert system for variable rate nitrogen application / A. Heiß, D. S. Paraforos, G. M. Sharipov, et al. // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 182. P. 106008. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169921000260> (дата обращения: 10.08.2024).
17. An Insight into Fuzzy Logic Computation Technology and Its Applications in Agriculture and Meteorology / S. Sowmiyaa, S. Moghana Lavanya, K. Mahendran, et al. // *Oriental Journal of Computer Science and Technology*. 2021. Vol. 13. No. 2, 3. P. 97–101. doi: 10.13005/ojcs13.0203.06.
18. Sensitivity analysis of Takagi-Sugeno fuzzy neural network / J. Wang, Q. Chang, T. Gao, et al. // *Information*

- Sciences*. 2022. Vol. 582. P. 725–749. doi: 10.1016/j.ins.2021.10.037.
19. Классификация состояния растений с использованием адаптивной нейро-нечеткой инференционной системы (ANFIS) / В. В. Брыкин, М. Я. Брагинский, Д. В. Тараканов и др. // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23. № 2. С. 23–30. doi: 10.35266/1999-7604-2024-2-3.
  20. Урожайность зерновых культур в звеньях севооборотов лесостепи Приобья / А. Н. Власенко, В. Н. Шоба, Г. М. Захаров и др. // Земледелие. 2016. № 5. С. 12–14.
  21. Органическое земледелие в лесостепи Западной Сибири: связь урожайности яровой пшеницы и влагообеспеченности территории / К. Ю. Максимович, Д. С. Федоров, В. К. Каличкин и др. // Аграрный вестник Северного Кавказа. 2022. № 2 (46). С. 32–38. doi: 10.31279/2222-9345-2022-11-46-32-38.
  22. Tigkas D., Vangelis H., Tsakiris G. DrinC: a software for drought analysis based on drought indices // *Earth Science Informatics*. 2015. Vol. 8. P. 697–709. doi: 10.1007/s12145-014-0178-y.
  23. Руководство для пользователей стандартизированного индекса осадков // ВМО-№ 1090. 2012. 26 с. URL: [https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO\\_standardized\\_precipitation\\_index\\_user\\_guide\\_ru\\_2012.pdf](https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_ru_2012.pdf) (дата обращения: 10.08.2024).
  24. Jang J. S. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system // *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. 1993. Vol. 23. No. 3. P. 665–685. doi: 10.1109/21.256541.
  25. Karaboga D., Kaya E. Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches: a comprehensive survey // *Artificial Intelligence Review*. 2019. Vol. 52. No. 4. P. 2263–2293. doi: 10.1007/s10462-017-9610-2.

Поступила в редакцию 13.09.2024

После доработки 31.10.2024

Принята к публикации 19.11.2024

**ВЛИЯНИЕ ВОДНЫХ РЕЖИМОВ ПОЧВЫ И СИСТЕМ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ  
НА ПРОДУКТИВНОСТЬ КАРТОФЕЛЯ В НИЖНЕВОЛЖСКОМ РЕГИОНЕ**

© 2024 г. **А. А. Новиков**, доктор сельскохозяйственных наук,  
**К. А. Родин**, кандидат сельскохозяйственных наук

Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия –  
филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова,  
400002, Волгоград, ул. Тимирязева, 9  
E-mail: alexeynovikov@inbox.ru

*Исследования проводили с целью определения влияния водных режимов почвы и систем защиты растений на формирование биометрических показателей растений картофеля и продуктивность товарных клубней. Работу выполняли в 2021–2023 гг. в Волгоградской области. Схема полевого опыта предполагала изучение следующих вариантов: режим увлажнения в почвенном слое 0...0,4 м (фактор А) – не ниже 70 % НВ ( $A_1$ ); не ниже 80 % НВ ( $A_2$ ); система защиты растений картофеля (фактор В) – биологическая ( $B_1$ ); интегрированная ( $B_2$ ); химическая ( $B_3$ ). Эксперимент проводили в посадках картофеля сорта Гулливер на светло-каштановой тяжелосуглинистой почве. Самый продолжительный вегетационный период растений картофеля отмечали на фоне с режимом увлажнения в слое почвы 0...0,4 м не ниже 80 % НВ, в зависимости от системы защиты он изменялся от 87 (2021 г.) до 102 (2023 г.) сут. При поддержании предполивного порога влажности в слое почвы 0...0,4 м не ниже 70 % НВ продолжительность вегетационного периода картофеля была меньше и варьировала по годам исследований от 85 (2021 г.) до 98 (2023 г.) сут. Наибольшая урожайность товарных клубней была достигнута при использовании биологических средств защиты в сочетании с водным режимом почвы на уровне 80 % НВ на глубине 0...0,4 м. В среднем за три года величина этого показателя составляла 26,9 т/га, что на 5,1 т/га больше, по сравнению с вариантом с химической системой.*

**THE INFLUENCE OF WATER REGIMES OF SOIL AND PLANT PROTECTION SYSTEMS  
ON POTATO PRODUCTIVITY IN THE LOWER VOLGA REGION**

**A. A. Novikov, K. A. Rodin**

The All-Russian Scientific Research Institute of Irrigated Agriculture,  
a Branch of the Kostyakov Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Melioration,  
400002, Volgograd, ul. Timiryazeva, 9  
E-mail: alexeynovikov@inbox.ru

*The research was carried out in order to determine the influence of soil water regimes and plant protection systems on the formation of biometric indicators of potato plants and the productivity of commercial tubers. The work was carried out in 2021–2023 in the Volgograd region. The scheme of the field experiment involved the study of the following options: moisture regime in the soil layer of 0...0.4 m (factor A) – not lower than 70 % MMC ( $A_1$ ); not lower than 80 % MMC ( $A_2$ ); potato plant protection system (factor B) – biological protection system ( $B_1$ ); integrated protection system ( $B_2$ ); chemical protection system ( $B_3$ ). The experiment was carried out in planting Gulliver potatoes on light chestnut heavy loamy soil. The longest growing season of potato plants was noted against a back ground with a moisture regime in the soil layer of 0...0.4 m not lower than 80 % MMC, which, depending on the protection system, varied from 87 (2021) to 102 (2023) days. When maintaining the pre-irrigation moisture threshold in the soil layer of 0...0.4 m at least 70 % MMC, the duration of the growing season of potato plants was lower and varied over the years of research from 85 (2021) to 98 (2023) days. The highest yield of commercial tubers in the experiment was achieved when using biological protective agents in combination with the soil water balance at the level of 80 % MMC at a depth of 0...0.4 m. On average, over three years, the value of this indicator was 26.9 t/ha, which was 5.1 t/ha more than with the use of chemical plant protection products.*

**Ключевые слова:** картофель (*Solanum tuberosum* L.), дождевание, средства защиты растений, фазы роста и развития, урожайность.

**Keywords:** potato (*Solanum tuberosum* L.), sprinkling, plant protection products, phases of growth and development, yield.

Картофель – важная сельскохозяйственная культура, продукция которой обладает высокими питательными качествами благодаря высокому содержанию крахмала, белков, витамина С, клетчатки и др. [1, 2]. В последние годы посадки картофеля страдают от таких серьезных заболеваний, как альтернариоз и фузариозное увядание, которые вызывают патогенные грибы рода *Alternaria* и *Fusarium*. Они способны поражать растение на протяжении всего вегетационного периода, а также во время хранения картофеля, что приводит к ухудшению качества как продовольственных, так и семенных клубней. Зараженный посадочный материал становится источником инфекций в следующем вегетационном сезоне [3, 4].

Сельскохозяйственные производители, стремясь защитить растения картофеля от вредителей и болезней, а также обеспечить высокий доход, применяют современные технологии интенсивного возделывания, химические пестициды и большие количества минеральных удобрений [4, 5]. Например, в России на посадках картофеля проводят 9...11 обработок за сезон для борьбы с вредителями и болезнями, а в некоторых европейских государствах их число может быть в 1,5...2,0 раза выше [6]. Это ведет к возникновению устойчивости у вредителей, сокращает биоразнообразие микроорганизмов в почве и нарушает баланс между патогенами и их антагонистами [6, 7].

Использование микробных биопрепаратов ориентировано на обогащение почвенной микрофлоры нуж-

ными микроорганизмами, оказывающими различное воздействие на почву и растения [8, 9]. Биологические препараты могут сочетать в себе биоудобрения, биостимуляторы и биопестициды. Их использование предоставляет возможность заменить химические средства защиты растений, что способствует уменьшению воздействия пестицидов на окружающую среду и одновременно улучшает размеры и качество урожая картофеля, снижая при этом затраты [10].

Цель исследования – определение влияния водных режимов почвы и систем защиты растений на формирование биометрических показателей растений картофеля и продуктивности товарных клубней для совершенствования технологии возделывания культуры.

**Методика.** Работу выполняли в 2021–2023 гг. на экспериментальной базе ВНИИОЗ – филиал ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова» (пос. Водный, Советский район, г. Волгоград). Опыт закладывали на посадках картофеля сорта Гулливер.

Схема полевого эксперимента предполагала изучение следующих вариантов: режим увлажнения в почвенном слое 0...0,4 м (фактор А) – не ниже 70% НВ ( $A_1$ ), не ниже 80% НВ ( $A_2$ ); система защиты растений картофеля (фактор В) – биологическая ( $B_1$ ), интегрированная ( $B_2$ ), химическая ( $B_3$ ).

Биологическая система защиты включала в себя следующие мероприятия: семенные клубни перед посадкой обрабатывали баковой смесью препаратов Геостим Фит А (3 л/т), Геостим Фит Ж (2 л/т), Гумел Люкс (2 л/т) и Гелиос Супер (2 л/т); при появлении единичных всходов проводили опрыскивание Геостим Фит Ж (1,5 л/га) в сочетании с БСка-3 (4 л/га) и Импровер (50 мл/га), после чего выполняли междурядную обработку с целью заделки биологических препаратов в прикорневую область; далее проводили обработку вегетирующих растений в фазы активного роста, смыкание в рядке, бутонизации и цветения баковой смесью биопрепаратов Геостим Фит Ж (1,5 л/га), БСка-3 (4 л/га), Импровер (50 мл/га), Бфтим (4 л/га), Гумел Люкс (1,0 л/га), Гелиос Азот (3,0 л/га), Гелиос Трио (0,5 л/га) и Гелиос Супер (2 л/га). При появлении колорадского жука с численностью выше экономических порогов вредоносности в эту баковую смесь добавляли Инсетим (4,0 л/га).

Интегрированная система защиты растений предусматривала применение фунгицида Максим (0,2 л/т), которым обрабатывали клубни в день посадки. После всходов проводили обработки биопрепаратами по ранее указанной схеме.

Химическая система защиты картофеля включала в себя следующие мероприятия: обработка семенных клубней инсектицидом Максим в дозе 0,2 л/т; при смыкании рядов растения картофеля опрыскивали фунгицидом Ревус (0,6 л/га) в сочетании с инсектицидом Регент (0,025 л/га); обработку в фазе бутонизации проводили фунгицидом Дискор (0,4 л/га) с инсектицидом Эфория (0,3 л/га); в фазе цветения – фунгицидом Танос (0,6 л/га) с инсектицидом Регент (0,025 л/га).

Минеральные удобрения вносили общим фоном по всем вариантам на планируемую урожайность товарных клубней картофеля 40 т/га ( $N_{190}P_{80}K_{170}$ ).

Основную обработку (вспашку) под картофель проводили осенью плугом ПЛН-3-35 на глубину 0,25...0,27 м. В третьей декаде марта выполняли боронование в два следа бороной БЗСС-1. До нарезки гребней (вторая-третья декада мая) вносили минеральные удобрения, после этого почву обрабатывали доминатором «Румпстад», а затем формировали гребни фрезерным культиватором RF-4.

Почва опытного участка – светло-каштановая тяжело-суглинистая, мощность гумусового слоя – до 0,25 м, содержание гумуса – до 1,29%. Содержание гидролизимого азота в почве составляло 31,0 мг/кг (низкое), подвижного (по Мачигину) фосфора ( $P_2O_5$ ) и калия ( $K_2O$ ) – соответственно 44,0 мг/кг (среднее) и 316,0 мг/кг (повышенное), реакция почвенного раствора (рН) – 7,4, сумма обменных оснований – 42,1 мг-экв/100 г (по Каппену).

Опыт закладывали методом расщепленных делянок. Общая площадь делянки – 240 м<sup>2</sup>, учетная – 195 м<sup>2</sup>. Норма посадки – 60 тыс. шт./га. Способ посадки гребневой. Посадку в 2021 г. проводили 19 мая, в 2022 г. – 03 июня, в 2023 г. – 06 июня 4-рядной картофелесажалкой СН-4Б с расстоянием между гребнями 0,75 м. Способ полива – дождевание. Гидротермический коэффициент (ГТК) с мая по сентябрь в 2021 г. был равен 0,6, в 2022 и 2023 гг. – 0,4. Исследования проводили в соответствии с общепринятыми методиками [11, 12].

**Результаты и обсуждение.** Длительность периода от посадки до появления всходов варьировала в зависимости от применяемой системы защиты. В годы исследований в варианте с биологической системой она составляла от 13 до 16 сут, с химической и интегрированной – от 15 до 18 сут (табл. 1). Это, на наш взгляд, связано с отрицательным влиянием химического препарата (Максим) на процессы роста. В течение всех лет исследования наибольшее в опыте ускорение созревания картофеля отмечали при применении химической защиты. В этом варианте продолжительность вегетационного периода составляла 85...95 сут, что на 2...3 сут меньше, чем при интегрированной системе. Наиболее продолжительный вегетационный период зарегистрирован при использовании биологической защиты, его длительность по годам исследований варьировала от 90 до 102 сут.

Влияние уровней водного режима почвы на сроки начала фаз роста и развития растений картофеля становится заметным с фазы цветения и составляет 1 сут. Наибольшая в опыте продолжительность вегетационного периода картофеля выявлена при уровне влажности почвы 80%

Табл. 1. Даты наступления фаз роста и развития картофеля в зависимости от водного режима почвы и систем защиты растений

| Водный режим почвы (фактор А) | Система защиты растений (фактор В) | Фаза роста и развития |        |             |          |                |            | Продолжительность периода от посадки до созревания, сут |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------|-------------|----------|----------------|------------|---------------------------------------------------------|
|                               |                                    | посадка               | всходы | бутонизация | цветение | усыхание ботвы | созревание |                                                         |
| 2021 г.                       |                                    |                       |        |             |          |                |            |                                                         |
| A <sub>1</sub>                | B <sub>1</sub>                     | 23.05                 | 08.06  | 23.06       | 05.07    | 01.08          | 20.08      | 90                                                      |
|                               | B <sub>2</sub>                     | 23.05                 | 08.06  | 22.06       | 03.07    | 29.07          | 17.08      | 87                                                      |
|                               | B <sub>3</sub>                     | 23.05                 | 10.06  | 23.06       | 03.07    | 27.08          | 15.08      | 85                                                      |
| A <sub>2</sub>                | B <sub>1</sub>                     | 23.05                 | 08.06  | 23.06       | 06.07    | 03.08          | 23.08      | 93                                                      |
|                               | B <sub>2</sub>                     | 23.05                 | 08.06  | 22.06       | 04.07    | 30.07          | 19.08      | 89                                                      |
|                               | B <sub>3</sub>                     | 23.05                 | 10.06  | 23.06       | 04.07    | 29.07          | 17.08      | 87                                                      |
| 2022 г.                       |                                    |                       |        |             |          |                |            |                                                         |
| A <sub>1</sub>                | B <sub>1</sub>                     | 03.06                 | 16.06  | 30.06       | 15.07    | 13.08          | 03.09      | 93                                                      |
|                               | B <sub>2</sub>                     | 03.06                 | 16.06  | 29.06       | 13.07    | 10.08          | 30.08      | 89                                                      |
|                               | B <sub>3</sub>                     | 03.06                 | 18.06  | 30.06       | 13.07    | 08.08          | 28.08      | 87                                                      |
| A <sub>2</sub>                | B <sub>1</sub>                     | 03.06                 | 16.06  | 30.06       | 16.07    | 15.08          | 07.09      | 97                                                      |
|                               | B <sub>2</sub>                     | 03.06                 | 16.06  | 29.06       | 14.07    | 12.08          | 03.09      | 93                                                      |
|                               | B <sub>3</sub>                     | 03.06                 | 18.06  | 30.07       | 14.07    | 10.08          | 01.09      | 91                                                      |
| 2023 г.                       |                                    |                       |        |             |          |                |            |                                                         |
| A <sub>1</sub>                | B <sub>1</sub>                     | 06.06                 | 19.06  | 04.07       | 18.07    | 15.08          | 11.09      | 98                                                      |
|                               | B <sub>2</sub>                     | 06.06                 | 19.06  | 03.07       | 16.07    | 12.08          | 07.09      | 94                                                      |
|                               | B <sub>3</sub>                     | 06.06                 | 21.06  | 04.07       | 16.07    | 10.08          | 04.09      | 91                                                      |
| A <sub>2</sub>                | B <sub>1</sub>                     | 06.06                 | 19.06  | 04.07       | 19.07    | 17.08          | 15.09      | 102                                                     |
|                               | B <sub>2</sub>                     | 06.06                 | 19.06  | 03.07       | 17.07    | 14.08          | 11.09      | 98                                                      |
|                               | B <sub>3</sub>                     | 06.06                 | 21.06  | 04.07       | 17.07    | 12.08          | 08.09      | 95                                                      |



Надземная масса и масса клубней в фазе цветения картофеля сорта Гулливер при химической (а) и биологической (б) системах защиты растений.

НВ, в зависимости от системы защиты она изменялась в этом варианте от 87 сут в 2021 г. до 102 сут в 2023 г.

В случае поддержания предполивного уровня влажности в слое 0...0,4 м не ниже 70 % НВ длительность вегетационного цикла картофельных растений была меньше, варьируя в течение исследуемых лет от 85 сут в 2021 г. до 98 сут в 2023 г.

Табл. 2. Биометрические показатели картофеля в фазе цветения в зависимости от водного режима почвы и систем защиты растений

| Год                                                                            | Водный режим<br>почвы<br>(фактор А) | Система защиты<br>растений<br>(фактор В) | Высота<br>растений,<br>м | Масса ботвы,<br>г/растение |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 2021                                                                           | A <sub>1</sub>                      | B <sub>1</sub>                           | 0,67                     | 386                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>2</sub>                           | 0,61                     | 317                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>3</sub>                           | 0,57                     | 288                        |
|                                                                                |                                     | среднее                                  | 0,62                     | 330                        |
|                                                                                | A <sub>2</sub>                      | B <sub>1</sub>                           | 0,76                     | 445                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>2</sub>                           | 0,66                     | 366                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>3</sub>                           | 0,58                     | 341                        |
|                                                                                |                                     | среднее                                  | 0,67                     | 384                        |
|                                                                                | среднее                             | B <sub>1</sub>                           | 0,73                     | 416                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>2</sub>                           | 0,64                     | 342                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>3</sub>                           | 0,58                     | 315                        |
|                                                                                |                                     | среднее                                  | 0,64                     | 357                        |
| HCP <sub>0,5</sub> А – 0,07, HCP <sub>0,5</sub> В – 4, HCP <sub>0,5</sub> АВ – |                                     |                                          | 0,08                     | 3                          |
| 2022                                                                           | A <sub>1</sub>                      | B <sub>1</sub>                           | 0,62                     | 285                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>2</sub>                           | 0,56                     | 219                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>3</sub>                           | 0,49                     | 196                        |
|                                                                                |                                     | среднее                                  | 0,56                     | 233                        |
|                                                                                | A <sub>2</sub>                      | B <sub>1</sub>                           | 0,69                     | 403                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>2</sub>                           | 0,63                     | 313                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>3</sub>                           | 0,53                     | 270                        |
|                                                                                |                                     | среднее                                  | 0,62                     | 329                        |
|                                                                                | среднее                             | B <sub>1</sub>                           | 0,66                     | 344                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>2</sub>                           | 0,60                     | 266                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>3</sub>                           | 0,51                     | 233                        |
|                                                                                |                                     | среднее                                  | 0,59                     | 281                        |
| HCP <sub>0,5</sub> А – 0,04, HCP <sub>0,5</sub> В – 5, HCP <sub>0,5</sub> АВ – |                                     |                                          | 0,07                     | 4                          |
| 2023                                                                           | A <sub>1</sub>                      | B <sub>1</sub>                           | 0,63                     | 305                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>2</sub>                           | 0,59                     | 241                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>3</sub>                           | 0,52                     | 218                        |
|                                                                                |                                     | среднее                                  | 0,58                     | 255                        |
|                                                                                | A <sub>2</sub>                      | B <sub>1</sub>                           | 0,73                     | 428                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>2</sub>                           | 0,65                     | 337                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>3</sub>                           | 0,56                     | 291                        |
|                                                                                |                                     | среднее                                  | 0,65                     | 352                        |
|                                                                                | среднее                             | B <sub>1</sub>                           | 0,68                     | 367                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>2</sub>                           | 0,62                     | 289                        |
|                                                                                |                                     | B <sub>3</sub>                           | 0,54                     | 255                        |
|                                                                                |                                     | среднее                                  | 0,61                     | 303                        |
| HCP <sub>0,5</sub> А – 0,05, HCP <sub>0,5</sub> В – 4, HCP <sub>0,5</sub> АВ – |                                     |                                          | 0,06                     | 3                          |

Использование биологических средств при обоих режимах полива способствовало созданию более благоприятных условий для роста и развития картофеля, что в свою очередь положительно сказалось на их биометрических характеристиках (см. рисунок).

В варианте с биологической защитой в среднем за трехлетний период исследований был зафиксирован максимальный в опыте линейный рост растений, составивший 0,66...0,73 м. Величина этого показателя была на 0,14...0,16 м больше, чем на фоне химической системы защиты. При водном режиме почвы на уровне не ниже 70 % НВ линейный рост в среднем за трехлетний период составил 0,56...0,62 м. В варианте с поддержанием водного режима почвы в слое 0...0,4 м не менее 80 % НВ он увеличился на 0,05...0,07 м, достигая в среднем за трехлетний период 0,62...0,65 м (табл. 2).

Максимальная в опыте надземная масса была сформирована в фазе цветения при биологической системе защиты растений, в среднем за трехлетний период исследований она составила 367...416 г/раст. Самая низкая масса растений отмечена в варианте с увлажнением почвы на уровне 70 % НВ в слое 0...0,4 м (233...330 г/раст.).

Наибольшая урожайность товарных клубней картофеля была достигнута при использовании биологических средств защиты растений в сочетании с поддержанием водного баланса почвы на глубине 0,4 м на уровне 80 % от НВ. В среднем за 3 года она составила 26,9 т/га, что на 5,1 т/га больше, по сравнению с результатами, полу-

Табл. 3. Выход товарных клубней картофеля в зависимости от режима орошения и систем защиты растений, т/га

| Водный режим почвы (фактор А)                                                                        | Система защиты растений (фактор В) | Год исследований |      |      | Среднее |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------|------|------|---------|
|                                                                                                      |                                    | 2021             | 2022 | 2023 |         |
| A <sub>1</sub>                                                                                       | B <sub>1</sub>                     | 24,1             | 19,1 | 22,1 | 21,8    |
|                                                                                                      | B <sub>2</sub>                     | 20,1             | 15,3 | 18,1 | 17,8    |
|                                                                                                      | B <sub>3</sub>                     | 17,8             | 14,1 | 15,7 | 15,9    |
|                                                                                                      | среднее                            | 20,7             | 16,2 | 18,6 | 18,5    |
| A <sub>2</sub>                                                                                       | B <sub>1</sub>                     | 29,5             | 24,5 | 26,6 | 26,9    |
|                                                                                                      | B <sub>2</sub>                     | 25,6             | 20,8 | 22,9 | 23,1    |
|                                                                                                      | B <sub>3</sub>                     | 24,6             | 19,2 | 21,6 | 21,8    |
|                                                                                                      | среднее                            | 26,6             | 21,5 | 23,7 | 23,9    |
| Среднее                                                                                              | B <sub>1</sub>                     | 26,8             | 21,8 | 24,4 | 24,4    |
|                                                                                                      | B <sub>2</sub>                     | 22,9             | 18,1 | 20,5 | 20,5    |
|                                                                                                      | B <sub>3</sub>                     | 21,2             | 16,7 | 18,7 | 18,9    |
|                                                                                                      | среднее                            | 23,6             | 18,9 | 21,2 | 21,3    |
| 2022 г.: HCP <sub>0,5</sub> A – 0,43, HCP <sub>0,5</sub> B – 0,48, HCP <sub>0,5</sub> AB – 0,69 т/га |                                    |                  |      |      |         |
| 2022 г.: HCP <sub>0,5</sub> A – 0,36, HCP <sub>0,5</sub> B – 0,41, HCP <sub>0,5</sub> AB – 0,61 т/га |                                    |                  |      |      |         |
| 2023 г.: HCP <sub>0,5</sub> A – 0,37, HCP <sub>0,5</sub> B – 0,52, HCP <sub>0,5</sub> AB – 0,56 т/га |                                    |                  |      |      |         |

ченными при применении химических средств защиты (табл. 3).

При орошении с предполивым порогом влажности почвы, пониженным до 70% НВ в сочетании с биологической защитой, урожайность клубней оказалась меньше, по сравнению с режимом орошения 80% НВ, на 5,1 т/га. Однако она все равно была больше, чем при использовании интегрированной и химической защиты растений на 4,0 т/га и 5,9 т/га соответственно. В среднем за годы исследований урожайность клубней при использовании биологических средств защиты растений, по сравнению с другими вариантами защиты растений, была достоверно выше на 3,9...5,5 т/га (19,0...29,1%) при НСР<sub>05</sub> для этого фактора 0,41...0,18 т/га.

**Выводы.** Поддержание водного баланса почвы на уровне 80% от НВ в слое почвы 0...0,4 м способствует увеличению продолжительности вегетационного периода растений картофеля в зависимости от системы защиты до 87...102 сут. При снижении предполивного порога влажности до 70% НВ она сокращается до 85...98 сут. Наибольшая урожайность товарных клубней картофеля (26,9 т/га) формируется при поддержании предполивного порога влажности почвы на глубине 0,4 м не менее 80% НВ в сочетании с биологической защитой растений. Она достоверно превышает величину этого показателя, по сравнению с результатами, полученными при применении интегрированной и химической систем защиты растений и поддержании водного баланса почвы на уровне 80% от НВ.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого земледелия – филиала Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова по теме FNFR-2023-0001 «Комплексная оценка биологического потенциала перспективных отечественных сортов картофеля и разработка агротехнологии устойчивого производства семенных клубней для условий орошаемого земледелия». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство этим конкретным исследованием получено не было.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Литература.

1. Родин К. А., Новиков А. А., Новиков А. Е. Совершенствование технологии возделывания картофеля при разных системах защиты растений в условиях

- Нижнего Поволжья // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13. № 4. С. 349–361.
2. Bantle J. P. Dietary fructose and metabolic syndrome and diabetes // *Journal of Nutrition*. 2009. Vol. 139. P. 1263–1268. doi: 10.3945/jn.108.098020.
3. Нековаль С. Н., Маскаленко О. А. Влияние биологической системы защиты на состав почвенной микробиоты и качество картофеля в условиях центральной агроклиматической зоны Краснодарского края // *Юг России: экология, развитие*. 2023. Т. 18. № 3 (68). С. 179–189. doi: 10.18470/1992-1098-2023-3-179-189.
4. Biological efficacy of the microbiological fertilizer «Ecorik» on potato crops under the conditions of the central agroclimatic zone of Krasnodar Krai, Russia / S. N. Nekoval, A. V. Zakharchenko, A. E. Sadovalaya, et al. // *Research on Crops*. 2021. Vol. 22. No. 4. P. 881–887. doi:10.31830/2348-7542.2021.144.
5. Бутков А. В., Мандрова А. А. Экологическое качество картофеля при биологизации высокоинтенсивной технологии его возделывания и поливе // *Техника и технология пищевых производств*. 2018. Т. 48. № 2. С. 170–177. doi: 10.21603/2074-9414-2018-2-170-177.
6. Щербакова Л. А. Развитие резистентности к фунгицидам у фитопатогенных грибов и их хемосенсибилизация как способ повышения защитной эффективности триазолов и стробилуринов // *Сельскохозяйственная биология*. 2019. Т. 54. № 5. С. 875–891. doi:10.15389/agrobiology.2019.5.875rus/.
7. Применение микробиологических препаратов при возделывании арбуза / С. Н. Нековаль, А. В. Захарченко, А. К. Чурикова и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 3. С. 26–32. doi: 10.53859/02352451.2022.36.3.26.
8. Identification of plant beneficial *Bacillus* spp. For Resilient agricultural ecosystem / R. Salwan, V. Sharma, R. Saini, et al. // *Current Research in Microbial Sciences*. 2021. Vol. 2. P. 18–25. doi: 10.1016/j.crmicr.2021.100046.
9. De los Santos-Villalobos S., Parra-Cota F. I. Current trends in plant growth-promoting microorganisms research for sustainable food security // *Current Research in Microbial Sciences*. 2022. Vol. 2. P. 16–24. doi: 10.1016/j.crmicr.2020.100016/.
10. Союз органического земледелия. URL: <https://soz.bio/baza-znaniy/zakon/> (дата обращения: 15.06.2023).
11. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Изд. 5-е, доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
12. Плешаков В. Н. Методика полевого опыта в условиях орошения (рекомендации) / ВАСХНИЛ, Всерос. отделение, Всерос. НИИ орошаемого земледелия. Волгоград: Всерос. НИИ орошаемого земледелия, 1983. 149 с.

Поступила в редакцию 19.09.2024

После доработки 16.10.2024

Принята к публикации 05.11.2024

**Растениеводство, защита и биотехнология растений**

УДК: 633.854.54

DOI 10.31857/S2500262724060046 EDN RVAIPF

**ИЗУЧЕНИЕ КОЛЛЕКЦИОННЫХ ОБРАЗЦОВ ЛЬНА МАСЛИЧНОГО В УСЛОВИЯХ ЮГА ЛЕСОСТЕПИ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ**© 2024 г. **А. В. Казарина**, кандидат сельскохозяйственных наук, **А. С. Шишина**

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,  
Поволжский научно-исследовательский институт селекции и семеноводства им. П. Н. Константинова,  
446442, Самарская обл., пгт. Усть-Кинельский, ул. Шоссейная, 76  
E-mail: kazarinaav@bk.ru

Исследования проводили в 2021-2023 гг. в условиях юга лесостепной зоны Среднего Поволжья с целью оценки коллекционных образцов льна масличного по основным хозяйственно ценным признакам и выявления наиболее перспективных генотипов для вовлечения в селекционный процесс. Объекты исследований – 67 образцов льна масличного различного эколого-географического происхождения. В качестве стандарта был принят сорт Кинельский 2000. Коллекционные образцы дифференцировали на группы по основным хозяйственно ценным признакам, определяющим технологичность и продуктивность культуры (продолжительность вегетационного периода, общая высота растений, масса 1000 семян, урожайность семян, элементы структуры урожая) в соответствии с широким унифицированным классификатором СЭВ вида *Linum usitatissimum* L. За годы изучения выделены образцы, перспективные для включения в селекционные программы в качестве генетических источников ценных признаков: по признаку раннеспелости отобрано 6 образцов, созревающих раньше стандарта на 5...8 суток; по высоте растений – 8 образцов, превосходящих стандартный сорт на 3,6...13,5%; по количеству продуктивных коробочек на растении – 11 образцов с превышением над стандартом 43,8...87,0%; по количеству семян в коробочке – 7 образцов, превосходящих стандарт на 16,9...23,1%; по массе 1000 семян – 6 образцов, превысивших стандарт на 4,4...16,9%. Выделено 16 коллекционных образцов (ВНИИМК 620, к-4921 (Таджикистан), к-4989 (Украина), к-6497 (Казахстан), к-6511 (Казахстан), Кин×Л/2009к, Кин×W/2009к, Л-405/2020, Циан (Россия), 27 А-9 (Россия), Betking (Германия), Hindukusz (Афганистан), Kaufmann (Германия), N.P. 84 (Индия), Ottawa 5648-M (Канада), P. 6909 (Чехия)), обладающих комплексом хозяйственно ценных признаков, урожайность которых за годы исследований находилась в пределах 207,8...244,7 г/м<sup>2</sup>, что выше стандарта на 12,1...32,1%.

**STUDY OF COLLECTION SAMPLES OF OIL FLAX IN THE CONDITIONS OF THE SOUTHERN FOREST-STEPPE OF THE MIDDLE VOLGA REGION****A. V. Kazarina, A. S. Shishina**

Samara Federal Research Center,  
Konstantinov Volga Research Institute of Breeding and Seed Production,  
Russian Academy of Sciences,  
446442, Samarskaya obl., pgt. Ust'-Kinel'skii, ul. Shosseynaya, 76  
E-mail: kazarinaav@bk.ru

The studies were conducted to examine collection samples of oil flax for the main economically valuable traits and to identify the most promising genotypes for involvement in the breeding process. The study was conducted in 2021-2023 in the conditions of the south of the forest-steppe zone of the Middle Volga region. The objects of research are 67 collection samples of oil flax of various ecological and geographical origins. The Kinelsky 2000 variety is taken as the standard. The soil of the experimental plot is typical medium-humus medium-deep medium-clayey chernozem. As a result of the study, the collection samples were differentiated into groups based on the main economically valuable traits that determine the technological effectiveness and productivity of flax (duration of the growing season, total plant height, weight of 1000 seeds, seed yield, elements of the crop structure) in accordance with the broad unified classifier of the CMEA species *Linum usitatissimum* L. (flax). Over the years of study, promising accessions were selected for inclusion in breeding programs as genetic sources of valuable traits: 6 accessions ripening 5-8 days earlier than the standard were selected based on early maturity; 8 accessions exceeding the standard variety by 3.6-13.5% based on plant height; 11 accessions exceeding the standard by 43.8-87.0% based on the number of productive capsules per plant; 7 accessions exceeding the standard by 16.9-23.1 based on the number of seeds per capsule; 6 accessions exceeding the standard by 4.4-16.9% based on the weight of 1000 seeds. Sixteen collection samples were selected (VNIIMK 620, k-4921 (Tajikistan), k-4989 (Ukraine), k-6497 (Kazakhstan), k-6511 (Kazakhstan), Kin x L/2009k, Kin x W/2009k, L-405/2020, Cian (Russia), 27 A-9 (Russia), Betking (Germany), Hindukusz (Afghanistan), Kaufmann (Germany), N.P. 84 (India), Ottawa 5648-M (Canada), P. 6909 (Czech Republic)) possessing a set of economically valuable traits, the yield of which over the years of research was in the range of 207.8...244.7 g/m<sup>2</sup>, which is 12.1...32.1% higher than the standard.

**Ключевые слова:** лен масличный (*Linum usitatissimum* L.), селекция, признак, исходный материал, урожайность.

**Keywords:** flax oil (*Linum usitatissimum* L.), selection, characteristics, source material, yield.

Лен масличный (*Linum usitatissimum* L.) – экологически и экономически выгодная культура, возделываемая для применения в различных отраслях промышленности. Ежегодно в мире льном масличным засеивается 3...5 млн

га при общемировом производстве семян 2,2...2,7 млн т. В Европе его возделывают на площади около 900 тыс. га при урожайности 0,8...1,1 т/га. В Германии урожайность семян этой культуры при традиционном земле-

делии составляет от 2,4 до 2,6 т/га, в Швейцарии при органическом – от 1,4 до 1,9 т/га [1, 2].

Масличные формы льна выращивают в основном в регионах с засушливым, теплым или умеренным климатом. Российская Федерация входит в ведущую мировую тройку стран-производителей и экспортеров семян этой культуры наравне с Канадой и Казахстаном [3, 4]. Постоянное увеличение производства растительного масла в России и повышенный спрос на отраслевых мировых рынках стимулирует рост площадей, занятых льном масличным. По данным Росстата, за последние 5 лет его посевы увеличились более чем на 90% и к 2024 г. достигли 1668,5 тыс. га. Основные площади этой культуры расположены в Ростовской, Омской, Курганской и Воронежской областях, Ставропольском и Алтайском краях. Наблюдается устойчивая тенденция к расширению географии посевов льна масличного, его возделывают в 33 субъектах Российской Федерации. В России потенциал продуктивности льна масличного составляет 2,5...3,0 т/га, однако фактическая урожайность в 2023 г. варьировалась от 0,6 до 1,6 т/га и в среднем составила 0,9 т/га [5, 6].

Широкое разнообразие сфер применения льна масличного требует от селекционеров создание сортов с различными хозяйственно ценными признаками, соответствующими назначению конечной продукции и адаптированными к определенным условиям произрастания [7, 8, 9]. Решение этой важной научной проблемы возможно при глубоком и всестороннем изучении генофонда льна масличного, выделении генетических источников ценных хозяйственных признаков для использования в селекции культуры [10, 11, 12].

Цель исследования – оценка коллекционных образцов льна масличного по основным хозяйственно ценным признакам для выявления наиболее перспективных для вовлечения в селекционный процесс в условиях лесостепи Среднего Поволжья.

**Методика.** Исследования проводили в 2021–2023 гг. в Поволжском научно-исследовательском институте имени П. Н. Конstantинова – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Самарского федерального исследовательского центра РАН (Поволжский НИИСС – филиал СамНЦ РАН). Опытные посевы располагали на юге лесостепной зоны Среднего Поволжья. Почва опытного участка представлена черноземом типичным среднегумусным среднеглинистым. Содержание гумуса в пахотном слое 0...15 см (ГОСТ 26213-91) составляло 5,8...6,9%, обеспеченность подвижными формами фосфора в пахотном слое почвы (ГОСТ 26204-91) повышенная и высокая – 133,6...156,5 мг/кг, обменного калия (ГОСТ 26210-91) – высокая 154,0...180,0 мг/кг, pH солевой вытяжки почвы (ГОСТ 26483-85) – 4,5 ед.

Объектами исследований служили 67 образцов льна масличного различного эколого-географического происхождения (Россия, Украина, Канада, Германия, Таджикистан, Чехия, Узбекистан, Китай, Англия, Афганистан, Армения, Турция, Индия, Казахстан, США) из Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР), а также линии и сорта отечественной и зарубежной селекции.

Посев проводили в оптимальные сроки (первая декада мая) по предшественнику яровая пшеница. Закладку питомника осуществляли сеялкой ССФК 7М на глубину 3...4 см. Площадь делянки 1 м<sup>2</sup>, повторность – трехкратная. Стандарт сорт Кинельский 2000, районированный по Средневолжскому региону, высевали через каждые 20 образцов. В процессе роста и развития растений льна

масличного проводили фенологические наблюдения, учеты и оценки в соответствии с методическими указаниями по изучению коллекции льна *Linum usitatissimum* L. [13] и методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур [14]. Дифференциацию коллекционных образцов на группы по основным хозяйственно ценным признакам осуществляли в соответствии с широким унифицированным классификатором СЭВ вида *Linum usitatissimum* L. [15]. Группы спелости определяли по отклонению от среднеспелого стандарта: очень раннеспелый – раньше на 6 и более суток (менее 75 сут.); раннеспелый – раньше на 2...5 суток (76...78 сут.); среднеспелый стандарт – отклонение  $\pm$  2 суток (79...83 сут.); позднеспелый – позже на 2...5 суток (84...86 сут.); очень позднеспелый – позже более чем на 5 суток (более 87 сут.). Группы по общей высоте растений и по урожайности семян (г/м<sup>2</sup>) ранжировали по отклонению от стандарта: очень низкий – <65%...75% к стандарту; низкий – 76...95%; средний – 96...115%; высокий – 166...135%; очень высокий – более 135% к стандарту в соответствии с широким унифицированным классификатором СЭВ вида *Linum usitatissimum* L. Группы по числу продуктивных коробочек устанавливались по следующей градации: очень малое – меньше 3 шт.; малое – 3...5 шт.; среднее – 6...10 шт.; большое – 11...20 шт.; очень большое – более 20 шт. По числу семян с растения образцы распределяли согласно следующим значениям: очень низкое – меньше 20 семян; низкое – 20...40; среднее – 41...70; высокое – 71...140; очень высокое – больше 140. По массе 1000 семян выделяли следующие группы: очень мелкие – меньше 3,6 г; мелкие – 3,6...5,5 г; средние – 5,6...8,9 г; крупные – 9,0...11,5 г; очень крупные – больше 11,5 г.

При массовом лете льяной блошки проводили однократную обработку инсектицидом Карате, КЭ (0,10...0,15 л/га). При достижении спелости семян уборку осуществляли вручную, после естественного подсыхания снопов их обмолачивали на молотилке МПСУ-500. Учитывали урожайность семян с делянки. Структурный анализ выполняли в лабораторных условиях на 20 типичных для образца растениях. Оценка коллекционных образцов осуществляли по урожайности семян, продолжительности вегетационного периода, высоте растений и основным элементам структуры урожая (продуктивная кустистость, количество продуктивных коробочек на растении, количество семян в коробочке, число семян с 1 растения, массу 1000 семян).

Статистическую обработку полученных данных проводили методом дисперсионного анализа [16].

Метеорологические условия в годы проведения исследований (2021–2023 гг.) охватывали широкий спектр стрессовых факторов среды, характерных для лесостепи Среднего Поволжья и позволили в полной мере оценить реакцию изучаемых коллекционных образцов льна масличного на различные условия тепло- и влагообеспеченности на всех этапах развития растений.

Вегетационный период 2021 г. характеризовался повышенными среднесуточными температурами и крайне неравномерным распределением осадков по месяцам. Так, май был очень теплым, среднесуточная температура воздуха составляла 20,8 °С, что выше среднесуточных значений на 5,8 °С, осадков выпало на 38,8% ниже нормы. В июне наблюдали переизбыток увлажнения, за месяц выпало 72,3 мм осадков, что выше среднесуточных значений на 31,5%, среднесуточные температуры превышали норму на 2,0 °С. В июле сложились засушливые условия, дефицит осадков составил 64,6% на фоне повышенных среднесуточных температур

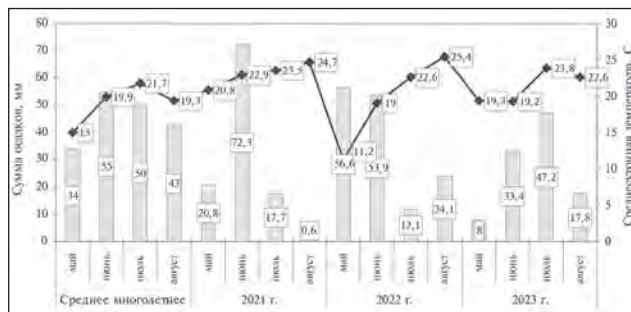


Рис. 1. Гидротермические условия вегетационных периодов льна масличного: ■ – сумма осадков, мм; ◆ – среднесуточная температура, °C.

23,5 °C при норме 21,7 °C. В августе воздушная и почвенная засуха нарастала. Среднесуточные температуры воздуха достигали 36,0 °C и в среднем составили 24,7 °C, что выше климатической нормы на 5,4 °C, при этом осадки практически полностью отсутствовали, сумма за месяц составила 0,6 мм (рис. 1). На протяжении всего периода вегетации наблюдали значительное превышение среднесуточных температур относительно среднемноголетней нормы, засушливые периоды (май, июль, август) преобладали над достаточно увлажненными (июнь), что привело к ускоренному прохождению фаз развития льна масличного.

Метеорологические условия 2022 г. отличались достаточной влагообеспеченностью в первой половине вегетации (май, июнь) и дефицитом осадков во второй (июль, август). В мае количество осадков находилось на уровне 54,6 мм при норме 34,0 мм, среднесуточные температуры были ниже нормы на 3,8 °C и составили 11,2 °C. Июнь характеризовался благоприятными гидротермическими условиями, сумма осадков (53,9 мм) и среднесуточные температуры (19,0 °C) были близки к среднемноголетним значениям. В июле наблюдали недостаток увлажнения, дефицит осадков составил 75,8%, среднесуточные температуры были на уровне среднемноголетних значений (22,6 °C). В августе недобор осадков составил 44,0% на фоне жаркой погоды, среднесуточные температуры превышали климатическую норму на 6,1 °C. Осадки, выпавшие в мае и июне, обеспечили запас влаги в почве, который позволил растениям льна масличного сформировать удовлетворительный урожай семян.

В 2023 г. в период всходов и начального роста растений (май) характеризовался жесткими гидротермическими условиями. На фоне повышенных среднесуточных температур (19,3 °C) наблюдали значительный недостаток осадков – всего 8,0 мм при норме 34 мм. Почва быстро теряла влагу, что отрицательно сказалось на полевой всхожести семян, были полученные изреженные всходы, растения замедляли темпы роста. Осадки, выпавшие в июне в количестве 33,4 мм (60,7% от нормы), несколько выправили ситуацию, но спровоцировали вторую волну всходов. В июле сложились благоприятные условия, количество осадков было близко к среднемноголетним – 47,2 мм, среднесуточные температуры на 2,1 °C превышали норму. В августе сложились засушливые условия, осадков выпало 41,1% от нормы, среднесуточные температуры были выше среднемноголетних значений на 3,3 °C. Осадки, выпавшие в важный период для формирования урожайности (цветение – образование коробочек), положительно сказались на общем уровне урожайности образцов льна масличного.

**Результаты и обсуждение.** Использование в качестве исходного материала сортообразцов льна различного эколого-географического происхождения позволяет создать обширный селекционный материал, выделить генетические источники и доноры отдельных хозяйственно ценных признаков, а также образцы, сочетающий комплекс ценных признаков [11].

В наших исследованиях наибольшее влияние на основные оцениваемые параметры оказывали условия года. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа наибольший вклад этого фактора в проявление хозяйственно ценных признаков отмечен для числа продуктивных коробочек (67,6%), высоты растений (63,7%), продолжительности вегетационного периода (52,8%), продуктивной кустистости (49,9%), числа семян с 1 растения (46,7%). По этим признакам отмечен значительный уровень изменчивости ( $V=31,0...55,0\%$ ) по годам исследований (табл. 1). Продолжительность вегетационного периода варьировала в средней степени ( $V=14,5\%$ ). В меньшей степени условия года влияли на такие сортовые признаки, как количество семян в коробочке (доля влияния фактора – 19,4%) и масса 1000 семян (22,7%), варьирование величин этих показателей по годам было незначительным ( $V=6,2...7,6\%$ ).

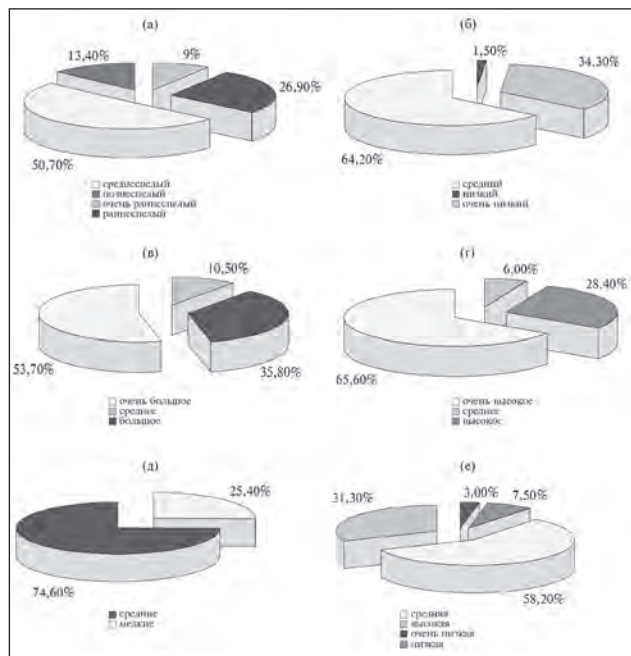
По совокупности изучаемых генотипов наиболее вариабельными признаками были число продуктивных коробочек на растении ( $V=21,3\%$ ) и число семян с 1 растения ( $V=24,9\%$ ).

Продолжительность периода вегетации – важный биологический признак, так как необходимость подбора исходного материала определенной группы спелости диктуют особенности природно-климатических условий Среднего Поволжья. В среднем за 2021–2023 гг. продолжительность вегетационного периода изучаемых образцов составляла 73...85 сут. при величине этого показателя у стандартного сорта Кинельский 2000 81 сут. Межсортовое варьирование признака по годам было незначительно ( $V=2,5...6,5\%$ ). По продолжительности вегетационного периода (79...83 суток) большинство коллекционных образцов (50,7%) отнесено к среднеспелой группе (рис. 2а). Количество очень раннеспелых образцов с вегетационным периодом менее 75 суток составило 9,0%, раннеспелых (76...78 суток) – 26,9%, позднеспелых (84...86 суток) – 13,4% от всей изучаемой коллекции.

За годы исследований выделены образцы, стабильно созревающие раньше среднеспелого стандарта на 5...8 суток, – Hindukusz (Афганистан), Yuan 2009-81 (Китай), к-4929 (Таджикистан), к-1377 (Армения), Л-405/2020, ВНИИМК 620, продолжительность вегетационного периода которых составляла 73...75 суток. Они могут быть использованы в скрещиваниях как источники скороспелости. Наиболее продолжительным периодом вегетации отличались Л-398/2020, к-1748 (Турция), к-1323 (Афганистан) и Кин х Л/2011к, они

Табл. 1. Изменчивость хозяйственно ценных признаков льна масличного в коллекционном питомнике (2021–2023 гг.)

| Показатель                                     | Среднее | Коэффициент вариации (V), % |          |
|------------------------------------------------|---------|-----------------------------|----------|
|                                                |         | между генотипами            | по годам |
| Продолжительность вегетационного периода, сут. | 79,4    | 4,8                         | 14,5     |
| Высота растения, см                            | 47,1    | 16,5                        | 31,0     |
| Продуктивная кустистость, шт.                  | 2,4     | 17,8                        | 40,4     |
| Число продуктивных коробочек на растении, шт.  | 27,1    | 21,3                        | 55,0     |
| Количество семян в коробочке, шт.              | 6,8     | 10,6                        | 7,6      |
| Число семян с 1 растения, шт.                  | 182,8   | 24,9                        | 46,6     |
| Масса 1000 семян, г                            | 5,98    | 11,5                        | 6,2      |



**Рис. 2. Распределение образцов коллекции льна масличного (среднее за 2021-2023 гг.): а) по продолжительности вегетационного периода, б) по высоте растений, в) по числу продуктивных коробочек на растении, г) по числу семян с растения, д) по массе 1000 семян, е) по урожайности семян.**

созревали позже стандарта на 3...5 суток. Следует отметить, что все изучаемые образцы стабильно вызревали в условиях юга лесостепи Среднего Поволжья.

При возделывании льна на маслосемена достаточно средней высоты растений, в пределах 40...60 см. При двойном использовании, на семена и волокно, необходимо создавать сорта с высотой растений от 65 см и более. Для этой цели необходимо привлекать в скрещивания более высокорослые сортообразцы. В среднем за 3 года величина этого показателя в опыте варьировала от 36,5 до 53,1 см при средней по всей выборке –  $47,1 \pm 0,8$  см (рис. 2б). У стандартного сорта Кинельский 2000 она составила 48,5 см. Изучаемые коллекционные образцы по общей высоте растений за годы исследований были разделены на три группы: очень низкие (меньше 36,4 см) – 1,5%, низкие (36,5...46,1 см) – 34,3%, большинство образцов отнесено к группе со средней высотой растений (46,2...55,8 см) – 64,2%.

По высоте растений 8 образцов (51,2...55,3 см) – Кин×Л/2010ж, Betking (Германия), Dingya No21 (Китай), Jinya No9 (Китай), к-1772 (Тунция), Л-399/2020, к-3401 (Китай) и к-5197 (Казахстан) – статистически значимо превосходили стандарт на 3,6...13,5%. Самым низкорослым из всей выборки был к-4685 (Узбекистан), у которого средняя высота растений составила 36,5 см, что на 24,7% ниже стандарта.

Семенная продуктивность льна масличного складывается из структурных элементов – количества продуктивных коробочек на растении, количества семян в коробочке, числа семян с растения, массы 1000 семян. Число продуктивных коробочек на растении тесно коррелирует с урожайностью семян ( $r=0,88...0,93$ ). В наших исследованиях этот признак отличался значительной межсортовой изменчивостью (от  $V=30,6\%$  в 2023 г. до 39,8% в 2022 г.) и варьировал от минимальной в опыте величины 4,8 шт. до максимальной 92,4 шт. В среднем

за годы исследований количество продуктивных коробочек у стандарта находилось на уровне  $22,3$  шт., по всей выборке –  $27,1 \pm 1,4$ .

Более половины коллекционных образцов отнесены к группе с очень большим числом коробочек на растении (более 20 шт.) – 53,7% (рис. 2в); группа с большим числом коробочек (11...20 шт.) состояла из 35,8% сортообразцов, остальные образцы (10,5%) отнесены к группе со средним количеством коробочек (6...10 шт.).

Статистически значимо превосходили стандартный сорт Кинельский 2000 52,2% изучаемых образцов, среднюю по опыту превосходили 35,8%. В среднем за три года наибольшее количество коробочек на растении отмечено у 11 образцов (32,1...41,7 шт.) – Betking (Германия), Р.6909 (Чехия), Kaufmann (Германия), 27А-9 (Россия), Циан (Россия), Hindukusz (Афганистан), Л-398/2020, Л-400/2020, к-4921 (Таджикистан), N.P. 84 (Индия), Белосемянный 14 (Таджикистан), которые превосходили стандарт на 43,9...87,0%.

Показатель количество семян в коробочке у коллекционных образцов в среднем за годы изучения находился в пределах 5,6...8,0 шт. и был наименее вариабельным признаком, размах межсортовой изменчивости составлял от 10,7% в 2023 г. до 15,8% в 2021 г. В среднем по выборке растения льна формировали 6,8 семян в коробочке, у стандарта величина этого показателя была на уровне 6,5 шт. Выделено 7 сортообразцов – Betking (Германия), к-4910 (Таджикистан), к-4921 (Таджикистан), N.P. 84 (Индия), к-6511 (Казахстан), к-5197 (Казахстан) и к-4685 (Узбекистан), у которых количество семян в коробочке составляло 7,6...8,0 шт., что значительно выше стандарта (на 16,9...23,1%) и средней по опыту (на 11,8...17,6%).

Показатель число семян на растении за годы исследований характеризовался широким диапазоном варьирования ( $V=34,7...46,0\%$ ) и изменялся в пределах от 33,1 до 550,7 шт. По числу семян с одного растения коллекционные образцы были дифференцированы на три группы: со средним количеством семян (41...70 шт.) – 6,0%; с высоким (71...140 шт.) – 28,4% и с очень высоким (более 140 шт.) – 65,6% (рис. 2г).

Число семян с растения у стандартного сорта в среднем за годы исследований составило 173,2 шт. Выделено 8 образцов (232,8...275,0 шт.), ежегодно значительно превышавших стандартный сорт по величине этого показателя, – к-1748 (Турция), Betking (Германия), к-4921 (Таджикистан), N.P. 84 (Индия), 27А-9 (Россия), Hindukusz (Афганистан), Циан (Россия), Полет (Россия), у которых превосходство над стандартом достигало 34,4...58,8%.

Одним из важных показателей качества семенного материала считают массу 1000 семян, которая отражает выполненность и крупность. Увеличение размера семян облегчает их очистку при подработке, высококачественные семена в том числе обеспечивают повышение продуктивности растений. Величина этого показателя обусловлена генотипом, в наших опытах изменчивость признака масса 1000 семян была незначительной, коэффициент вариации составлял 6,2%. Коллекционные образцы по величине этого показателя разделили на две группы: мелкие (3,6...5,5 г) – 25,4% и средние (5,6...8,9 г) – 74,6% (рис. 2д).

За годы исследований масса 1000 семян изучаемых образцов находилась в диапазоне 4,04...9,54 г, при среднегрупповой  $5,98 \pm 0,17$  г и величине у стандарта – 6,76 г. В среднем за годы исследований только 7 образцов (7,06...7,90 г) статистически значимо превосходили стандарт по этому признаку на 4,4...16,9% – к-6511

Табл. 2. Хозяйственно-биологическая характеристика коллекционных образцов льна масличного, выделившихся по комплексу ценных признаков (среднее за 2021–2023 гг.)

| Образец                   | Продолжительность вегетационного периода, суток | Высота растения, см | Количество, шт./растение |                        | Количество семян в коробочке, шт. | Масса 1000 семян, г | Урожайность семян, г/м <sup>2</sup> |
|---------------------------|-------------------------------------------------|---------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------------------------|
|                           |                                                 |                     | продуктивных стеблей     | продуктивных коробочек |                                   |                     |                                     |
| Кинельский 2000, стандарт | 81                                              | 48,5                | 2,9                      | 22,3                   | 6,5                               | 6,76                | 185,3                               |
| 27А-9 (Россия)            | 79                                              | 44,9                | 2,6                      | 31,7                   | 7,0                               | 6,83                | 219,9                               |
| ВНИИМК 620                | 76                                              | 46,8                | 1,8                      | 26,3                   | 6,9                               | 7,44                | 207,8                               |
| К-4921 (Таджикистан)      | 78                                              | 41,5                | 2,1                      | 37,5                   | 7,9                               | 5,43                | 217,9                               |
| К-4989 (Украина)          | 79                                              | 48,5                | 3,1                      | 31,9                   | 6,9                               | 5,85                | 212,0                               |
| К-6497 (Казахстан)        | 78                                              | 48,1                | 2,1                      | 29,4                   | 7,2                               | 6,17                | 220,9                               |
| К-6511 (Казахстан)        | 77                                              | 47,3                | 2,3                      | 21,2                   | 7,7                               | 7,06                | 192,6                               |
| Кин×Л/2009 к              | 84                                              | 50,3                | 2,3                      | 36,8                   | 7,4                               | 5,77                | 237,0                               |
| Кин×W/2009 к              | 76                                              | 45,8                | 2,4                      | 34,1                   | 6,9                               | 6,01                | 236,3                               |
| Л-405/2020                | 74                                              | 46,0                | 2,5                      | 28,9                   | 6,3                               | 6,05                | 216,2                               |
| Циан (Россия)             | 78                                              | 46,1                | 2,1                      | 34,1                   | 6,6                               | 7,15                | 222,4                               |
| Betking (Германия)        | 76                                              | 51,3                | 2,5                      | 32,1                   | 7,9                               | 6,26                | 233,3                               |
| Hindukusz (Афганистан)    | 73                                              | 49,3                | 2,9                      | 34,7                   | 7,5                               | 6,60                | 225,0                               |
| Kaufmann (Германия)       | 76                                              | 47,6                | 3,0                      | 32,2                   | 6,7                               | 5,81                | 222,4                               |
| N.P. 84 (Индия)           | 81                                              | 46,5                | 3,4                      | 38,9                   | 7,6                               | 4,90                | 244,7                               |
| Ottawa 5648-M (Канада)    | 79                                              | 44,5                | 1,8                      | 25,3                   | 7,0                               | 5,99                | 222,9                               |
| P. 6909 (Чехия)           | 82                                              | 47,2                | 3,3                      | 40,7                   | 7,0                               | 6,08                | 233,9                               |
| НСР <sub>05</sub>         | 0,5                                             | 1,1                 | 0,2                      | 1,2                    | 0,3                               | 0,26                | 1,4                                 |

(Казахстан), Циан (Россия), к-1377 (Армения), ВНИИМК 620, Betking (Германия), Yuan 2009-81 (Китай), Pd250846 (США).

Результирующий показатель, определяющий значимость исходного материала, – уровень его продуктивности. За годы исследований размах варьирования урожайности семян среди изучаемых генотипов составил 10,3...289,4 г/м<sup>2</sup> (V=17,2...28,3 %). В первую группу с высокой семенной продуктивностью (205,7...250,2 г/м<sup>2</sup>) отнесено 31,3 % коллекционных образцов, во вторую со средней урожайностью (177,9...205,6 г/м<sup>2</sup>) – 58,2 %, третья группа образцов с урожайностью ниже средней (140,9...177,8 г/м<sup>2</sup>) составила 7,5 %, в четвертую группу с очень низкой продуктивностью (122,3...140,8 г/м<sup>2</sup>) вошел один образец (рис. 2е).

Средняя продуктивность стандартного сорта Кинельский 2000 составила 185,3 г/м<sup>2</sup>. Статистически значимо на 3,8...32,1 % превысили стандарт 61,2 % коллекционных образцов. За 2021–2023 гг. выделены образцы, стабильно по годам превышающие стандарт по урожайности семян, – Betking (Германия) (233,3 г/м<sup>2</sup>), Кин×Л/2009к (237,0 г/м<sup>2</sup>), Кин×W/2009к (236,3 г/м<sup>2</sup>) и N.P. 84 (Индия) (244,7 г/м<sup>2</sup>), превосходство над стандартным сортом составило 25,9...32,1 %.

Для создания сорта с заданными характеристиками селекционер подбирает исходный материал, который характеризуется наибольшим набором ценных признаков и путем гибридизации вносит недостающие свойства в создаваемый генотип [10]. В результате комплексного изучения коллекционных образцов льна масличного в условиях юга лесостепи Среднего Поволжья были отобраны 16 образцов, сочетающих высокие показатели семенной продуктивности (207,8...244,7 г/м<sup>2</sup>) с комплексом хозяйственно ценных признаков (табл. 2).

**Выводы.** В среднем за годы исследования выделены образцы, перспективные для использования в качестве генетических источников хозяйственно ценных признаков в селекционных программах различного направления, в частности: по раннеспелости (созревание раньше среднеспелого стандарта на 5...8 суток) – 6 образцов; по высокорослости (превышение над стандартом на 3,6...13,5 %) – 8; по количеству продуктивных коробочек на растении (превышение над стандартом 43,8...87,0 %) – 11; по количеству семян в коробочке (превышение стандарта на 16,9...23,1 %) – 7; по числу семян с растения (превышение над стандартом 34,4...58,8 %) – 8; по массе 1000 семян (превышение над

стандартом 4,4...16,9 %) – 6; по семенной продуктивности (превышение над стандартом 25,9...32,1 %) – 4. По комплексу хозяйственно ценных признаков выделено 16 образцов, статистически значимо превосходящих стандартный сорт, – ВНИИМК 620, к-4921 (Таджикистан), к-4989 (Украина), к-6497 (Казахстан), к-6511 (Казахстан), Кин×Л/2009к, Кин×W/2009к, Л-405/2020, Циан (Россия), 27 А-9 (Россия), Betking (Германия), Hindukusz (Афганистан), Kaufmann (Германия), N.P. 84 (Индия), Ottawa 5648-M (Канада), P. 6909 (Чехия).

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета Самарского федерального исследовательского центра РАН, Поволжского научно-исследовательского института селекции и семеноводства им. П. Н. Константинова. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликтов интересов.

#### Литература.

1. Ceh B., Straus S., Hladnik A., Kusar A. Impact of Linseed Variety, Location and Production Year on Seed Yield, Oil Content and Its Composition // *Agronomy*. 2020. Vol. 10. No. 11. Article 1770. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/11/1770> (дата обращения 10.09.2024). doi: 10.3390/agronomy10111770.
2. Koryluk A., Kosticka J. Pro-Environmental and Health-Promoting Grounds for Restitution of Flax (*Linum usitatissimum* L.) Cultivation // *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21. No. 7. P. 99–107. doi: 10.12911/22998993/125443.
3. Маслинская М. Е. Оценка уровня продуктивности и адаптивного потенциала сортов льна масличного в условиях Беларуси // *Аграрный вестник Урала*. 2021. № 9 (212). С. 25–33. doi: 10.32417/1997-4868-2021-212-09-25-33.
4. Лукомец В. М., Зеленцов С. В. Методы селекции сои и льна // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. № 2. С. 19–23. doi: 10.30850/vrsn/2019/2/19-23.9.

5. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277> (дата обращения: 11.09.2024).
6. Поморова Ю. Ю., Овсепян С. К., Серова Ю. М. Химико-биологические свойства и потенциальная ценность семян масличного льна (обзор) // Масличные культуры. 2023. № 1 (193). С. 73–84. doi: 10.25230/2412-608X-2023-1-193-73-84.
7. Колотов А. П. Реакция льна масличного на условия внешней среды Среднего Урала // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 6. С. 20–24.
8. Кузнецкин И. А., Рожмина Т. А. Скрининг образцов коллекции масличного льна по урожайности и их адаптивность в условиях северо-запада России // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36. № 8. С. 30–36.
9. Сухопалова Т. П. Агротехнологические элементы возделывания льна масличного сорта Уральский // Земледелие. 2021. № 6. С. 33–36.
10. Товстановская Т. Г., Ягло М. Н. Ценность генофонда льна масличного по хозяйственным признакам и создание на его основе сортов в условиях южной Степи Украины // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 1. С. 55–59.
11. Сулейманова А. Роль исходного материала в создании новых сортов льна масличного // Международный сельскохозяйственный журнал. 2019. № 3. С. 146–154. doi: 10.24411/2588-0209-2019-10069.
12. Косых Л. А., Казарина А. В. Влияние метеорологических условий на хозяйственно ценные признаки льна масличного в лесостепной зоне Среднего Поволжья // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 2 (50). С. 98–104.
13. Изучение коллекции льна *Linum usitatissimum* L.: методические указания / под ред. Н. К. Лемешева. Л.: ВИР, 1988. 29 с.
14. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Общая часть. М., 2019. Вып. 1. 329 с. URL: [https://gossortrf.ru/upload/2019/08/metodica\\_1.pdf](https://gossortrf.ru/upload/2019/08/metodica_1.pdf) (дата обращения: 15.08.2024).
15. Международный классификатор СЭВ вида *Linum usitatissimum* L. (лен). Л.: ВИР, 1989. 36 с.
16. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / 5-е издание доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

Поступила в редакцию 18.09.2024

После доработки 06.11.2024

Принята к публикации 26.11.2024

# ИЗУЧЕНИЕ КОЛЛЕКЦИОННЫХ ОБРАЗЦОВ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ, НЕСУЩИХ ГЕН УСТОЙЧИВОСТИ *Lr23*, В ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2024 г. **В. В. Пискарев**, кандидат сельскохозяйственных наук,  
**Н. И. Бойко**, кандидат сельскохозяйственных наук, **В. А. Апарина**, **Л. П. Сочалова**,  
**Е. В. Морозова**, **И. Н. Леонова**, доктор биологических наук

Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения РАН,  
 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 10  
 E-mail: piskaryov\_v@mail.ru

Исследования проводили с целью выделения источников высокой выраженности хозяйственно ценных признаков пшеницы яровой, несущих ген устойчивости *Lr23*, для использования в селекции на основе изучения коллекционных образцов (2010–2022 гг.). Материалом для исследования служили 34 образца яровой пшеницы различного географического происхождения. Индикатором поражения бурой ржавчиной (*Puccinia triticipina* Erikss) пшеницы на инфекционном фоне был сорт Скала, в условиях естественного распространения инфекции – Новосибирская 67 (2015–2016 гг.) и линия Хакасская (2017–2022 гг.). Оценку урожайности и признаков продуктивности проводили по методике ВИР, стандартами выступали сорта Новосибирская 15, Новосибирская 31 и Сибирская 17. Содержание макро- и микроэлементов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе ContrAA 800 D. В полевых условиях возбудителем *Puccinia triticipina* Erikss. не поразились (99 баллов) образцы Meri M 82, Pastor, Лутесценс 540 и Юго-Восточная 2, очень высокую устойчивость (9 баллов) наблюдали у образцов LT-2, Прохоровка, Gala, Гибрид 21, Димитровка 5–14 ИЗР, Lee, Тулайковская 1, Пирамида, Red River 68 и PV-18. Урожайность на уровне стандартов формировали образцы Злата, Хаят, Уралосибирская, Олимп и Буляк (423,4...553,0 г/м<sup>2</sup>). Источниками высокого содержания нутриентов в зерне могут служить образцы Sonora 64 (Cu – 4,40, Mn – 51,0, Zn – 42,1, Fe – 62,1, Mg – 1637,5 и K – 5294,0 мг/кг), Пирамида (Cu – 5,22, Mn – 56,3, Fe – 63,1 и Mg – 1616,5 мг/кг) и Inia F 66 (Cu – 5,13, Zn – 47,0, Fe – 65,2 и Mg – 1728,5 мг/кг). Выделившиеся образцы целесообразно использовать в селекции на устойчивость к бурой ржавчине, высокую урожайность и высокое содержание микро- и макроэлементов в зерне.

## STUDY OF COLLECTION SAMPLES OF SPRING WHEAT CARRYING THE RESISTANCE GENE *Lr23* IN THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF THE NOVOSIBIRSK REGION

V. V. Piskarev, N. I. Boyko, V. A. Aparina, L. P. Sochalova, E. V. Morozova, I. N. Leonova

Federal Research Center the Institution of Cytology and Genetics, Siberian Branch,  
 Russian Academy of Sciences,  
 630090, Novosibirsk, prosp. Akademika Lavrent'eva, 10  
 E-mail: piskaryov\_v@mail.ru

The aim of the study was to identify sources of high expression of agronomic traits of spring wheat and their complex based on the study of collection varieties (2010–2022) carrying the resistance gene *Lr23* for breeding in the ecological conditions of the Novosibirsk region. Field studies were carried out in the fields of the Siberian Research Institute of Plant Production and Breeding – a branch of the Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in 2010–2022. Thirty-four varieties of spring wheat of different geographical origin were studied under infectious background conditions (damage assessment according to the Peterson scale) and in field conditions (study according to the VIR method). Indicators of damage by powdery mildew and leaf rust of wheat at infectious field was Skala cultivar, and under conditions of natural spread of infection are Novosibirskaya 67 (2015–2016) and Khakasskaya (2017–2022). The yield and productivity characteristics were study using the VIR methodology, with the Novosibirskaya 15, Novosibirskaya 31 and Sibirskaya 17 varieties serving as standards. The content of macro- and microelements was determined using atomic absorption spectrometry on ContrAA 800 D device. Sources of resistance to leaf rust in wheat under infectious background conditions were identified, carrying the *Lr23* gene together with other effective genes (*Lr19*, *SR*). In field conditions, the following varieties were not affected by leaf rust (99 points): Meri M 82, Pastor, Lutescens 540, and Yugo-Vostochnaya 2; very high resistance (9 points) was observed in the following varieties: LT-2, Prokhorovka, Gala, Hybrid 21, Dimitrovka 5–14 IZR, Lee, Tulaikovskaya 1, Pyramida, Red River 68, and PV-18. The following varieties had yields at the standard level: Zlata (423.4 g/m<sup>2</sup>), Khayat (488.2 g/m<sup>2</sup>), Uralosibirskaya (541.5 g/m<sup>2</sup>), Olimp (431.1 g/m<sup>2</sup>), and Bulyak (553.0 g/m<sup>2</sup>). Sources of high nutrient content in grain can be the following varieties: Sonora 64 (Cu – 4.40, Mn – 51.0, Zn – 42.1, Fe – 62.1, Mg – 1637.5 and K – 5294.0 mg/kg), Pyramid (Cu – 5.22, Mn – 56.3, Fe – 63.1 and Mg – 1616.5 mg/kg), Inia F 66 (Cu – 5.13, Zn – 47.0, Fe – 65.2 and Mg – 1728.5 mg/kg). We recommend these varieties to breeding for resistance, high yield and high content of micro and macronutrients in grain.

**Ключевые слова:** мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.), устойчивость, генотип, *Puccinia triticipina* Erikss, урожайность, микроэлемент, макроэлемент, источник.

**Keywords:** soft wheat (*Triticum aestivum* L.), resistance, genotype, *Puccinia triticipina* Erikss, yield, microelement, macroelement, source.

Пшеница мягкая яровая (*Triticum aestivum* L.) – основная сельскохозяйственная культура в Сибири [1], что обусловлено особенностями резко континен-

тального климата региона. Бурая листовая ржавчина, вызываемая возбудителем *Puccinia triticipina* Erikss, ежегодно наносит значительный ущерб урожаю мяг-

Табл. 1. Образцы, оцененные в полевых условиях

| № ВИР                | Название             | Происхождение            | Разновидность            |
|----------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>2018–2021 гг.</b> |                      |                          |                          |
| St 58623             | Новосибирская 31     | РФ, Новосибирская обл.   | lutescens (Alef.) Mansf. |
| 54519                | NIL Thatcher Lr23    | Канада                   | erythrosperrum Korn.     |
| St 45376             | Олимп                | РФ, Самарская обл.       | erythrosperrum Korn.     |
| 43096                | Сибирская 17         | РФ, Новосибирская обл.   | lutescens (Alef.) Mansf. |
| 49239                | Kenya Farmer         | Кения                    | albidum Al.              |
| 45198                | Lee                  | США                      | erythrosperrum Korn.     |
| 64377                | Гибрид 21            | РФ, Новосибирская обл.   | graecum (Koern.) Mansf.  |
| 64666                | Димитровка 5-14 ИЗР  | Болгария                 | erythrosperrum Korn.     |
| 63716                | Казанская юбилейная  | РФ, Республика Татарстан | lutescens (Alef.) Mansf. |
| 62644                | Кинельская нива      | РФ, Самарская обл.       | erythrosperrum Korn.     |
| 64256                | Пирамида             | РФ, Пензенская обл.      | erythrosperrum Korn.     |
| 62642                | Прохоровка           | РФ, Саратовская обл.     | lutescens (Alef.) Mansf. |
|                      | Тулайковская 1       | РФ, Самарская обл.       | erythrosperrum Korn.     |
|                      | Тулайковская степная | РФ, Самарская обл.       | lutescens (Alef.) Mansf. |
| <b>2015–2022 гг.</b> |                      |                          |                          |
| St 66414             | Новосибирская 15     | РФ, Новосибирская обл.   | lutescens (Alef.) Mansf. |
| St 66349             | Злата                | РФ, Московская обл.      | lutescens (Alef.) Mansf. |
| 65817                | Новосибирская 31     | РФ, Новосибирская обл.   | erythrosperrum Korn.     |
| 66000                | Буляк                | РФ, Республика Татарстан | erythrosperrum Korn.     |
| St 66412             | ЛТ-2                 | РФ, Ленинградская обл.   | lutescens (Alef.) Mansf. |
| 65244                | Лютесценс 540        | РФ, Самарская обл.       | lutescens (Alef.) Mansf. |
|                      | Сибирская 17         | РФ, Новосибирская обл.   | lutescens (Alef.) Mansf. |
|                      | Хаят                 | РФ, Республика Татарстан | lutescens (Alef.) Mansf. |
|                      | Уралосибирская       | РФ, Омская обл.          | lutescens (Alef.) Mansf. |

кой пшеницы во всех регионах ее произрастания [2, 3], в том числе на территории Западной Сибири [4]. Селекция на устойчивость к поражению патогенами увеличивает экологическую безопасность сельского хозяйства [5], так как позволяет не применять фунгициды для борьбы с инфекцией. Однако рано или поздно патогены преодолевают защиту, обусловленную работой генов устойчивости растения [6], что требует постоянного поиска новых доноров этого признака [3, 7].

Селекцию пшеницы долгие годы осуществляли на повышение урожайности [8, 9], что привело к обеднению генофонда [10], в том числе по содержанию в зерне минеральных веществ [11], сокращение потребления которых оказывает негативное влияние на здоровье человека [12]. Обогащение зерна пшеницы микро- и макроэлементами сегодня считают одной из приоритетных задач, в связи с чем селекционеры начали обращать внимание на этот признак при включении генотипов в скрещивания [9].

Ген *Lr23* был перенесен в мягкую пшеницу от *Triticum durum* в результате скрещивания восприимчивого сорта Bobin W 392 с устойчивым к бурой ржавчине сортом твердой пшеницы Gaza. Созданный в результате сорт Gabo был первым носителем гена *Lr23* среди мягких пшениц в Австралии. Дальнейшее распространение этого гена среди мирового сорта пшеницы происходило через сорта Gabo и Timstein, а также их многочисленные производные [13].

Сорта-доноры гена *Lr23* Gabo, PV-18, Димитровка 5–14, Sonora 64, Timstein и другие часто использовали в скрещиваниях во многих селекционных центрах России [14]. С их участием созданы сорта яровой мягкой пшеницы в Поволжье (Ершовская 32, Олимп, Куйбышевская 1, Пирамида, Тулайковская 1, Тулайковская степная, Эритропермум 652, Эритропермум 603), Краснодарском крае (Дружина), Челябинской области (Уралочка), Новосибирской области (Гибрид 21), кроме того, по родословной можно предположить наличие этого гена у сортов Злата и Буляк [15].

Несмотря на преодоление популяцией патогена системы защиты, детерминированной геном *Lr23*,

сильного развития возбудителя бурой ржавчины на растениях не происходит. При его наличии снижается число и размер пустул, подавляется спорогенная активность и жизнеспособность гриба, кроме того, остается высокой эффективность *Lr23* в комбинации с другими генами [16]. Преимущественно он встречается в сочетании с генами *Lr10*, *Lr13*, *Lr26* и др. [17].

На основании известной информации о наличии в сортах и селекционных линиях гена устойчивости *Lr23* и различных комбинаций с другими генами резистентности селекционер может подобрать оптимального донора для определенных экологических условий и оценить эффективность гена с точки зрения защиты от патогена бурой ржавчины и влияния на другие агрономические признаки.

Цель исследования – выделить источники высокой выраженности хозяйственно ценных признаков пшеницы яровой, несущих ген устойчивости *Lr23*, для дальнейшего использования в селекции.

**Методика.** Исследования проводили в 2010–2022 гг. в Сибирском научно-исследовательском институте растениеводства и селекции – филиале «Федерального исследовательского центра Института цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук» (СибНИИРС-филиал ИЦиГ СО РАН). Поля расположены в Новосибирской области, лесостепной зоне Приобья, Западной Сибири. Материалом для исследования послужили 34 образца пшеницы яровой разных лет поступления в СибНИИРС-филиал ИЦиГ СО РАН из коллекции генетических ресурсов растений ВИР и других научных учреждений. Согласно литературным данным образцы несли ген *Lr23* как отдельно, так и в сочетании с другими генами (табл. 1). Кроме того, в изучение были включены образцы, у которых предполагают наличие гена *Lr23* по схожей реакции на патоген (ЛТ-2, К-20, WL 711, Юго-Восточная 2, Казанская Юбилейная, Уралосибирская и Хаят) и/или исходя из родословной сортов (Злата и Буляк).

Полевые опыты по оценке признаков продуктивности (урожайность, масса 1000 зерен и масса зерна колоса) проводили в различные годы, по схожим критериям оценки они разделены на два блока (см. табл. 1). В первый вошли 12 образцов, оценку

Табл. 2. Показатели ГТК в лесостепи Приобья

| Год  | Май   | Июнь | Июль | Август |
|------|-------|------|------|--------|
| 2010 | 3,33* | 0,33 | 0,88 | 0,66   |
| 2011 | 1,16  | 0,49 | 0,85 | 1,06   |
| 2012 | 0,52  | 0,29 | 0,05 | 1,27   |
| 2013 | 5,94  | 0,92 | 1,26 | 3,03   |
| 2014 | 2,99  | 0,37 | 1,23 | 0,59   |
| 2015 | 2,06  | 0,55 | 1,86 | 1,19   |
| 2016 | 1,28  | 0,66 | 1,22 | 0,37   |
| 2017 | 1,01  | 1,24 | 1,73 | 1,26   |
| 2018 | 9,47  | 1,23 | 1,13 | 0,65   |
| 2019 | 1,60  | 0,51 | 1,64 | 0,39   |
| 2020 | 1,19  | 0,50 | 1,39 | 1,42   |
| 2021 | 0,60  | 1,51 | 0,37 | 1,20   |
| 2022 | 0,14  | 0,54 | 1,06 | 2,23   |

\*ГТК > 1,50 – избыточная влагообеспеченность, ГТК = 1,41...1,50 – повышенная, ГТК = 1,11...1,40 – достаточная (оптимальная), ГТК = 0,76...1,10 – недостаточная, ГТК = 0,61...0,75 – низкая (слабая засуха), ГТК = 0,41...0,60 – очень низкая (средняя засуха), ГТК = 0,21...0,40 – исключительно низкая (сильная засуха), ГТК < 0,20 – катастрофически низкая (очень сильная засуха) [19].

которых проводили в 2018–2021 гг. (NIL Thatcher Lr23, Олимп, Kenya Farmer, Lee, Гибрид 21, Димитровка 5–14 ИЗР, Казанская юбилейная, Кинельская нива, Пирамида, Прохоровка, Тулайковская 1 и Тулайковская степная). Опыт закладывали с частыми повторениями стандартов (Новосибирская 31 и Сибирская 17). Второй включал 6 образцов, оцененных не менее 2 лет (ЛТ-2–2015–2016 гг., Лютеценс 540–2017–2019 гг., Уралосибирская и Буляк – 2020–2021 гг., Злата и Хаят – 2020–2022 гг.) в питомниках второго и третьего годов коллекции ВИР. Средние для стандартов (Новосибирская 15, Новосибирская 31 и Сибирская 17) рассчитаны за все годы 2015–2022 гг. Величины НСР в обоих блоках вычисляли по показателям сортов стандартов в соответствующие годы исследования.

Полевую устойчивость образцов к распространенным в регионе листовым патогенам (мучнистая роса и бурая ржавчина) изучали в условиях естественного распространения инфекции по методике ВИР [18]. В статье использованы минимальные значения, наблюдаемые у изучаемых образцов, соответствующие годам с сильным поражением (1...3 балла) индикаторов поражения сорта Новосибирская 67 (2015–2016 гг.) и линии Хакасская (2017–2022 гг.) в полевых условиях.

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный средней мощности. Содержание гумуса (по Тюрину) в слое 0...15 см составляет 5,7...6,9 %. Реакция почвенного раствора близкая к нейтральной, рН (ГОСТ 26423-85) – 6,6...6,8 ед. Содержание  $P_2O_5$  и  $K_2O$  (по Чирикову) в слое 0...40 см составляет соответственно 152...176 мг/кг и 121...136 мг/кг, общего азота перед посевом – 2,9...5,7 мг/кг почвы. Обеспеченность калием и фосфором высокая, азотом низкая или очень низкая.

Условия вегетационного периода в годы исследований были контрастными (табл. 2). Аномально жарким выдался сезон 2012 г. (ГТК = 0,05...0,52), когда ржавчина не развивалась, и, наоборот, более благоприятным (без особо резких колебаний) для патогена был сезон 2017 г. (ГТК = 1,01...1,73). Чаше разную степень засушливости отмечали в июне (10 сезонов из 13), реже – в июле и августе (5 из 13) и редко наблюдали в мае (3 из 13).

Суммарную ДНК выделяли из 5...7-дневных проростков методом Плашке с соавторами [20]. Генотипирование образцов пшеницы проводили с использованием ДНК-маркеров, разработанных

для генов устойчивости к бурой ржавчине пшеницы: *Lr1* (маркер WR003), *Lr3* (*Xmwg798*), *Lr10* (Fi2245 / *Lr10-6/r2*) [3], *Lr13* (*Xgwm630*) [21], *Lr14* (*Xgwm146*) [22], *Lr23* (Sun471) [23], *Lr19* (*Xwmc221*), *Lr26* (SCM9), *Lr34* (LR34Plus) [24]. Положительным контролем для ПЦР служили почти изогенные линии Thatcher (Tc) с соответствующими генами устойчивости: TcLr1, TcLr3a, TcLr10, TcLr13, TcLr14a, TcLr14b, TcLr23, TcLr19, TcLr26, TcLr34).

Содержание макро- и микроэлементов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии с атомизацией в пламени на приборе ContrAA 800 D (Analytik Jena, Германия). Пробы отбирали из семян, выращенных на инфекционном фоне в 2022 г. (1 повторность всех 34 образцов), в полевых опытах (2021 и 2022 гг.) по изучению признаков продуктивности (вторая повторность образцов NIL Thatcher Lr23, Олимп, Kenya Farmer, Lee, Гибрид 21, Димитровка 5–14 ИЗР, Казанская юбилейная, Кинельская нива, Пирамида, Прохоровка, Тулайковская 1 и Тулайковская степная, Злата, Хаят, Уралосибирская, Буляк), а также из фонда хранения (2-я для образцов, которые не изучали в полевых экспериментах по оценке признаков продуктивности в 2021–2022 гг. и 3-я повторность для остальных 33 образцов).

Статистическую обработку результатов выполняли с использованием пакета программ Statistica 10.0 (дисперсионный анализ данных) и MS Excel (среднее значение признаков,  $\delta$  – стандартное отклонение совокупности значений признака).

Посев для оценки поражения на инфекционном фоне проводили по пару вручную в однократной повторности. Глубина заделки семян 5...7 см. Через каждые 20 исследуемых образцов размещали сорт – контроль восприимчивости к болезни Скала.

Заражение растений (с фазы кущения до начала проявления симптомов поражения) проводили ежедневно (кроме дней с осадками) утром с использованием пульверизатора и водной суспензии уредоспор местной популяции *Puccinia triticina*. Оценку поражения бурой ржавчиной проводили в онтогенезе растения от начала проявления болезни до конца вегетации, в результатах отражены максимальные значения. Степень поражения определяли в процентах поражения поверхности листьев растений по шкале: оценка 0 – полная иммунность; поражение 1...10 % – высокая устойчивость; 11...25 % – умеренная устойчивость, 26...40 % – умеренная восприимчивость, 41...65 % – восприимчивость, выше 65 % – высокая восприимчивость; оценка с символом «х» – иммунологическая неоднородность образца (поражение отдельных растений образцов различалось) [25].

**Результаты и обсуждение.** В условиях искусственного инфекционного фона образцы, несущие (по литературным данным) ген *Lr23* в сочетании с другими генами (*Lr13*, *Lr3*, *Lr14b*), впервые, начиная с 2010 г., поразились в 2018 г. (табл. 3). При этом генетическая природа по генам устойчивости была подтверждена генотипированием с использованием молекулярных ДНК маркеров, разработанных для этих генов, для всех образцов, кроме Red River 68 (табл. 4). Образцы PV-18, Олимп, Тулайковская 1 и Куйбышевская 1 в основном несут 2 гена устойчивости *Lr13+Lr23*, у сорта Пирамида дополнительно амплифицировался ПЦР-фрагмент маркера, специфичного для гена *Lr10*. В генотипе сорта Prinqual, кроме гена *Lr23*, установлено наличие фрагмента для маркера к гену *Lr3*, у сорта Тулайковская степная –

**Табл. 3. Оценка поражения и устойчивости к бурой ржавчине сортов пшеницы яровой в лесостепи Приобья Новосибирской области**

| Сорт, линия                                                                      | Поражение на инфекционном фоне, % |         |         |         |                    | Устой-<br>чи-<br>вость* |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|--------------------|-------------------------|
|                                                                                  | 2015–<br>2017 гг.                 | 2018 г. | 2019 г. | 2020 г. | 2021 г.            |                         |
| Скала                                                                            | 80...100                          | 100     | 100     | 100     | 100                | —                       |
| Новосибирская 67                                                                 | —**                               | —       | —       | —       | —                  | 1...5                   |
| Хакасская                                                                        | —                                 | —       | —       | —       | —                  | 1...3                   |
| <b>Образцы, впервые поразившиеся в 2018 г.</b>                                   |                                   |         |         |         |                    |                         |
| Prinqual                                                                         | 0                                 | 60      | —       | —       | —                  | 7                       |
| PV-18                                                                            | 0                                 | x40–60  | 0       | 0       | 100                | 9                       |
| Red River 68                                                                     | 0                                 | x60–90  | 0       | 80      | x20–70             | 9                       |
| Олимп                                                                            | 1                                 | 80      | 0       | 0       | 60                 | 7                       |
| Пирамида                                                                         | 0                                 | x40–60  | 0       | 5       | x5–60              | 9                       |
| Тулайковская степная                                                             | 0                                 | 30      | 5       | 0       | x1–40              | 7                       |
| Тулайковская 1                                                                   | 0                                 | x40–60  | —       | —       | 70                 | 9                       |
| Куйбышевская 1                                                                   | 0                                 | x50–80  | 0       | 1       | 90                 | 1                       |
| <b>Образцы, впервые поразившиеся в 2021 г.</b>                                   |                                   |         |         |         |                    |                         |
| Gaza                                                                             | 0                                 | 0       | 0       | 0       | x5–60 <sup>3</sup> | —                       |
| NIL Thatcher Lr23                                                                | 0                                 | 5       | 0       | 1       | x30–70             | 5*                      |
| Gabo                                                                             | 0                                 | 0       | 1       | 0       | x60–90             | —                       |
| Lee                                                                              | 0                                 | 0       | 0       | 0       | 90                 | 9                       |
| Seri M 82                                                                        | 0                                 | 0       | 0       | 0       | x40–90             | 99                      |
| Kenya Farmer                                                                     | 0                                 | 0       | 0       | 0       | 100                | 5                       |
| Димитровка 5–14                                                                  | 1                                 | 1       | 0       | 1       | 30                 | 9                       |
| ИЗР                                                                              | —                                 | —       | —       | —       | —                  | —                       |
| Гибрид 21                                                                        | 0                                 | 0       | 0       | 1       | 100                | 9                       |
| <b>Образцы с сильным поражением в различные годы</b>                             |                                   |         |         |         |                    |                         |
| Gala                                                                             | 20...80                           | 100     | 90      | 100     | 100                | 9                       |
| Sonora 64                                                                        | 90                                | 100     | 80      | —       | 100                | —                       |
| Прохоровка                                                                       | 1...20                            | 90      | 10      | 0       | x20–90             | 9                       |
| <b>Образцы с высокой устойчивостью к поражению в условиях инфекционного фона</b> |                                   |         |         |         |                    |                         |
| Pastor                                                                           | 0                                 | 0       | 0       | 0       | 0                  | 99                      |
| Genaro T 81                                                                      | 0                                 | 0       | 1       | 0       | 1                  | —                       |
| Inia F 66                                                                        | 0                                 | 1       | 1       | 1       | 0                  | —                       |
| Super Seri 2                                                                     | 0                                 | 0       | 0       | 0       | 0                  | —                       |
| Лютеценс 540                                                                     | 0                                 | 0       | 0       | 0       | 0                  | 99                      |
| Кинельская Нива                                                                  | 0                                 | 0       | 0       | 1       | 0                  | 7                       |
| <b>Образцы с предполагаемым наличием гена Lr23 в генотипе</b>                    |                                   |         |         |         |                    |                         |
| ЛТ-2                                                                             | 0                                 | 0       | 0       | 0       | x1–80              | 9                       |
| K-20                                                                             | 0                                 | 0       | 0       | 0       | x30–90             | —                       |
| WL 711                                                                           | 0                                 | 0       | 1       | 0       | x30–90             | 5                       |
| Юго-Восточная 2                                                                  | 0                                 | 0       | 0       | 0       | x50–90             | 99                      |
| Казанская юбилейная                                                              | 60...100                          | 100     | —       | 100     | 100                | 5                       |
| Уралосибирская                                                                   | 30...80                           | x50–80  | 100     | 70      | —                  | 7                       |
| Злата                                                                            | —                                 | —       | 40      | 100     | 60                 | 7                       |
| Хаят                                                                             | —                                 | —       | 80      | 90      | 100                | 3                       |
| Буляк                                                                            | —                                 | —       | x0–30   | 5       | x0–100             | 7                       |

\*Минимальный балл устойчивости сортообразца к поражению патогеном в условиях естественного распространения инфекции (для индикаторов поражения указан диапазон по годам).

\*\*Образцы изучали в условиях естественного распространения инфекции.

*Lr14b*. Сорт Red River 68 был проверен на наличие маркеров для генов *Lr3*, *Lr10* и *Lr23*, однако были выявлены ПЦР-фрагменты только для гена *Lr3*. NIL Thatcher Lr23 перестала быть высоко устойчивой (7 баллов) в условиях естественного распространения инфекции так же, как и на инфекционном фоне в 2021 г.

Интересно, что образцы Gaza и NIL Thatcher Lr23, несущие единственный ген устойчивости *Lr23*, начали поражаться только в 2021 г. (как на инфекционном фоне, так и в полевых условиях). Кроме них, поражение отмечено у образцов с сочетанием генов *Lr10+Lr23* (Gabo, Димитровка 5–14 ИЗР, Гибрид 21 и Kenya Farmer), *Lr10+Lr13+Lr23* (Lee) и *Lr23+Lr26* (Seri M 82), при этом только у сорта Kenya Farmer не обнаружен ПЦР-фрагмент, сцепленный с геном *Lr23*. Схожую реакцию на патогена (впервые поразившись в 2021 г.) наблюдали у сорта Юго-Восточная 2,

у которого по литературным данным есть только ген *Lr26* [28], а по результатам генотипирования выявлены ПЦР-фрагменты, соответствующие наличию генов *Lr10*, *Lr23* и *Lr26*. У коллекционного образца K-20 по результатам генотипирования выявлены ПЦР-фрагменты, специфичные для *Lr10* и *Lr23*, что подтверждает генетическую природу их устойчивости. Сорт Буляк, который оказался носителем генов *Lr10* и *Lr23* по результатам генотипирования, начали испытывать с 2019 г., он характеризовался сильной гетерогенностью (поражение от 0 до 30 % в 2019 г. и от 0 до 100 % в 2021 г.). Для дальнейшего селекционного использования в сорте необходимо отбирать отдельные растения для скрещивания с последующим генотипированием их потомства.

Считают, что ген *Lr23* чувствителен к температуре окружающей среды, при этом его эффективность повышается при температуре более 25 °C и снижается при температурах менее 18 °C [13]. В 2018 г. в условиях Западной Сибири наблюдали пониженные температуры в сочетании с обильными осадками в мае (ГТК 9,47), в связи с чем посев яровой пшеницы провели только 22 мая, при этом до 6 июня сохранялась прохладная дождливая погода и всходы появились 3 июня. Проявление поражения бурой ржавчиной сортов озимой пшеницы на инфекционных полосах отмечали уже с 13 июня, что могло привести к инокуляции яровых сортов в ювенильной стадии. Так как экспрессивность гена *Lr23* из-за низких температур была низкой, образцы, несущие ген *Lr13* (ген возрастной устойчивости) в сочетании с *Lr23*, поразилась бурой ржавчиной. Таким образом, устойчивость образцов, детерминированная наличием гена *Lr23*, была фактически преодолена на инфекционном фоне только в 2021 г. (год с высокими температурами и низкой увлажненностью в мае), поскольку устойчивость образцов с геном *Lr10* (наличие которого постулировано у ряда образцов пораженных впервые в 2021 г.) преодолена во всем мире.

Среди образцов, поразившихся в различные годы, сорт Gala не имеет продукта амплификации маркера, специфичного для гена *Lr23*, и несет ПЦР-фрагмент маркера для гена *Lr14a*, его поражение было стабильно высоким (80...100 %) на протяжении длительного времени изучения (в том числе до 2018 г.). У сорта Sonora 64, который также сильно поражался на протяжении всех лет изучения (80...100 %) и характеризуется как носитель гена *Lr23*, что также подтверждено ПЦР, он был обнаружен в сочетании с генами *Lr1* и *Lr3* (оба гена ранее постулированы другими авторами [17]). К поражению этого сорта бурой ржавчиной, вероятнее всего, приводит взаимодействие чужеродного гена *Lr23* с другими генами устойчивости (*Lr1* и *Lr3*) пшеницы мягкой, находящихся в одном геноме. Подобные взаимодействия описаны ранее для гена *Lr34* [30] и генов, перенесенных от твердой пшеницы [31], в том числе гена *Lr23* [32]. Сорт Прохоровка сильно поражался в 2018 и 2021 гг., что схоже по реакции с образцами, несущими ген *Lr23* в сочетании с геном возрастной устойчивости *Lr13*, при этом генотипированием выявлены фрагменты маркеров, сцепленных с генами *Lr3+Lr10+Lr13+Lr23+Lr26*. Ранее почти все перечисленные гены (кроме *Lr10*) у сорта находили другие исследователи, что отражено в базе GRIS [17]. Природа устойчивости к поражению бурой ржавчиной у сорта Прохоровка требует уточнения.

Высокая устойчивость ряда образцов с геном *Lr23*, которая сохранилась в 2021 г., обусловлена его

Табл. 4. Характеристика изученных коллекционных образцов пшеницы по генам устойчивости к поражению бурой ржавчиной

| № каталога ВИР                                   | Сорт, линия          | Ген (гены) в сортообразцах по литературным данным                                  | Результаты генотипирования |
|--------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 52989                                            | Gaza                 | Lr23 [17]                                                                          | Lr23                       |
| 58623                                            | NIL Thatcher Lr23    | Lr23 [17]                                                                          | Lr23                       |
| 38574                                            | Gabo                 | Lr10+ Lr23 [17]                                                                    | Lr10+Lr23                  |
| 43096                                            | Lee                  | Lr10+Lr13+Lr23 [17]                                                                | Lr10+Lr13+Lr23             |
| 60829                                            | Seri M 82            | Lr23+Lr26 или Lr13 или Lr3a [17]                                                   | Lr23+Lr26, нет Lr13        |
| 45376                                            | Kenya Farmer         | Lr10+ Lr23 [17]                                                                    | Lr10, нет Lr23             |
| 45198                                            | Димитровка 5-14 ИЗР  | Lr10+ Lr23 [17]                                                                    | Lr10+Lr23                  |
| 49239                                            | Гибрид 21            | Lr10+Lr23 [17]                                                                     | Lr10+Lr23                  |
| 57017                                            | Prinqual             | Lr23 или Lr3+Lr34 [17]                                                             | Lr3+Lr23                   |
| 45933                                            | PV-18                | Lr13+Lr23 [17]                                                                     | Lr10+Lr13+Lr23             |
| 46975                                            | Red River 68         | Lr2a+Lr3a+Lr10+Lr16+Lr17+Lr20+Lr23 [17]                                            | Lr3, нет Lr10, Lr23        |
| 54519                                            | Олимп                | Lr13+Lr23 [17]                                                                     | Lr13+Lr23                  |
| 63716                                            | Пирамида             | Lr13+Lr23 [17]                                                                     | Lr10+Lr13+Lr23             |
| 62642                                            | Тулайковская степная | Lr23+LrX или Lr14b [17]                                                            | Lr14b+Lr23                 |
| 64256                                            | Тулайковская 1       | Lr13+Lr23 [17]                                                                     | Lr13+Lr23                  |
| 57113                                            | Куйбышевская 1       | Lr13+Lr23 [17]                                                                     | Lr13+Lr23                  |
| 44486                                            | Gala                 | Lr14a+Lr23 или Lr14a+Lr27 [17]                                                     | Lr14a, нет Lr23            |
| 45398                                            | Sonora 64            | Lr1+Lr23 или Lr1+Lr2a+Lr2c или Lr3 [17]                                            | Lr1+Lr3+Lr23               |
| 62644                                            | Прохоровка           | Lr13+Lr23+LrX или Lr3+Lr23 [17]                                                    | Lr3+Lr10+Lr13+Lr23+Lr26    |
| 63497                                            | Pastor               | Lr3+Lr10+Lr23+SR* [26]                                                             | Lr3+Lr10+Lr23              |
| 59625                                            | Genaro T 81          | Lr23+Lr26+SR [26] или Lr3a+Lr13+Lr26+Lr27 [17]                                     | нет Lr3, Lr13, Lr23, Lr26  |
| 45953                                            | Inia F 66            | Lr13+Lr17 или Lr13+Lr14a+Lr17 или Lr23 или Lr34 или Lr2a+Lr13+Lr14a+Lr17+Lr27 [17] | Lr13+Lr14a, нет Lr23       |
| -                                                | Super Seri 2         | Lr19+Lr23+SR* [26]                                                                 | Lr19+Lr23                  |
| 66000                                            | Лютесценс 540        | Lr19+Lr23 [27]                                                                     | Lr19+Lr23                  |
| 64666                                            | Кинельская Нива      | Lr19+Lr23 [17]                                                                     | Lr13+Lr19+Lr23             |
| <b>Предполагают наличие гена Lr23 в образцах</b> |                      |                                                                                    |                            |
| 65817                                            | ЛТ-2                 | —                                                                                  | нет Lr23                   |
| 64139                                            | K-20                 | —                                                                                  | Lr10+Lr23                  |
| 58330                                            | WL 711               | Lr13+Lr14a [17]                                                                    | Lr13+Lr14a+Lr23+Lr34       |
| 64110                                            | Юго-Восточная 2      | Lr26 [28]                                                                          | Lr10+Lr23+Lr26             |
| 64377                                            | Казанская юбилейная  | Lr26+Lr34 [29]**                                                                   | Lr1+Lr34; нет Lr23, Lr26   |
| 65244                                            | Уралосибирская       | Lr26 [28]                                                                          | нет Lr23+Lr26              |
| 66414                                            | Злата                | Lr10 [17]                                                                          | нет Lr23, Lr1, Lr10, Lr34  |
| 66412                                            | Хаят                 | Lr26+Lr34 [29]**                                                                   | нет Lr23+Lr26              |
| 66349                                            | Буляк                | Lr23+Lr26 [29]**                                                                   | Lr10+Lr23, нет Lr26        |

\*SR (slow rusting) – ген, обеспечивающий замедленное развития болезни по типу полевой устойчивости; \*\* – предполагаемые гены.

сочетанием с другими высокоэффективными генами. Так, три образца (Лютесценс 540, Кинельская Нива и Super Seri 2) несут дополнительно ген *Lr19* (как по литературным данным, так и по результатам нашего генотипирования), который до сих пор контролирует устойчивость к поражению, в том числе у образцов, несущих один ген *Lr19*. У сорта Pastor генотипированием выявлены ПЦР-фрагменты для генов *Lr3*, *Lr10* и *Lr23* из 4 предполагаемых, ген возрастной устойчивости (*SR*) не может быть выявлен, так как не известны маркеры, сцепленные с ним. Устойчивость сорту, скорее всего, придает *SR*-ген или уникальное сочетание всех имеющихся генов, несмотря на то, что остальные постулированные гены на сегодня потеряли свою эффективность. Образец Inia F 66 несет в своем генотипе либо сочетание генов *Lr13+Lr14a+Lr17*, либо *Lr2a+Lr13+Lr14a+Lr17+Lr27*, постулированные ранее, так как продукты амплификации выявлены для маркеров генов *Lr13*, *Lr14a* и не обнаружены для *Lr23*. Для остальных предполагаемых генов (*Lr17*, *Lr34*, *Lr2a* и *Lr27*) генотипирование не проводили. Еще один образец, у которого не удалось подтвердить в нашей работе наличие генов устойчивости, постулированных ранее в других исследованиях [17, 26], был Genaro T 81. Устойчивость к поражению бурой ржавчиной на инфекционном фоне у него сохранялась на протяжении всех лет изучения (2015–2022 гг.), а генотипирование использованными в этой работе маркерами, сцепленными с генами *Lr3*, *Lr13*, *Lr23*, *Lr26*, не позволило обнаружить ни один из них. Отсутствие продуктов амплификации маркеров, скорее всего, объясняется тем, что образец

не соответствует названию, и он будет исключен в дальнейшем из нашей коллекции.

Как сказано ранее, у 4 образцов, у которых предполагалось наличие гена *Lr23*, его присутствие (в сочетании с другими генами устойчивости) подтверждено как генотипированием, так и схожей реакцией на поражение патогеном (кроме сорта Буляк). По оставшимся 5 образцам результаты генотипирования не выявили ПЦР-фрагментов, специфичных для гена *Lr23*. При этом только у линии ЛТ-2 наблюдали реакцию, схожую с образцами носителями гена (впервые поразились в 2021 г.), остальные образцы в разной степени поражались на протяжении многих лет изучения, в том числе в 2019 и 2020 гг., когда поражение у образцов, несущих ген *Lr23* как в отдельности, так и в сочетании с другими, не отмечено. У сортов Уралосибирская, Злата и Хаят не обнаружены маркеры, сцепленные с другими предполагаемыми ранее генами устойчивости.

Несмотря на наличие или отсутствие гена *Lr23*, по результатам генотипирования и реакции на поражение в условиях инфекционного фона все образцы были оценены по содержанию макро- и микроэлементов (семена 2 и более лет репродукции в том числе с инфекционного фона) и проведен анализ полевых данных по ряду признаков продуктивности у отдельных образцов, которые в полевых условиях изучали не менее 2 лет в различных опытах (табл. 5). Линия NIL Thatcher *Lr23* из Канады, относящаяся к среднеранним сортам, уступала по урожайности стандарту Новосибирская 31 (–70,2 г/м<sup>2</sup>), формировала укороченный стебель (–10,8 см) и выколашивалась значительно (–3,7 дня) раньше стандарта. Устойчи-

Табл. 5. Результаты полевой оценки образцов мягкой пшеницы по хозяйственно ценным признакам

| Образец                                                       | Продолжительность периода, сут. |                     | Высота растения, см | Устойчивость к поражению мучнистой росой, балл |     | Урожайность, г/м <sup>2</sup> | Масса, г      |                 |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|------------------------------------------------|-----|-------------------------------|---------------|-----------------|
|                                                               | Всходы – колошение              | Всходы – созревание |                     | min                                            | max |                               | 1000 зерен, г | зерна колоса, г |
|                                                               |                                 |                     |                     |                                                |     |                               |               |                 |
| Результаты за 2018–2021 гг.                                   |                                 |                     |                     |                                                |     |                               |               |                 |
| Новосибирская 31                                              | 39,5                            | 74,6                | 95,8                | 5                                              | 5   | 415,5                         | 35,2          | 1,08            |
| NIL Thatcher Lr23                                             | 35,8                            | 74,0                | 85,0                | 1                                              | 5   | 345,3                         | 33,8          | 0,90            |
| Олимп                                                         | 38,5                            | 76,3                | 97,5                | 5                                              | 7   | 431,1                         | 37,7          | 1,26            |
| Сибирская 17                                                  | 43,7                            | 82,6                | 97,0                | 5                                              | 7   | 495,8                         | 41,0          | 1,35            |
| Kenya Farmer                                                  | 42,2                            | 80,3                | 92,0                | 9                                              | 5   | 386,5                         | 33,6          | 1,07            |
| Lee                                                           | 39,3                            | 80,5                | 78,5                | 7                                              | 9   | 293,2                         | 34,6          | 0,87            |
| Гибрид 21                                                     | 39,5                            | 80,7                | 83,5                | 5                                              | 9   | 330,5                         | 35,3          | 0,89            |
| Димитровка 5-14 ИЗР                                           | 40,0                            | 80,7                | 85,5                | 3                                              | 9   | 374,6                         | 42,5          | 1,15            |
| Казанская юбилейная                                           | 42,2                            | 80,2                | 104,0               | 5                                              | 5   | 423,1                         | 44,9          | 1,26            |
| Кинельская нива                                               | 41,2                            | 79,5                | 92,5                | 5                                              | 7   | 406,1                         | 38,5          | 0,78            |
| Пирамида                                                      | 40,3                            | 80,7                | 86,0                | 3                                              | 9   | 434,9                         | 41,5          | 1,32            |
| Прохоровка                                                    | 42,0                            | 80,2                | 87,5                | 5                                              | 9   | 359,0                         | 38,1          | 1,43            |
| Тулайковская 1                                                | 40,0                            | 80,7                | 84,0                | 3                                              | 9   | 392,5                         | 36,8          | 1,31            |
| Тулайковская степная                                          | 40,0                            | 82,2                | 95,0                | 5                                              | 7   | 405,3                         | 37,2          | 1,26            |
| НСР <sub>05</sub>                                             | 2,3                             | 3,3                 | 6,9                 | -                                              | -   | 53,2                          | 4,0           | 0,21            |
| Питомник 2...3-го годов изучения коллекции ВИР, 2015–2022 гг. |                                 |                     |                     |                                                |     |                               |               |                 |
| Новосибирская 15                                              | 36,3                            | 70,0                | 86,8                | 5                                              | 3   | 408,7                         | 34,8          | 0,90            |
| Злата                                                         | 40,0                            | 70,2                | 82,5                | 9                                              | 7   | 423,4                         | 38,8          | 1,09            |
| Новосибирская 31                                              | 40,2                            | 73,9                | 94,2                | 7                                              | 5   | 444,8                         | 35,0          | 1,00            |
| Лютесценс 540                                                 | 41,0                            | 75,8                | 92,9                | 5                                              | 99  | 375,7                         | 36,7          | 1,08            |
| Сибирская 17                                                  | 44,1                            | 80,2                | 103,4               | 7                                              | 7   | 517,1                         | 37,7          | 1,22            |
| Хаят                                                          | 46,7                            | 82,2                | 88,3                | 7                                              | 3   | 488,2                         | 40,7          | 1,24            |
| Уралосибирская                                                | 47,0                            | 84,6                | 92,3                | 7                                              | 7   | 541,5                         | 44,0          | 1,55            |
| Буляк                                                         | 46,8                            | 86,8                | 92,3                | 7                                              | 7   | 553,0                         | 39,0          | 1,19            |
| ЛТ-2                                                          | 52,0                            | 90,0                | 59,5                | 99                                             | 9   | 234,5                         | 22,5          | 0,55            |
| НСР <sub>05</sub>                                             | 2,6                             | 3,8                 | 8,9                 | -                                              | -   | 56,7                          | 3,9           | 0,17            |

вость к мучнистой росе у нее была значительно ниже (1 балл), тогда как устойчивость к поражению бурой ржавчиной находилась на уровне сорта Сибирская 17 (5 баллов). Сорт Олимп не имел преимуществ или недостатков по выраженности признаков продуктивности и урожайности, в сравнении со стандартом, кроме устойчивости к поражению бурой ржавчиной пшеницы (высокая устойчивость – 7 баллов).

Все сорта, отнесенные к группе среднепоздних, уступали стандарту Сибирская 17 (495,8 г/м<sup>2</sup>) по урожайности на 202,6 г/м<sup>2</sup> (Lee)...60,9 г/м<sup>2</sup> (Пирамида). Из преимуществ можно отметить очень высокую устойчивость к поражению мучнистой росой у сорта Kenya Farmer – 9 баллов, при величине этого показателя у стандарта 5 баллов, а также очень высокую устойчивость (9 баллов, что выше, чем у стандарта) к поражению бурой ржавчиной пшеницы образцов Lee, Гибрид 21, Димитровка 5–14 ИЗР, Пирамида, Прохоровка и Тулайковская 1. Кроме того, шесть об-

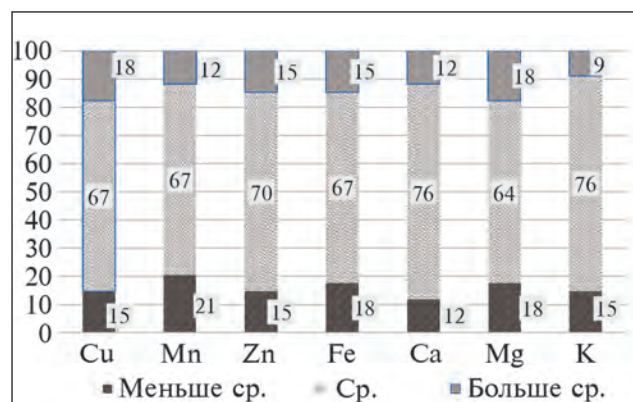
разцов имели укороченный стебель с варьированием от 78,5 см (Lee) до 87,5 см (Прохоровка).

В питомниках изучения коллекционных образцов из ВИР в 2015–2022 гг., несмотря на превосходство раннего сорта Злата над сортом Новосибирская 15 по массе 1000 зерен (+4,0 г) и массе зерна колоса (+0,19 г), урожайность была незначительно (14,7 г/м<sup>2</sup>) выше стандарта. Кроме того, у этого сорта следует отметить увеличение периода от всходов до колошения (+3,7 дня), высокую полевую устойчивость к поражению бурой ржавчиной пшеницы (7 баллов) и очень высокую (9) – к поражению мучнистой росой.

Несмотря на преимущество образца Лютесценс 540, выраженное в полном отсутствии поражения бурой ржавчиной (99 баллов), он значительно уступал стандарту по урожайности (–69,1 г/м<sup>2</sup>).

Табл. 6. Содержание микро- и макроэлементов в семенах коллекционных образцов, превышающих среднее значение по одному или нескольким показателям

| Образец           | Cu   | Mn   | Zn   | Fe   | Ca    | Mg     | K      |
|-------------------|------|------|------|------|-------|--------|--------|
| Gaza              | 3,27 | 43,0 | 37,9 | 51,2 | 908,3 | 1307,5 | 3124,5 |
| WL 711            | 2,00 | 47,9 | 43,0 | 47,9 | 301,9 | 1354,5 | 3731,5 |
| NIL Thatcher Lr23 | 3,12 | 36,7 | 35,9 | 38,1 | 546,5 | 1152,5 | 3779,0 |
| Prinqual          | 2,82 | 54,2 | 35,4 | 36,9 | 528,1 | 1353,5 | 4209,5 |
| Lee               | 3,81 | 40,1 | 34,1 | 48,1 | 484,8 | 1638,0 | 4408,0 |
| Red River 68      | 3,30 | 45,2 | 39,7 | 60,5 | 362,0 | 1503,5 | 4464,0 |
| Genaro T 81       | 3,29 | 44,4 | 41,8 | 47,8 | 412,1 | 1468,5 | 4487,5 |
| Пирамида          | 5,22 | 56,3 | 38,8 | 63,1 | 196,6 | 1616,5 | 4526,5 |
| Юго-Восточная 2   | 4,16 | 38,0 | 32,0 | 46,7 | 186,2 | 1440,0 | 4621,5 |
| Злата             | 3,04 | 37,2 | 47,9 | 50,3 | 233,9 | 1319,5 | 4642,0 |
| Олимп             | 4,34 | 57,9 | 39,4 | 53,3 | 457,3 | 1428,5 | 4743,5 |
| Inia F 66         | 5,13 | 41,7 | 47,0 | 65,2 | 432,3 | 1728,5 | 4758,0 |
| PV-18             | 3,39 | 47,9 | 33,6 | 42,8 | 711,9 | 1115,0 | 4793,0 |
| Гибрид 21         | 3,42 | 47,9 | 33,3 | 55,4 | 395,2 | 1652,0 | 4830,0 |
| Тулайковская 1    | 4,31 | 40,2 | 28,0 | 53,3 | 223,1 | 1252,0 | 4880,5 |
| Kenia Farmer      | 2,97 | 41,2 | 33,9 | 53,3 | 305,5 | 1692,0 | 4899,0 |
| Прохоровка        | 2,80 | 42,7 | 37,2 | 61,9 | 201,8 | 1245,0 | 5127,0 |
| Sonora 64         | 4,40 | 51,0 | 42,1 | 62,6 | 494,3 | 1637,5 | 5294,0 |
| Super Seri 2      | 2,03 | 37,6 | 31,8 | 41,6 | 442,3 | 1305,5 | 5660,0 |
| Среднее           | 3,20 | 43,6 | 34,8 | 49,2 | 355,9 | 1375,0 | 4509,7 |
| δ                 | 0,86 | 5,9  | 5,6  | 7,4  | 166,6 | 197,9  | 551,5  |



Распределение образцов по содержанию микро- и макроэлементов, в сравнении со средним по опыту, %: меньше ср. – доля образцов, накапливающих нутриенты в зерне значительно меньше средних значений, ср. – на уровне среднего, больше ср. – значительно больше среднего значения.

Превышения остальных образцов по структурным элементам продуктивности были математически недоказуемы.

Образцы, созревающие на уровне среднепозднего сорта Сибирская 17 (Хаят) и позже (Уралосибирская, Буляк), в основном формировали урожайность на уровне стандарта, за исключением линии ЛТ-2, которая уступала ему на 282,5 г/м<sup>2</sup>. Кроме того, у этой линии отмечено формирование мелкого зерна (масса 1000 зерен 22,5 г) и низкопродуктивный колос (0,55 г). Все образцы были ниже стандарта по высоте растения, которая варьировала от 59,5 см (ЛТ-2) до 92,3 см (Уралосибирская и Буляк). Сорт Уралосибирская превосходил стандарт по массе 1000 зерен (+6,3 г) и массе зерна (+0,33 г). Устойчивость к поражению мучнистой росой была в основном высокой на уровне стандарта (7 баллов), у линии ЛТ-2 не наблюдали признаков поражения патогеном. Высокой устойчивостью к поражению бурой ржавчиной пшеницы в полевых условиях, как и стандарт, характеризовались сорта Уралосибирская и Буляк (7 баллов), устойчивость сорта Хаят была низкой (3 балла), линии ЛТ-2 – очень высокой (9 баллов).

По результатам полевой оценки признаков урожайности и устойчивости к поражению патогенами в условиях естественного распространения инфекции остальных образцов информации значительно меньше, либо она полностью отсутствует.

Значительная часть коллекционных образцов по способности к накоплению нутриентов относится к группе со средним содержанием (варьирование по элементам от 64 % по содержанию магния до 76 – калия и кальция). По 18 % образцов накапливали большое количество меди и магния, тогда как только 9 % характеризовались высоким содержанием калия (см. рисунок).

Большим накоплением одного или нескольких микро- и макроэлементов характеризовались 19 образцов (табл. 6). Сорт Sonora 64 в значительно большем, чем в среднем по опыту, количестве накапливал 6 нутриентов – Cu (4,40 мг/кг), Mn (51,0), Zn (42,1), Fe (62,1), Mg (1637,5) и K (5294,0 мг/кг). Два образца характеризовались значительным накоплением 4 нутриентов: Пирамида – Cu (5,22 мг/кг), Mn (56,3), Fe (63,1) и Mg (1616,5 мг/кг), Inia F 66 – Cu (5,13 мг/кг), Zn (47,0), Fe (65,2) и Mg (1728,5 мг/кг). Еще у 2 образцов (Prinqual и Прохоровка) наблюдали повышенное количество 2 минеральных элементов (Mn+Ca и Fe+K соответственно). Высокое содержание кальция выявлено у образцов Gaza (908,3 мг/кг), NIL Thatcher Lr23 (546,5) и PV-18 (711,9 мг/кг). Один из важных микроэлементов цинк в значительном количестве накапливали в зерне образцы WL 711 (43,0 мг/кг), Genaro T 81 (41,8) и Злата (47,9 мг/кг). Магний выше среднего по опыту отмечали в зерне образцов Lee (1638,0), Гибрид 21 (1652,0) и Kenia Farmer (1692,0 мг/кг).

**Выводы.** В результате комплексного изучения коллекционных образцов пшеницы яровой в условиях лесостепи Приобья Новосибирской области выявлены источники устойчивости к поражению бурой ржавчиной пшеницы, несущие ген *Lr23* в сочетании с другими эффективными генами (*Lr19*, *SR*). В полевых условиях не поражались (99 баллов) возбудителем образцы Meri M 82, Pastor, Лютесценс 540 и Юго-Восточная 2, очень высокую устойчивость (9 баллов) наблюдали по образцам ЛТ-2, Прохоровка, Gala, Ги-

брид 21, Димитровка 5–14 ИЗР, Lee, Тулайковская 1, Пирамида, Red River 68 и PV-18. Все выделившиеся образцы можно рекомендовать включать в качестве источников устойчивости к патогену.

Урожайность на уровне стандартов сформировали 5 образцов коллекции, в том числе три с неустановленным генетическим контролем устойчивости – Злата (423,4 г/м<sup>2</sup>), Хаят (488,2 г/м<sup>2</sup>) и Уралосибирская (541,5 г/м<sup>2</sup>), а также два, несущие ген *Lr23* в сочетании с *Lr13* (Олимп – 431,1 г/м<sup>2</sup>) и *Lr10* (Буляк – 553,0 г/м<sup>2</sup>). Их (кроме сорта Хаят) можно использовать в качестве родительских форм для создания высокоурожайных сортов с высокой полевой устойчивостью к поражению бурой ржавчиной пшеницы.

Высокое содержание нутриентов в зерне выявлено у образцов Sonora 64 (Cu – 4,40, Mn – 51,0, Zn – 42,1, Fe – 62,1, Mg – 1637,5 и K – 5294,0 мг/кг), Пирамида (Cu – 5,22, Mn – 56,3, Fe – 63,1 и Mg – 1616,5 мг/кг) и Inia F 66 (Cu – 5,13, Zn – 47,0, Fe – 65,2 и Mg – 1728,5 мг/кг). Кроме того, значительное количество цинка в зерне накапливали коллекционные образцы WL 711 (43,0), Genaro T 81 (41,8) и Злата (47,9 мг/кг). Высокой урожайностью при этом характеризовался только сорт Злата, который одновременно был высокоустойчив (7 баллов) к поражению бурой ржавчиной пшеницы в условиях естественного распространения инфекции.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Изучение образцов яровой мягкой пшеницы по содержанию микро- и макроэлементов выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 23-16-00041, <https://rscf.ru/project/23-16-00041/>). Изучение образцов по устойчивости к поражению патогеном, урожайности, выраженности элементов продуктивности, а также генотипирование проводили при поддержке бюджетного проекта ИЦиГ СО РАН FWNР-2022-0008.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

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

#### Литература.

1. Эффективность листовых подкормок яровой пшеницы в условиях северной лесостепи Западной Сибири / С. В. Шерстобитов, М. М. Визирская, Н. В. Абрамов и др. // *Плодородие*. 2024. Т. 137. № 2. С. 11–16. doi: 10.25680/SI9948603.2024.137.03.
2. Тенденция преодоления устойчивости к бурой ржавчине интрогрессивных линий мягкой пшеницы с генетическим материалом *Aegilops speltoides* Tausch / Л. Я. Плотникова, Л. В. Мешкова, Е. И. Гульяева и др. // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018. Т. 22. № 5. С. 560–567. doi: 10.18699/VJ18.395.
3. Enlargement of genetic diversity of spring bread wheat resistance to leaf rust (*Puccinia tritricina* Eriks.) in Lower Volga region / E. I. Gulyaeva, S. N. Sibikeev, A. E. Druzhin, et al. // *Agricultural Biology*. 2020. Vol. 55. No. 1. P. 27–44. doi: 10.15389/agrobiology.2020.1.27eng.
4. Эффективные в Новосибирской области гены устойчивости пшеницы к бурой ржавчине в связи с изменчивостью популяции *Puccinia tritricina* / Л. П. Сочалова, Н. И. Бойко, А. А. Потешкина

- и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2023. Т. 184. № 2. С. 235–244. doi: 10.30901/2227-8834-2023-2-235-244.
5. Genomic approaches to identify molecular bases of Crop Resistance to diseases and to develop future breeding strategies / A. Mores, G. M. Borrelli, G. Laido, et al. // *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22. No. 11. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/22/11/5423> (дата обращения 01.08.2024). doi: 10.3390/ijms22115423.
6. Плотникова Л. Я., Кнауб В. В. Использование генетического потенциала родов *Thinopyrum* и *Agrropyron* для защиты пшеницы от болезней и абиотических стрессов // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2024. Т. 28. № 5. С. 536–553. doi: 10.18699/vjgb-24-60.
7. Orlovskaya O. A., Vakula S. I., Khotyleva L. V. Study of bread wheat lines with genetic material of *Triticum* species for resistance to fungal diseases // *Agricultural Biology*. 2021. Vol. 56. No. 1. P. 171–182. doi: 10.15389/agrobiology.2021.1.171eng.
8. Mining centuries old in situ conserved Turkish wheat landraces for grain yield and stripe rust resistance genes / D. Sehgal, S. Dreisigacker, S. Belen, et al. // *Frontiers in Genetics*. 2016. Vol. 7. Article 201. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/genetics/articles/10.3389/fgene.2016.00201/full> (дата обращения 01.08.2024). doi: 10.3389/fgene.2016.00201.
9. Стародавние сорта пшеницы – источники высокого качества и питательных свойств зерна / В. П. Шаманин, И. В. Потоцкая, С. А. Ессе и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2023. Т. 184. № 4. С. 103–115. doi: 10.30901/2227-8834-2023-4-103-115.
10. Kroupin P. Yu., Divashuk M. G., Karlov G. I. Gene resources of perennial wild cereals involved in breeding to improve wheat crop (Review) // *Agricultural Biology*. 2019. Vol. 54. № 3. P. 409–425. doi: 10.15389/agrobiology.2019.3.409eng.
11. Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years / M. S. Fan, F. J. Zhao, S. J. Fairweather-Tait, et al. // *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2008. Vol. 22. No. 4. P. 315–324. doi: 10.1016/j.jtemb.2008.07.002.
12. Shewry P. R. Do ancient types of wheat have health benefits compared with modern bread wheat? // *Journal of Cereal Science*. 2018. Vol. 79. P. 469–476. doi: 10.1016/j.jcs.2017.11.010.
13. Одинцова И. Г., Пеуша Х. О. О сложности локуса *Lr23*, контролируемого устойчивости пшеницы к бурой ржавчине // Сб. науч. тр. по прикл. бот., ген. и сел. Л.: ВИР, 1984. Т. 85. С. 13–19.
14. Кривченко В. И., Одинцова И. Г., Жукова А. Э. Генофонд пшеницы для селекции на устойчивость к болезням // Сб. науч. тр. «Генофонд и селекция растений на устойчивость к болезням и вредителям». Л.: ВИР, 1990. Т. 132. С. 3–10.
15. Реестр селекционных достижений. URL: <https://gossortrf.ru/registry/> (дата обращения: 01.08.2024).
16. *Triticum durum* Desf. – ценный источник генов для расширения генетического разнообразия яровой мягкой пшеницы / А. Е. Дружин, С. Н. Сибикеев, Е. И. Гуляева и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2023. Т. 184 № 3. С. 187–195. doi: 10.30901/2227-8834-2023-3-187-195.
17. Genetic Resources Information System for Wheat and Triticale URL: <http://www.wheatpedigree.net/> (дата обращения 20.07.2024).
18. Пополнение, сохранение в живом виде и изучение мировой коллекции пшеницы, эгилопса и тритикале: методические указания / А. Ф. Мережко, Р. А. Удачин, В. Е. Зуев и др. / под ред. А. Ф. Мережко. Санкт-Петербург: ВИР, 1999. 82 с.
19. Зоидзе Е. К., Хомякова Т. В. Моделирование формирования влагообеспеченности на территории Европейской России в современных условиях и основы оценки агроклиматической безопасности // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 2. С. 98–105.
20. Plaschke J., Ganai M. W., Roder M. S. Detection of genetic diversity in closely related bread wheat using microsatellite markers // *Theoretical and Applied Genetics*. 1995. Vol. 91. P. 1001–1007. doi: 10.1007/BF00223912.
21. Identification of Leaf Rust Resistance Genes in Selected Egyptian Wheat Cultivars by Molecular Markers Hindawi Publishing Corporation / I. A. Imbaby, M. A. Mahmoud, M. E. M. Hassan, et al. // *The Scientific World Journal*. 2014. Article 574285. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2014/574285> (дата обращения 01.08.2024). doi: 10.1155/2014/574285.
22. CIMMYT wheat molecular genetic-s laboratory protocols and applications to wheat breeding / S. Dreisigacker, D. Sehgal, G. Luna, et al. Mexico: CIMMYT, D.F., 2016. 143 p.
23. Development of robust molecular markers for marker-assisted selection of leaf rust resistance gene *Lr23* in common and durum wheat breeding programs / M. Chhetri, H. Bariana, D. Wong, et al. // *Molecular Breeding*. 2017. Vol. 37. No. 21. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11032-017-0628-6> (дата обращения 01.08.2023). doi: 10.1007/s11032-017-0628-6.
24. Методические подходы к идентификации эффективных генов, определяющих устойчивость пшеницы к комплексу грибных заболеваний / Е. С. Сколотнева, И. Н. Леонова, Е. Ю. Букалич и др. // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2017. Т. 21. № 7. С. 862–869. doi: 10.18699/VJ17.307.
25. Peterson R. F., Cambell A. B., Hannah A. E. A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals // *Canadian Journal of Research*. 1948. Vol. 26. No. 5. P. 496–500.
26. Safavi S. A., Afshari F. Virulence factors of *Puccinia triticina* on wheat and effectiveness of *Lr* genes for leaf rust resistance in Ardabil // *Archives of Phytopathology and Plant Protection*. 2013. Vol. 46. No. 10. P. 1246–1254. doi: 10.1080/03235408.2013.764055.
27. Сюков В. В., Зубов Д. Е. Генетическая коллекция мягкой пшеницы по устойчивости к бурой листовой ржавчине: метод. рек. Самара: СамНЦ РАН, 2008. 24 с.
28. Баранова О. А., Сибикеев С. Н., Конькова Э. А. Анализ устойчивости к стеблевой ржавчине и идентификация *Sr*-генов у интрогрессивных линий яровой мягкой пшеницы // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2023. Т. 184. № 1. С. 177–186. doi: 10.30901/2227-8834-2023-1-177-186.
29. Разнообразие сортов яровой мягкой пшеницы Татарского НИИСХ / Н. З. Василова, Э. З. Багавиева, Ф. Дамир и др. // Материалы 4 Междунар. конф. «Генофонд и селекция растений». Новосибирск: Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук.
30. McCallum B. D., Hiebert C. W. Interactions Between *Lr67* or *Lr34* and Other Leaf Rust Resistance Genes

- in Wheat (Triticum aestivum) // Frontiers in Plant Science. 2022. Vol. 13 URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plantscience/articles/10.3389/fpls.2022.871970/full> (дата обращения 01.08.2024). doi: 10.3389/fpls.2022.871970.*
31. Mapping a leaf rust resistance gene *LrOft* in durum wheat *Ofanto* and its suppressor *SuLrOft* in common wheat / X. Zhuansun, J. Sun, N. Liu, et al. // *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1108565/full> (дата обращения 01.08.2024). doi: 10.3389/fpls.2023.1108565.
32. Bai D., Knott D. Suppression of rust resistance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) by *d*-genome chromosomes // *Genome*. 1992. Vol. 35. P. 276–282. doi: 10.1139/g92-043.

Поступила в редакцию 05.09.2024

После доработки 22.10.2024

Принята к публикации 12.11.2024

## СОРТА ЯБЛОНИ ФЕДЕРАЛЬНОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА ИМ. И. В. МИЧУРИНА КАК БАЗИС ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЛЕКЦИОННОГО ПРЕИМУЩЕСТВА БИОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЛОДОВ

© 2024 г. Н. Н. Савельева, доктор биологических наук, А. Н. Юшков, доктор сельскохозяйственных наук,  
А. С. Земисов, Н. В. Борзых, В. В. Чивилев, кандидаты сельскохозяйственных наук

Федеральный научный центр им. И. В. Мичурина,  
393774, Тамбовская обл., Мичуринск, ул. Мичурина, 30  
E-mail: saveleva\_natalya\_nic@mail.ru

Работу проводили в 2019–2023 гг. в Тамбовской области. Цель исследований – выделение ценных генотипов яблони с повышенным содержанием в плодах биологически активных соединений для промышленного производства и использования в дальнейшей селекции. Объектами служили 15 сортов яблони (Успенское, Скала, Вымпел, Флагман, Стела, Былина, Фрегат, Красуля, Памяти Нестерова, Благовест, Академик Казаков, Мунстер, Чародейка, Пурпуровое ЦГЛ), включенных в Государственный реестр, а также перспективный сорт Гурман. В качестве контроля использовали сорта Антоновка обыкновенная и Богатырь. Схема посадки 6×3 м, год закладки – 2009 г., подвой – 54–118. Исследование биохимического состава плодов проводили общепринятыми методами в трехкратной повторности. Наибольшее накопление витамина С отмечено в плодах сортов Успенское (26,5 мг/100 г) и Скала (25,6 мг/100 г), что выше уровня контроля (Антоновка обыкновенная) соответственно на 74,3 % и 68,4 %. Высокое содержание Р-активных соединений зафиксировано у сортов Скала, Красуля, Успенское – 231...296 мг/100 г, что на 9,0...39,6 % превышает контроль Антоновка обыкновенная. Сорт Памяти Нестерова по накоплению растворимых сухих веществ (17,5 %) и сахаров (15,2 %) превзошел контрольные сорта на 22,4... 63,4 %. У сорта Гурман зафиксировано наибольший сахаро-кислотный индекс (39,1 ед.), что больше, чем у Антоновки обыкновенной, в 4,7 раза, по сравнению с сортом Богатырь – в 2,7 раза. Плоды сорта Вымпел по содержанию хлорогеновой кислоты превзошли средний показатель по сортам на 38,4 %. С учетом установленных свойств изученных сортов яблони основным направлением использования их продукции можно считать потребление в свежем виде, а также производство натуральных продуктов переработки функционального назначения с высоким содержанием витаминов и биологически активных веществ.

## APPLE VARIETIES OF THE I. V. MICHURIN FEDERAL SCIENTIFIC CENTER AS A BASIS FOR ENSURING THE BREEDING ADVANTAGE OF THE BIOCHEMICAL COMPOSITION OF FRUITS

N. N. Saveleva, A. N. Yushkov, A. S. Zemisov, N. V. Borzykh, V. V. Chivilev

Michurin Federal Scientific Center,  
393774, Tambovskaya obl., Michurinsk, ul. Michurina, 30  
E-mail: saveleva\_natalya\_nic@mail.ru

The research was conducted in 2019–2023 at the I. V. Michurin Federal Scientific Center, Michurinsk, Tambov region. The aim of the work was to identify valuable genotypes of apple trees with an increased content of biologically active compounds in fruits for industrial production and use in further breeding. 15 apple varieties by the I. V. Michurin Federal Scientific Center's breeding were the objects of the work. It was varieties Uspenskoye, Skala, Vimpel, Flagman, Stela, Bylina, Frigate, Krasulya, Pamyati Nesterova, Blagovest, Akademik Kazakov, Munster, Carodeyka, Purpurnoe CGL included at the State Register of breeding achievements approved for use, as well as Gourman variety passing variety testing. Antonovka obyknovennaya and Bogatyr varieties were used as controls. Planting scheme was 6×3 m., year of laying – 2009, rootstock 54–118. The soil type was leached medium-power black soil with a loamy mechanical composition. Fruits biochemical composition study was carried out by generally accepted methods in three-fold repetition. The highest accumulation of vitamin C (mg / 100 g) was noted in the fruits of the Uspenskoye (26.5) and Skala (25.6) varieties, which exceeds the control level (Antonovka obyknovennaya) by 74.3 % and 68.4 %. A high content of P-active compounds (from 231 to 296 mg/100 g) was noted in the varieties Skala, Krasulya, Uspenskoye, which is 9.0... 39.6 % higher than the control (Antonovka obyknovennaya). The Pamyati Nesterova variety in terms of accumulation of SDS (17.5 %) and the amount of sugars (15.2 %) exceed the level of control varieties by 22.4... 63.4 %. The Gourman variety has the highest value of SAI (39.1 units), which exceeds the level of Antonovka obyknovennaya by 4.7 times and Bogatyr by 2.7 times. In terms of chlorogenic acid content the fruits of the Vimpel variety exceeded the average by 38.4 %. Fresh consumption is the main purpose of the obtained apple varieties as well as natural processed products for functional purposes with a high content level of vitamins and biologically active substances production.

**Ключевые слова:** яблоня, сорт, биологически-активные вещества, биохимический состав.

**Keywords:** apple tree, variety, biologically active substances, biochemical composition

Яблоки считают богатым источником полезных соединений, оказывающих положительное влияние на здоровье человека. Они обладают длительной лежкостью, способной обеспечить потребление в свежем виде круглый год. Прекрасные вкусовые качества и ценный биохимический состав сделали яблоки одними из самых распространенных фруктов в мире и наиболее часто потребляемыми в нашей стране [1, 2, 3].

К 2030 г. прогнозируется увеличение количества сердечно-сосудистых заболеваний [4]. Благодаря противовоспалительным, гипополипидемическим и другим полезным свойствам потребление яблок обеспечивает поддержание необходимого баланса между активными формами кислорода (АФК) и антиоксидантами, улучшая сердечную функцию и целостность сосудов [5]. Свежие яблоки богаты полифенолами, витамином С, флавонои-

дами – природными антиоксидантами [6]. В результате, например, потребление плодов яблони сорта Anurka, которые характеризуются самой высокой концентрацией полифенолов среди всех сортов, произрастающих на юге Италии, снижало содержание уровня общего холестерина и липопротеинов низкой плотности в крови человека, одновременно увеличивая количество липопротеинов высокой плотности [7, 8].

Пектин и флоризин предотвращают увеличение массы тела, регулируют баланс кишечной микрофлоры и уменьшают воспалительные процессы в организме людей [9, 10]. Полифенолы замедляют ухудшение памяти, флоризин обладает антивозрастным эффектом, флоретин улучшает пространственную ориентацию, что в целом задерживает старение организма [11, 12]. Следует внимательно относиться к употреблению яблок только людям с повышенным содержанием мочевой кислоты в плазме крови, чтобы избежать таких заболеваний, как подагра [13].

Сегмент производства органической продукции в мире невелик и составляет всего 1...3%. В основном потребление фруктов, не загрязненных вредными веществами, отмечают в Германии, Франции, Великобритании, США, Канаде и Японии [1]. Такие страны, как Швейцария и Дания, пошли по пути выращивания иммунных к парше сортов яблони, которые исключают применение фунгицидов. И на их основе с использованием биологических средств борьбы с вредителями развернуто производство органических продуктов питания [14, 15, 16].

На сегодняшний день существуют различные методы исследований, применяемые в селекции на улучшение химического состава плодов. Среди них генная инженерия и биоинформатика, белковая химия и оценка содержания биологически активных соединений. Развивается биотехнология, позволяющая получать оздоровленные растения, а следовательно, и более качественные плоды. Во Всероссийском научно-исследовательском институте селекции плодовых культур уделяют внимание целенаправленным ступенчатым скрещиваниям, когда лучшие сеянцы от простых скрещиваний используют для гибридизации между собой или с высоковитаминными сортами. Созданы сорта яблони на основе полиплоидии. Триплоидные сорта (Августа, Синап орловский, Осиповское и др.) характеризуются регулярным плодоношением, высокой массой, товарностью и ценным химическим составом плодов [17].

Цель исследований – выделение ценных генотипов яблони с повышенным содержанием в плодах биологически активных соединений для промышленного производства и использования в дальнейшей селекции.

**Методика.** Работу проводили в Федеральном научном центре имени И. В. Мичурина в 2019–2023 гг. (г. Мичуринск, Тамбовская обл.) в селекционном саду № 7. Изучали плоды 15 сортов яблони (*Malus domestica* В.) селекции Федерального научного центра им. И. В. Мичурина, включенных в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию (Успенское, Скала, Вымпел, Флагман, Стела, Былина, Фрегат, Красуля, Памяти Нестерова, Благовест, Академик Казаков, Мунстер, Чародейка, Пурпуровое ЦГЛ) и проходящих сортоиспытание (Гурман). В качестве контрольных использовали сорт народной селекции Антоновка обыкновенная и экологически адаптированный сорт Богатырь. Схема посадки 6×3 м, подвой 54–118, сад заложен в 2009 г. Система содержания междурадий – залужение, в рядах – механизированная обработка. Орошение и удобрения не использовали, про-

Табл. 1. Метеорологические условия в годы исследований

| Год           | Температура воздуха, °С | Сумма осадков, мм | Гидротермический коэффициент (ГТК) |
|---------------|-------------------------|-------------------|------------------------------------|
| Среднегодовое | 7,2                     | 583,1             | 0,91                               |
| 2019          | 7,8                     | 445,0             | 0,85                               |
| 2020          | 8,2                     | 512,0             | 0,89                               |
| 2021          | 7,2                     | 570,0             | 0,94                               |
| 2022          | 7,3                     | 722,4             | 0,98                               |
| 2023          | 7,7                     | 611,9             | 0,91                               |

водили необходимые защитные мероприятия от болезней и вредителей.

Тип почвы в насаждениях яблони – выщелоченный чернозем среднесиловый с суглинистым механическим составом. Агрохимические показатели: содержание гумуса (ГОСТ 26213-91) – 4,8...5,7%, кислотность (ГОСТ 26212-2021) – 5,3...5,6 ед. рН, содержание азота (по Тюрину и Кононовой) – 8,0 мг/100 г (повышенное), подвижного фосфора и калия (ГОСТ 26204-91) – соответственно 13,0...14,0 мг/100 г и 13,0...15,0 мг/100 г, обменного кальция (ГОСТ 26487-85) – 22,3 мг-экв./100 г, сумма обменных оснований (по Каппену – Гильковицу) – 26,7 мг-экв./100 г.

За время проведения исследований наблюдали отклонение среднегодовой температуры воздуха от средне-годовое от 0,0 (2021 г.) до 1,0 °С (2020 г.). Сумма выпавших осадков характеризовалась неравномерным распределением по годам (табл. 1). В 2019 г. их количество было наименьшим – 445,0 мм, что на 23,7% ниже среднегодовое уровня. За 2020 и 2021 гг. сумма осадков также была меньше нормы на 71,1 и 13,1 мм соответственно. В 2022 г. она превысила среднегодовое значение на 139,3 мм, или на 23,9%, в 2023 г. – на 28,8 мм, или 4,9%. Место проведения исследований находится в зоне недостаточного увлажнения – ГТК (гидротермический коэффициент) варьировал от 0,85 (2019 г.) до 0,98 (2022 г.) единиц. В 2019 и 2020 гг. величина этого показателя была ниже среднегодовое на 6,6 и 2,2%, в 2022 г. – на 7,7% выше, что указывает на приближение к уровню обеспеченного увлажнения.

Исследование биохимического состава плодов проводили общепринятыми методами в трехкратной повторности. Содержание растворимых сухих веществ определяли рефрактометрическим методом на рефрактометре типа RL-3 (ГОСТ 28562-90), содержание суммы сахаров – по методу Бертрана (ГОСТ 8756.13-87), титруемую кислотность – титрованием вытяжек 0,1 н NaOH с последующим пересчетом на яблочную кислоту (ГОСТ 25555.0-82). Концентрацию аскорбиновой кислоты (АК, или витамин С) определяли йодометрическим методом, пектиновых веществ – объемным методом по С. Я. Райк, хлорогеновой кислоты – ускоренным методом С. М. Манусян и Г. Н. Ходжумян.

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием общепринятых методов математической статистики [18, 19], а также пакетов прикладных компьютерных программ Microsoft Office Excel 2010, STATISTIKA 6.0 for Windows. В таблице представлены коэффициент вариации ( $C_v$  %) и показатель наименьшей существенной разницы ( $HC_{05}$ ) для оценки достоверности различий между сортами с вероятностью 95%.

**Результаты и обсуждение.** Наибольшее накопление витамина С за годы исследований отмечено в плодах осенних сортов Успенское – 26,5 мг/100 г и Скала – 25,6 мг/100 г, что превышает уровень контрольного сорта Антоновка обыкновенная на 74,3% и 68,4% соответственно (табл. 2). В продукции сортов Вымпел, Флагман, Стела и Былина величина этого показателя была больше, чем у контрольного сорта Богатырь, соответственно на 9,0, 6,8,

Табл. 2. Биохимический состав плодов сортов яблони селекции ФНЦ им. И. В. Мичурина (среднее за 2019–2023 гг.)

| Сорт                              | Аскорбиновая кислота, мг/100 г | Органические кислоты, % | Растворимые сухие вещества, % | Сумма сахаров, % | СКИ  | Р-активные катехины, мг/100 г | Хлорогеновая кислота, мг/100 г |
|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------|------|-------------------------------|--------------------------------|
| Успенское                         | 26,5                           | 0,85                    | 15,4                          | 11,9             | 14,0 | 296                           | 185                            |
| Скала                             | 25,6                           | 0,96                    | 14,9                          | 12,0             | 12,5 | 231                           | 198                            |
| Вымпел                            | 23,7                           | 0,76                    | 14,3                          | 11,4             | 15,0 | 176                           | 207                            |
| Флагман                           | 21,5                           | 0,54                    | 15,7                          | 13,0             | 24,1 | 183                           | 146                            |
| Стела                             | 21,4                           | 0,50                    | 13,8                          | 11,7             | 23,4 | 109                           | 117                            |
| Былина                            | 21,1                           | 0,69                    | 15,1                          | 11,8             | 17,1 | 188                           | 170                            |
| Фрегат                            | 19,8                           | 0,79                    | 14,1                          | 11,5             | 14,6 | 139                           | 188                            |
| Красуля                           | 19,4                           | 0,35                    | 13,7                          | 11,5             | 32,9 | 248                           | 113                            |
| Памяти Нестерова                  | 19,3                           | 0,47                    | 17,5                          | 15,2             | 32,3 | 148                           | 118                            |
| Благовест                         | 17,6                           | 0,79                    | 15,2                          | 13,6             | 17,2 | 145                           | 180                            |
| Академик Казаков                  | 17,5                           | 0,66                    | 15,4                          | 12,1             | 18,3 | 186                           | 170                            |
| Мунстер                           | 16,3                           | 0,53                    | 14,1                          | 13,5             | 25,5 | 112                           | 180                            |
| Гурман                            | 15,8                           | 0,33                    | 15,9                          | 12,9             | 39,1 | 180                           | 122                            |
| Антоновка обыкновенная (контроль) | 15,2                           | 1,10                    | 12,9                          | 9,3              | 8,4  | 212                           | 108                            |
| Богатырь (контроль)               | 14,7                           | 0,71                    | 14,3                          | 10,2             | 14,4 | 200                           | 98                             |
| Чародейка                         | 12,9                           | 0,46                    | 14,5                          | 11,6             | 25,2 | 132                           | 109                            |
| Пурпуровое ЦГЛ                    | 9,3                            | 0,87                    | 14,4                          | 12,5             | 14,4 | 212                           | 134                            |
| C <sub>v</sub> %                  | 24,1                           | 32,4                    | 7,1                           | 11,1             | 40,9 | 27,1                          | 24,5                           |
| НСР <sub>05</sub>                 | 5,7                            | 0,40                    | 2,3                           | 2,1              | 13,3 | 92,1                          | 52,9                           |

6,7 и 6,4 мг/100 г. В целом высокое (15,8...19,8 мг/100 г) содержание АК в плодах, которое было больше, чем у контрольных сортов Антоновка обыкновенная (на 3,9...30,2%) и Богатырь (на 7,5...34,7%), отмечено у 46,7% сортов.

Концентрация витамина С в яблоках сорта Пурпуровое ЦГЛ ниже, чем у сорта Успенское, на 17,2 мг/100 г, а по сравнению с контрольным сортом Богатырь, на 5,4 мг/100 г, но по уровню Р-активных соединений (212 мг/100 г) его продукция находится на уровне контрольных. По происхождению Пурпуровое ЦГЛ – сеянец сорта Присцилла из США. Он устойчив к парше, мучнистой росе и благодаря высокой дегустационной оценке довольно широко распространен в производстве. Низкий уровень накопления витамина С, возможно, обусловлен генетически, что и наблюдали в потомстве [20].

По количеству Р-активных соединений выделяются генотипы Успенское (296 мг/100 г), Скала (231 мг/100 г), Красуля (248 мг/100 г), у которых величина этого показателя была выше, чем у контрольного сорта Антоновка обыкновенная, на 39,6%, 9,0% и 17,0% соответственно. Основная часть изучаемых сортов (73,3%) характеризовалась средним уровнем накопления таких веществ в плодах – от 112 до 212 мг/100 г при НСР 92,1 мг/100 г. Наименьшее содержание Р-активных соединений отмечено у сорта Стела – 109 мг/100 г, что ниже контроля (Богатырь) на 45,5%.

Растворимые сухие вещества (РСВ) в плодах яблони в основном представлены сахарами [18, 20]. Среди изученных генотипов по величине этого показателя выделяется сорт Памяти Нестерова, плоды которого содержат 17,5% РСВ и 15,2% сахаров, что выше уровня контрольного сорта Антоновки обыкновенной на 36,7% и 63,4% соответственно, Богатырь – на 22,4% и 49,0%. Его плоды обладают десертным вкусом с выдержанным балансом сахара и кислоты, а также высоким СКИ – 32,3 ед. Диапазон содержания РСВ в исследуемой выборке варьировал от 12,9% (Антоновка обыкновенная) до 17,5% (Памяти Нестерова). Высокой величиной этого показателя (более 15%) характеризовались сорта Успенское, Флагман, Былина, Благовест, Академик Казаков, Гурман, среднее (13,7...14,9%) [18, 20] содержание отмечено у большей части (53,3%) изученных сортов.

В плодах яблони накапливалось в среднем 10...11% сахаров, при наименьшей величине этого показателя 9,3% (Антоновка обыкновенная) и самой высокой – 15,2% (Памяти Нестерова). Все изученные сорта селекции ФНЦ им. И. В. Мичурина превосходили контрольные по нако-

плению сахаров на 1,2...5,9%. Это связано с направленной селекцией на выведение сладких плодов из-за изменения вкусовых предпочтений потребителей, которые произошли в результате практически монопольного представления яблок южных сортов в торговых сетях на протяжении уже более чем 30 лет.

Вкус плодов во многом зависит от сочетания в них сахара и кислоты, что отражает показатель сахаро-кислотного индекса. Чем ниже его величина, тем сильнее вкус яблок смещается в сторону кислого. Наибольший СКИ (39,1 ед.) отмечен у сорта Гурман. Он отличается ценными товарно-потребительскими качествами и особенно гармоничным вкусом плодов. Кроме того, высокий сахаро-кислотный индекс характерен для яблок сорта Красуля (32,9 ед.), что обеспечивает сбалансированный вкус. Сахаро-кислотный индекс сортов Стела, Флагман, Чародейка и Мунстер варьирует от 23,4 до 25,5 ед. и превышает средний уровень по изученной выборке (20,5 ед.) на 14,1...24,4%.

Содержание в плодах титруемых органических кислот изменялось (C<sub>v</sub> = 32,4%) от 0,33% у сорта Гурман до 0,96% у сорта Скала, что ниже, чем у Антоновки обыкновенной на 0,77...0,14%. Наибольшее содержание хлорогеновой кислоты отмечено у сорта Вымпел (207,0 мг/100 г), у которого оно было выше среднего по сортам (149,6 мг/100 г) на 38,4%, а по сравнению с контрольными сортами Антоновка обыкновенная и Богатырь – на 91,7% и 111,2% соответственно.

На основании результатов исследований были рассчитаны коэффициенты вариации изучаемых показателей биохимического состава плодов. Наибольшей вариабельностью характеризовались величины сахаро-кислотного индекса – 40,9%. Величины C<sub>v</sub> для растворимых сухих веществ и суммы накапливаемых сахаров были сравнительно невысокими – 7,1% и 11,1%, что свидетельствует о большей стабильности этих признаков в целом по сортам яблони.

**Выводы.** Наибольшим накоплением витамина С характеризуется продукция сортов Успенское и Скала (25,6...26,5 мг/100 г), Р-активных соединений – Скала, Красуля, Успенское (231...296 мг/100 г), которые превосходят по величинам этих показателей контрольный сорт Антоновка обыкновенная соответственно на 74,1...74,3% и 9,0...39,6%.

Содержание сахаров в продукции всех изученных сортов (11,4...15,2%) было больше, чем у контрольных, на 1,2...5,9%. Лучшим по накоплению РСВ (17,5%) и суммы сахаров (15,2%) был сорт Памяти Нестерова. По РСВ он

превысил контрольные сорта на 3,2...4,6%, по сумме сахаров – на 5,0...5,9%. У сорта Гурман отмечен наибольший СКИ (39,1 ед.), что в 4,7 раза выше, чем у Антоновки обыкновенной, и в 2,7 раза, по сравнению с сортом Богатырь. Содержание хлорогеновой кислоты в плодах сорта Вымпел превосходит среднюю величину показателя по изученным сортам на 38,4%, уровень контрольных сортов Антоновка обыкновенная и Богатырь – на 91,7% и 111,2% соответственно.

Выращенная продукция может быть использована и для производства натуральных продуктов переработки функционального назначения с высоким содержанием витаминов и биологически активных веществ.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр им. И. В. Мичурина». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

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

#### Литература.

1. Обеспечение стабильности устойчивости геномных яблоки к грибу *Venturia Inaequalis* (Cooke) Wint. / Н. Н. Савельева, А. Н. Юшков, А. С. Земисов и др. // Биосфера. 2022. Т. 14. № 4. С. 384–386.
2. Innovative technologies of increasing the efficiency of the breeding process of fruit crops / A. N. Yushkov, N. N. Saveleva, V. V. Chivilev, et al. // Achievements of Science and Technology of AICis. 2019. Vol. 33. No. 2. P. 27–30. doi: 10.24411/0235-2451-2019-10207.
3. Селекционная оценка гибридного потомства яблоки по накоплению в плодах аскорбиновой кислоты / А. С. Земисов, А. Н. Юшков, Н. Н. Савельева и др. // Плодоводство и ягодное хозяйство России. 2020. № 61. С. 24–28.
4. Global burden of cardiovascular diseases and risk factors, 1990–2019: Update from the GBD 2019 study / G. A. Roth, G. A. Mensah, C. O. Johnson, et al. // Journal of the American College of Cardiology. 2020. Vol. 76. No. 25. P. 2982–3021. doi: 10.1016/j.jacc.2020.11.010
5. Design, synthesis, molecular modelling and biological evaluation of novel 3-(2-naphthyl)-1-phenyl-1H-pyrazole derivatives as potent antioxidants and 15-lipoxygenase inhibitors / S. A. Ali, S. M. Awad, A. M. Said, et al. // Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry. 2020. Vol. 35. No. 1. P. 847–863. doi: 10.1080/14756366.2020.1742116.
6. Fisetin inhibits lipopolysaccharide-induced inflammatory response by activating  $\beta$ -catenin, leading to a decrease in endotoxin shock / I. M. Molagoda, J. A. C. Jayasingha, Y. H. Choi, et al. // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. No. 1. Article 8377. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-87257-0> (дата обращения: 12.09.2024) doi: 10.1038/s41598-021-87257-0.
7. Lactofermented Annurca apple puree as a functional food indicated for the control of plasma lipid and oxidative amine levels: Results from a randomised clinical trial / G. C. Tenore, D. Caruso, G. Buonomo, et al. // Nutrients. 2019. Vol. 11. No. 1. Article 122. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6643/11/1/122> (дата обращения: 12.09.2024) doi: 10.3390/nu11010122.
8. A boost in mitochondrial activity underpins the cholesterol-lowering effect of Annurca apple polyphenols on hepatic cells / E. Sommella, N. Badolati, G. Riccio, et al. // Nutrients. 2019. Vol. 11. No. 1. Article 163. <https://www.mdpi.com/2072-6643/11/1/163163> (дата обращения: 12.09.2024). doi: 10.3390/nu11010163.
9. Alteration of the gut microbiota associated with childhood obesity by 16S rRNA gene sequencing / X. Chen, H. Sun, F. Jiang, et al. // PeerJ-Life and Environment. 2020. Vol. 8. Article 8317. <https://peerj.com/articles/8317/> (дата обращения: 12.11.2024). doi: 10.7717/peerj.8317.
10. Apple flavonols mitigate adipocyte inflammation and promote Angiogenic factors in LPS- and cobalt chloride-stimulated adipocytes, in part by a peroxisome proliferator-activated receptor- $\gamma$ -dependent mechanism / D. M. Liddle, M. E. Kavanagh, A. J. Wright, et al. // Nutrients. 2020. Vol. 12. No. 5. Article 1386. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6643/12/5/1386/> (дата обращения: 12.11.2024). doi: 10.3390/nu12051386.
11. Protective effect of apple polyphenols on chronic ethanol exposure-induced neural injury in rats / F. Wang, J. Li, L. Li, et al. // Chemico-Biological Interactions. 2020. Vol. 326. P. 109–113. doi: 10.1016/j.cbi.2020.109113.
12. Tripathi S., Mitra Mazumder P. Comprehensive investigations for a potential natural prophylaxis-a cellular and murine model for apple cider vinegar against hydrogen peroxide and scopolamine induced oxidative stress // Drug Development Research. 2022. Vol. 83. No. 1. P. 105–118. doi: 10.1002/ddr.21849.
13. Rafiullah M., Siddiqui K., Al-Rubeaan K. Association between serum uric acid levels and metabolic markers in patients with type 2 diabetes from a community with high diabetes prevalence // International Journal of Clinical Practice. 2020. Vol. 74. No. 4. Article 13466. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ijcp.13466> (дата обращения: 12.11.2024) doi: 10.1111/ijcp.13466.
14. Gessler C. Vf scab resistance of Malus // Trees-structure and function. 2012. Vol. 26. No. 1. P. 95–108. doi: 10.1007/s00468-011-0618-y.
15. Genetic Characterization of the Apple Germplasm Collection in Central Italy: The Value of Local Varieties / G. Marconi, N. Ferradini, L. Russi, et al. // Front. Plant Sci. 2018. Vol. 9. Article 1460. <https://www.frontiersin.org/journals/plantscience/articles/10.3389/fpls.2018.01460/full>. (дата обращения: 12.11.2024). doi: 10.3389/fpls.2018.01460.
16. Savelyev N. I., Lyzhin A. S., Savelyeva N. N. Genetic diversity of genus Malus Mill. for scab resistance genes // Russian Agricultural Sciences. 2016. Vol. 42. No. 5. P. 310–313. doi: 10.3103/S1068367416050189.
17. Седов Е. Н., Макаркина М. А., Серова З. М. Селекция яблоки на улучшение биохимического состава плодов // Сельскохозяйственная биология. 2011. № 1. С. 76–84.
18. Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур / под общ. ред. Е. Н. Седова и Т. П. Огольцовой. Орел: ВНИИСПК, 1999. 608 с.
19. Методы биохимического исследования растений / А. И. Ермаков, В. В. Арасимович, Н. П. Ярош и др. // под ред. Ермакова А. И. 3 изд., перераб. и доп. Л.: Агропромиздат. Ленинградское отделение. 1987. 430 с.
20. Черенкова Т. А. Савельева Н. Н. Биохимический состав плодов иммунных к парше сортов яблоки пригодных для получения натуральных высоковитаминных продуктов питания // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2014. № 7–8. С. 93–95.

Поступила в редакцию 20.06.2024

После доработки 01.09.2024

Принята к публикации 05.11.2024

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЗДОРОВЛЕНИЯ САДОВЫХ КУЛЬТУР ОТ ВИРУСОВ

© 2024 г. М. Т. Упадышев, доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН, С. С. Макаров, доктор сельскохозяйственных наук

Российский государственный аграрный университет –  
Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева,  
127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49  
E-mail: upad8@mail.ru

Исследования проводили в 2011–2022 гг. с целью совершенствования методов оздоровления садовых культур *in vitro* от вредоносных вирусов. В качестве противовирусного препарата в составе питательной среды применяли салициловую кислоту в концентрации  $3 \times 10^{-4}$  М. Для оздоровления от вирусов и повышения коэффициента размножения на этапе собственно микроразмножения, а также для увеличения укореняемости и улучшения развития корней на этапе укоренения микрочеренки обрабатывали на приборе СМИ-5 импульсами магнитной индукции с изменяющейся нарастающей частотой от 0,8 до 51,2 Гц с шагом 0,2 Гц на протяжении 10 мин. Использование салициловой кислоты позволило увеличить выход свободных от латентных вирусов эксплантов подвоев яблони на 11,8...23,7%, груши – на 38,4...40% в зависимости от вида вируса. Низкий индекс латентной зараженности вирусами отмечен при комплексной терапии эксплантов подвоя яблони с применением салициловой кислоты, термо- и магнитотерапии. Магнитная обработка способствовала улучшению вегетативного развития эксплантов на этапе размножения: число побегов возрастало в зависимости от культуры в 1,6...1,7 раза. На этапе укоренения у микропобегов изученных культур, обработанных прибором СМИ-5, наблюдали значительную стимуляцию ризогенеза (укореняемость возросла в 2,0...3,3 раза), увеличение числа (в 2,2...2,7 раза) и длины (в 3,1 раза) корней, по сравнению с контролем. При высадке микрорастений в нестерильные условия магнитная обработка приводила к улучшению их приживаемости в зависимости от культуры на 8...13%. К преимуществам магнитной обработки можно отнести отсутствие фитотоксичности, универсальность, повышенный выход здоровых растений, возможность автоматизации и экологическую безопасность процесса обработки. На этапе укоренения у обработанных импульсами магнитной индукции микропобегов изученных культур наблюдали значительную стимуляцию ризогенеза (укореняемость возросла в 2,0...3,3 раза), увеличение числа (в 2,2...2,7 раза) и длины (в 3,1 раза) корней, по сравнению с вариантом без обработки.

## MODERN METHODS FOR HEALTHIZING GARDEN CROPS FROM VIRUSES

M. T. Upadyshev, S. S. Makarov

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,  
127550, Moskva, ul. Timiryazevskaya, 49  
E-mail: upad8@mail.ru

The studies were conducted in 2011–2022 to improve the methods of *in vitro* treatment of garden crops from harmful viruses by increasing the efficiency of treatment and environmental safety. Salicylic acid at a concentration of  $3 \times 10^{-4}$  M was used as an antiviral drug in the nutrient medium. Microcuttings at the stage of micropropagation itself for the purpose of treatment from viruses and increasing the reproduction rate, as well as at the rooting stage to increase rooting and improve root development, were treated using a device for magnetic pulse treatment model SMI-5 with magnetic induction pulses with a changing increasing frequency from 0.8 to 51.2 Hz for 10 minutes with a step of 0.2 Hz. When improving the clonal rootstocks of apple and pear trees, the use of salicylic acid made it possible to increase the yield of explants of apple rootstocks free from latent viruses by 11.8–23.7%, and of pear rootstocks by 38.4–40%, depending on the type of virus. A low index of latent virus content is observed during complex therapy of apple rootstock explants using salicylic acid, thermo- and magnetic therapy. Magnetic treatment contributed to the improvement of the vegetative development of explants at the propagation stage: the number of shoots increased by 1.6–1.7 times, depending on the culture. At the rooting stage, in microshoots of the studied crops treated with magnetic induction pulses, significant stimulation of rhizogenesis and an increase in the number and length of roots were observed. When planting microplants in non-sterile conditions, magnetic treatment led to an improvement in their survival rate by 8–13%, depending on the crop. The advantages of magnetic processing include the absence of phytotoxicity, versatility, higher yield of healthy plants, automation and environmental safety of the processing process.

**Ключевые слова:** вирусы, подвои, яблоня, груша, химиотерапия *in vitro*, магнитотерапия *in vitro*.

**Key words:** viruses, stocks, apple-tree, pear, chemotherapy *in vitro*, magnetotherapy *in vitro*.

Вирусы – опасные патогены плодовых и ягодных культур. Из-за латентного характера большинства вирусов и трудности выбраковки они широко распространяются с зараженным посадочным материалом, инструментом при обрезке, семенами и пыльцой, различными переносчиками биотической природы [1, 2]. Согласно мониторингу насаждений 15 областей России за 25-летний период (протестировано около 100 тысяч растительных образцов) установлена значительная распространенность вирусных болезней на большинстве плодовых и ягодных культур [3, 4]. Воздействие вредо-

носных вирусов семечковых культур на яблоне и груше приводит к снижению урожайности на 21...48%, а у восприимчивых сортов – до 70% [5], на косточковых – до 50% [2, 6].

Основным направлением борьбы с вирусами считают перевод питомниководства на безвирусную основу и сертификацию посадочного материала. Выпускаемый посадочный материал должен быть свободным от карантинных объектов и других опасных вредителей и болезней. На сегодняшний день в России разработан ГОСТ Р 59653-2021 на посадочный материал плодовых

и ягодных культур, в котором установлены ограничения на наличие вирусов определенных видов.

В случае отсутствия свободных от основных вирусов растений какого-либо сорта проводят оздоровление. Его осуществляют различными методами, к числу которых относятся термотерапия, хемотерапия и культура меристем [7, 8, 9]. Выход свободных от вирусов растений зависит от метода оздоровления, биологических особенностей вируса и конкретной культуры [1, 10, 11].

В последние годы для оздоровления от вирусов часто используют метод хемотерапии *in vitro* [12, 13]. При относительно высоком выходе свободных от основных вредоносных вирусов регенерантов он сокращает время оздоровления благодаря совмещению этапов культивирования микрорастений с процессом терапии [1]. Вместе с тем некоторые противовирусные препараты опасны для здоровья людей, другие – малоэффективны или фитотоксичны. Поэтому актуален поиск экологически безопасных противовирусных средств. Ранее мы разработали способ хемотерапии с применением гидроксibenзойных кислот [1]. Однако его необходимо адаптировать к требованиям определенной культуры и виду вируса.

Термостабильные вирусы не удается уничтожить термообработкой. Поэтому в качестве альтернативы можно использовать другие физические методы. Для повышения эффективности оздоровления зараженных вирусами растений была предложена магнитно-импульсная обработка (МИО) [1, 14]. Этот метод также нуждается в модификации применительно к биологическим особенностям патогенов и культуры [15].

Цель исследования – совершенствование методов оздоровления садовых культур от вредоносных вирусов путем использования хемо- и магнитотерапии.

**Методика.** Эксперименты проводили в 2011–2022 гг. по ранее разработанной методике [16]. Объектами исследований служили микропобеги груши сорта Лада, клоновых подвоев яблони 62-396 и груши Загорьевский. Экспланты груши сорта Лада были заражены вирусами хлоротической пятнистости листьев яблони (ACLSV) и мозаики яблони (ArMV); подвоев яблони 62-396-CLSV, бороздчатости древесины яблони (ASGV) и ямчатости древесины яблони (ASPV); подвоев груши – ASGV и ASPV.

В исследованиях, проведенных в 2011–2018 гг., с целью оздоровления от вирусов и повышения коэффициента размножения, полученные на модифицированной питательной среде Мурасиге и Скуга микрочеренки подвоев яблони 62-396 и груши Загорьевский длиной 10 мм на этапе собственно микроразмножения обрабатывали на приборе для магнитно-импульсной обработки (МИО) модели СМН-5 импульсами пятнистости листьев с нарастающей частотой от 0,8 до 51,2 Гц с шагом 0,2 Гц на протяжении 10 мин. В качестве противовирусного препарата применяли салициловую кислоту (СК) в концентрации  $3 \times 10^{-4}$  М. Третий вариант включал комплексное воздействие МИО и СК. Контролем служил вариант без обработки (без МИО и без СК).

В эксперименте 2011–2014 гг. с целью оздоровления от вирусов и повышения коэффициента размножения выращенные на модифицированной питательной среде Мурасиге и Скуга микрочеренки груши сорта Лада длиной 10 мм на этапе собственно микроразмножения обрабатывали с использованием прибора СМН-5 импульсами магнитной индукции с нарастающей частотой от 0,8 до 51,2 Гц с шагом 0,2 Гц на протяжении 10 мин. Контролем служил вариант без обработки (без МИО).

В эксперименте 2020–2022 гг. проводили сравнительную оценку эффективности оздоровления клонового

подвоя яблони 62-396 от вирусов на этапе микроразмножения по следующей схеме: контроль (без обработки), рибавирин (40 мг/л) + термотерапия (эталон), МИО (с нарастающей частотой от 0,8 до 51,2 Гц с шагом 0,2 Гц на протяжении 10 мин) + термотерапия, СК ( $3 \times 10^{-4}$  М) + термотерапия, СК + термотерапия + МИО. Термотерапию осуществляли в условиях климатостата КС-200 СПУ при температуре +38 °С на протяжении трех месяцев.

На этапе укоренения для улучшения ризогенеза микрочеренки груши сорта Лада и подвоя яблони 62-396 длиной 20 мм обрабатывали с использованием прибора СМН-5 импульсами магнитной индукции с нарастающей частотой от 0,8 до 51,2 Гц с шагом 0,2 Гц на протяжении 10 мин.

На этапе адаптации к нестерильным условиям высадки микрорастений подвоев яблони 62-396 и груши Загорьевский осуществляли в пластиковые контейнеры с торфо-песчаной смесью (соотношение торфа и песка 3:1 по объему) с последующим укрытием полиэтиленовой пленкой. Изучали последствие МИО, примененной на этапе укоренения, по вариантам: контроль (без обработки), МИО (с нарастающей частотой от 0,8 до 51,2 Гц с шагом 0,2 Гц на протяжении 10 мин).

Каждый вариант во всех опытах включал 24 экспланта на всех культурах, зараженных вирусами.

В состав питательной среды для размножения вводили макро- и микроэлементы по Мурасиге и Скугу, аскорбиновую кислоту (1 мг/л), тиамин, пиридоксин и никотиновую кислоту (по 0,5 мг/л), агар-агар (7 г/л), 6-бензиламинопури (1 мг/л), сахарозу (30 г/л). В состав питательной среды для укоренения вводили половинную концентрацию макро- и микроэлементов по Мурасиге и Скугу, аскорбиновую кислоту (1 мг/л), тиамин, пиридоксин и никотиновую кислоту (по 0,5 мг/л), агар-агар (7 г/л), индолмасляную кислоту (1 мг/л), сахарозу (15 г/л).

Тестирование микрорастений проводили методом сэндвич-варианта иммуноферментного анализа (ИФА) с использованием диагностических наборов Neogen (Великобритания) согласно действующей методике [16]. Результаты анализов регистрировали на планшетном фотометре «Stat Fax 2100» при длинах волн 405 и 630 нм. Индекс зараженности вирусом определяли как отношение экстинкции образца к экстинкции серонегативного контроля. При величине этого показателя 2,0 и более образец считали зараженным вирусом.

Учет вегетативных параметров у эксплантов проводили через 30 суток культивирования на среде для размножения (на этапе собственно размножения) или 30 суток культивирования на среде для укоренения. Зараженность вирусами определяли после двух пассажей культивирования на средах без противовирусных препаратов и МИО, приживаемость на этапе адаптации – через 2 месяца после высадки в нестерильные условия.

Статистическую обработку данных проводили в программе Statistica (версия 10). Статистическую значимость различий оценивали с использованием результатов дисперсионного анализа на 95 %-ном уровне значимости.

**Результаты и обсуждение.** В наших экспериментах салициловая кислота способствовала увеличению выхода свободных от вируса ACLSV эксплантов яблони, по сравнению с контролем, на 23,7%, МИО – на 73,9%. Выход свободных от вируса ASGV растений подвоя яблони 62-396 при использовании СК возрос, по сравнению с вариантом без обработки, на 11,8%. Поскольку вирус ASGV характеризуется более высокой термостойкостью, чем ACLSV [1], оздоровление от него в ряде случаев затруднительно. К тому же исследуемые экспланты подвоя яблони 62-396 характеризовались высоким индексом зараженности вирусом ASGV (3,0). Вероятно, такие при-

**Табл. 1. Выход свободных от вирусов экплантов подвоев семечковых культур *in vitro* в зависимости от использованных методов оздоровления (в среднем за 2011–2018 гг.), %**

| Вариант                  | Подвой яблони 62-396 |                   | Подвой груши Загорьевский |                   |
|--------------------------|----------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
|                          | ACLSV                | ASGV              | ASGV                      | ASPV              |
| Контроль (без обработки) | 11,5 <sup>a*</sup>   | 48,2 <sup>a</sup> | 35,0 <sup>a</sup>         | 21,1 <sup>a</sup> |
| МИО                      | 85,4 <sup>r</sup>    | 36,0 <sup>a</sup> | 61,56 <sup>a</sup>        | 60,0 <sup>b</sup> |
| СК (эталон)              | 35,2 <sup>c</sup>    | 60,0 <sup>b</sup> | 73,4 <sup>a</sup>         | 61,1 <sup>b</sup> |
| МИО + СК                 | 48,2 <sup>b</sup>    | 85,3 <sup>b</sup> | 52,2 <sup>b</sup>         | 57,2 <sup>b</sup> |

\*Здесь и в табл. 3 разные буквы согласно результатам теста Дункана показывают существенные различия между вариантами при 95 %-ном уровне значимости.

чины обусловили низкую эффективность магнитной обработки для оздоровления подвоя яблони 62-396 от этого вируса. Комплексное использование хемо- и магнитотерапии способствовало увеличению выхода свободных от вируса ASGV растений яблони на 37,1 %, по сравнению с контролем.

Культивирование экплантов подвоя груши Загорьевский на питательной среде с СК увеличило выход свободных от вирусов ASGV и ASPV растений соответственно в 2,1 и 2,9, раза, по сравнению с контролем. Магнитотерапия обеспечила близкие по эффективности с действием хемотерапии результаты.

**Табл. 2. Выход экплантов клонового подвоя яблони 62-396, свободных от изучаемых вирусов, в зависимости от метода оздоровления (в среднем за 2020–2022 гг.)**

| Вариант                           | Выход свободных от вирусов экплантов, %/индекс зараженности |          |          |                  |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------|----------|------------------|
|                                   | ACLSV                                                       | ASGV     | ArMV     | комплекс вирусов |
| Контроль (без обработки)          | 0,0/25,8                                                    | 0,0/9,8  | 0,0/2,5  | 0,0/-            |
| Рибавирин + термотерапия (эталон) | 100/1,3                                                     | 100/1,2  | 50,0/1,8 | 50,0/-           |
| МИО + термотерапия                | 100/1,3                                                     | 100/1,1  | 50,0/2,0 | 50,0/-           |
| СК + термотерапия                 | 100/1,6                                                     | 50,0/3,7 | 100/1,6  | 50,0/-           |
| СК + термотерапия + МИО           | 100/1,2                                                     | 100/1,2  | 50,0/1,6 | 50,0/-           |

В эксперименте 2011–2014 гг. применение магнитно-импульсной обработки способствовало оздоровлению от вирусов 43,7% экплантов груши сорта Лада. В контроле (без обработки) здоровые растения отсутствовали.

Результаты эксперимента по сравнительной оценке эффективности оздоровления клонового подвоя яблони 62-396 от вирусов с комплексным применением термотерапии и рибавирина как эталонного препарата, СК и МИО (2020–2022 гг.) показали, что выход экплантов, свободных от изучаемых вирусов, составлял 50 % и не зависел от метода оздоровления (табл. 2).

Самый низкий индекс зараженности вирусами (1,2 для ACLSV и ASGV, 1,6 – для ArMV) отмечен при комплексной терапии с применением СК, термо- и магнитотерапии. Использование рибавирина в условиях повышенной температуры обеспечивало хорошие результаты по оздоровлению от вирусов ACLSV и ASGV (100% выход свободных от вирусов растений с низкими индексами зараженности), однако для вируса ArMV отмечен относительно высокий индекс зараженности (1,8) при выходе 50 % экплантов свободных от этого вируса. При этом в исследованиях китайских ученых сочетание термотерапии (+36 °C) и рибавирина (25 мг/л) обеспечило выход 95 % экплантов яблони свободных от вирусов ACLSV, ASGV и ASPV [17].

При сочетании МИО с термотерапией также наблюдали высокий выход экплантов подвоя яблони, свободных от вирусов ACLSV и ASGV (100%), в то время как по вирусу ArMV величина этого показателя составила 50 %. Термотерапия экплантов подвоя яблони, культивировавшихся на питательной среде с салициловой

кислотой, приводила к значительному ингибированию вирусов ACLSV и ArMV (снижение индекса зараженности в 16,1 и 1,6 раза соответственно при выходе 100 % экплантов свободных от вирусов), но оказалась менее эффективной в отношении вируса ASGV (выход свободных от вируса экплантов 50 %).

Предположительный механизм действия МИО на вирусы связан с изменением изoeлектрической точки их белковых компонентов. Возможно, такая обработка приводит и к разрыхлению белковой оболочки вируса, что препятствует его успешной репликации или затрудняет проникновение дефектных вирусных частиц в клетки растений. МИО может активировать синтез фенольных соединений, что обуславливает неспецифическую устойчивость растений [1].

Конкурентными преимуществами МИО перед классическими методами оздоровления зараженных вирусами растений – хемотерапией и термотерапией – можно считать отсутствие фитотоксичности, более низкую стоимость, универсальность, высокий выход здоровых растений, возможность автоматизации процесса обработки, высокую комфортабельность использования и экологическую безопасность.

При использовании магнитно-импульсной обработки в ряде случаев активизируются ростовые процессы. В наших исследованиях она способствовала улучшению вегетативного развития на этапе размножения. В результате у экплантов клонового подвоя яблони отмечено увеличение числа побегов в 1,7 раза, груши сорта Лада – в 1,6 раза, по сравнению с контролем. Длина побегов под действием МИО увеличивалась в 1,5...2,9 раза в зависимости от культуры (табл. 3).

У обработанных импульсами магнитной индукции микропобегов изучаемых культур на этапе укоренения наблюдали значительную стимуляцию ризогенеза, увеличение числа и длины корней. Укореняемость побегов после МИО в зависимости от культуры возрастала в 2,0...3,3 раза, достигая у груши сорта Лада 100 %, у подвоя яблони – 93,3 %. Число корней в вариантах с МИО повышалось, по сравнению с необработанными побегами, в 2,2...2,7 раза, длина корней – в 3,1 раза.

Следует отметить, что на начальных этапах укоренения внесенная в питательную среду ИМК обычно ингибирует образование корней вследствие активного каллусогенеза [1]. МИО частично решает эту проблему, способствуя более раннему (на 5...15 дней) образованию и росту корней.

При посадке микрорастений в нестерильные условия МИО способствовала улучшению приживаемости подвоев яблони и груши на 8...13 %. Можно предположить, что она воздействует на растения как антистрессовый фактор, обеспечивая их лучшую адаптацию.

**Табл. 3. Вегетативные показатели развития экплантов различных культур на этапах пролиферации и ризогенеза в зависимости от действия магнитно-импульсной обработки (среднее за 2011–2018 гг.)**

| Культура, сорт        | Число побегов, шт. |                  | Число корней, шт. |                  |
|-----------------------|--------------------|------------------|-------------------|------------------|
|                       | контроль           | МИО              | контроль          | МИО              |
| Груша, Лада           | 1,2 <sup>a</sup>   | 1,9 <sup>b</sup> | 1,0 <sup>a</sup>  | 2,2 <sup>b</sup> |
| Подвой яблони, 62-396 | 2,5 <sup>a</sup>   | 4,3 <sup>b</sup> | 3,5 <sup>a</sup>  | 9,6 <sup>b</sup> |

**Выводы.** Наиболее эффективный метод оздоровления клонового подвоя яблони 62-396 от вируса ACLSV – магнитно-импульсная обработка или сочетание МИО с термотерапией, от вируса ASGV – комплексное применение МИО и салициловой кислоты или МИО и термотерапии, от вируса ArMV – комплексное применение салициловой кислоты и термотерапии. Наибольшую эф-

фективность оздоровления подвоя груши Загорьевский от вируса ASGV обеспечило использование салициловой кислоты, от вируса ASPV–МИО или салициловой кислоты. Использование салициловой кислоты в процессе хемотерапии позволило увеличить выход свободных от латентных вирусов эксплантов, по сравнению с вариантом без обработки, подвоев яблони на 11,8...23,7%, груши – на 38,4...40% в зависимости от вида вируса, груши сорта Лада – на 43,7%. На подвое яблони 62-396 магнитно-импульсная обработка обеспечивала значительное (на 73,9%) увеличение выхода свободных от вируса ACLSV растений яблони. Наиболее низкий индекс зараженности изучаемыми вирусами отмечен при комплексной терапии эксплантов подвоя яблони с применением СК, термо- и магнитотерапии. На подвое груши Загорьевский МИО способствовала повышению выхода безвирусных эксплантов, по сравнению с контролем, на 26,5...38,9%.

Магнитная обработка способствовала улучшению вегетативного развития эксплантов на этапе размножения – число побегов возрастало в 1,6...1,7 раза. На этапе укоренения у обработанных импульсами магнитной индукции микропобегов изученных культур наблюдали значительную стимуляцию ризогенеза (укореняемость возросла в 2,0...3,3 раза), увеличение числа (в 2,2...2,7 раза) и длины (в 3,1 раза) корней, по сравнению с вариантом без обработки. МИО способствовала улучшению приживаемости микрорастений при высадке в нестерильные условия на 8...13% в зависимости от культуры.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

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

#### Литература.

1. Современные методы оздоровления плодовых и ягодных культур от вредоносных вирусов / М. Т. Упадышев, И. М. Куликов, А. Д. Петрова и др. М.: ФГБНУ ВСТИСП; Саратов: Амирит; 2019. 168 с.
2. Распространенность вирусов косточковых культур в некоторых субъектах России и генетический анализ изолятов PNRSV / Ю. Н. Приходько, Т. С. Живаева, Ю. А. Шнейдер и др. // Садоводство и виноградарство. 2024. № 2. С. 39–46. doi: 10.31676/0235-2591-2024-2-39-46.
3. Упадышев М. Т., Метлицкая К. В., Петрова А. Д. Распространенность вирусных болезней плодовых и ягодных культур // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2017. № 44 (2). С. 5–16.
4. Приходько Ю. Н., Живаева Т. С., Шнейдер Ю. А. Скрининговые методы выявления комплекса штаммов вируса шарки слив (PPV) // Садоводство и виноградарство. 2019. № 1. С. 36–42. doi: 10.31676/0235-2591-2019-1-36-42.
5. Clever M., Stehr R. Ergebnisse einer Leistungsprüfung zwischen virusfreien und nicht virusfreien Kernobstsorten // Mitt. Obstbauversuchrings des Alten Landes. 1996. Vol. 51. No. 6. P. 236–247.
6. Упадышева Г. Ю., Упадышев М. Т., Походенко П. А. Зараженность клоновых подвоев косточковых культур вирусами и их влияние на эффективность размножения зеленым черенкованием // Плодоводство и виноградарство России. 2010. Т. XXIV (2). С. 127–131.
7. Lizarraga A., Ascasibar J., Gonzalez M. L. Fast and effective thermotherapy treatment for in vitro virus elimination in apple and pear trees // American Journal of Plant Sciences. 2017. Vol. 8. No. 10. P. 2474–2482. doi: 10.4236/ajps.2017.810168.
8. Упадышев М. Т., Макаров С. Н., Упадышева Г. Ю. Устойчивость яблони к высокотемпературному стрессу // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2024. № 1 (1). С. 89–99. doi: 10.26897/0021-342X-2024-1-89-99.
9. In vitro thermotherapy-based methods for plant virus eradication / M. R. Wang, Z. H. Cui, J. W. Li, et al. // Plant Methods. 2018. Vol. 14. Article 87. URL: <https://plant-methods.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13007-018-355-y> (дата обращения: 22.08.2024). doi: 10.1186/s13007-018-0355-y.
10. Anzucht von virusfreien Bäumen durch Wärmebehandlung und Faktoren, die den Erfolg der Virusfreimachung beeinflussen / X. L. Li, M. J. Li, J. Zhou, et al. // Erwerbs-Obstbau. 2020. 62. P. 257–264. doi: 10.1007/s10341-020-00480-3.
11. Hu G. J., Hong N., Wang G. P. Elimination of Apple Stem Pitting virus from in vitro-cultured pear by an antiviral agent combined with thermotherapy // Australas. Plant Pathol. 2018. Vol. 48. P. 115–118. doi: 10.1007/s13313-018-0606-4.
12. In vitro thermotherapy and thermo-chemotherapy approaches to eliminate some viruses in Pyrus communis L. cv. 'Natanz' / S. Karimpour, G. Davarynejad, A. M. Zaki, et al. // J. Agr. Sci. Tech. 2020. Vol. 22. No. 6. P. 1645–1653.
13. Chemotherapy of apple shoots in vitro as method of viruses eradication / N. Romadanova, A. Tolegen, T. Koken, et al. // International Journal of Biology and Chemistry. 2021. Vol. 14. No. 1. P. 48–55. doi: 10.26577/ijbch.2021.v14.i1.04.
14. Influence of Electromagnetic Fields on Seed Productivity / L. S. Shibryaeva, M. E. Chaplygin, E. V. Zhalnin, et al. // High Energy Chemistry. 2024. Vol. 58. No. 1. P. 1–15. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0018143924010156> (дата обращения: 22.08.2024). doi: 10.1134/S0018143924010156.
15. Окашев Н. А. Выбор режима обработки семян импульсным электрическим полем // Сельский механизатор. 2022. 5. С. 19–21.
16. Технология получения оздоровленного от вирусов посадочного материала плодовых и ягодных культур / сост. М. Т. Упадышев, К. В. Метлицкая, В. И. Донецких и др. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2013. 91 с.
17. Virus elimination from in vitro apple by thermotherapy combined with chemotherapy / G.-J. Hu, Y. Dong, Z. Zhang, et al. // Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC). 2015. Vol. 121. P. 435–443. doi: 10.1007/s11240-015-0714-6.

Поступила в редакцию 14.09.2024

После доработки 03.10.2024

Принята к публикации 22.10.2024

**ПОИСК ФИЗИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СРЕДИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ХИНОЛИНОВОГО РЯДА**

© 2024 г. Т. В. Вострикова<sup>1</sup>, кандидат биологических наук, Х. С. Шихалиев<sup>2</sup>, доктор химических наук, С. М. Медведева<sup>2</sup>, кандидат химических наук, Н. В. Столповская<sup>2</sup>, кандидат химических наук

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А. Л. Мазлумова,  
396030, Воронежская обл., Рамонский район, пос. ВНИИСС, 86  
E-mail: tanyavostric@rambler.ru

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет,  
394018, Воронеж, Университетская пл., 1  
E-mail: shikh1961@yandex.ru

В производство внедряют различные химические вещества, стимулирующие и ускоряющие развитие растений. Поэтому актуален поиск физиологически активных соединений (ФАС) и их эффективных концентраций. Цель исследований – изучение действия 6-гидрокси-2,2,4-триметил-1,2-тетрагидрохинолина, 6-гидрокси-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолина и их производных на рост рододендрона желтого (*Rhododendron luteum Sweet*) и сахарной свеклы (*Beta vulgaris L.*) для расширения спектра применения этих соединений. Работу выполняли в 2018 г. и в 2021 г. в Воронежской области. Исследуемые ФАС разделяли на тетрагидрохинолины – 6-гидрокси-2,2,4-триметил-1,2-тетрагидрохинолин (ФАС 1 и его производное (ФАС 3) и дигидрохинолины – 6-гидрокси-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолин (ФАС 2) и его производные (ФАС 4 и ФАС 5). Каждое соединение испытывали на рододендроне желтом в концентрациях 0,01, 0,05, 0,10 %. Семена сахарной свеклы обрабатывали 6-гидрокси-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолином в этих же концентрациях. Для *Rh. luteum* более эффективными были дигидрохинолины и в меньшей степени – тетрагидрохинолины. Увеличение высоты проростков *Rh. luteum* относительно контроля после обработки семян ФАС в разных концентрациях составило 18,2...54,5 %, высоты сеянцев – 3,0...61,2 %. Это свидетельствует о долговременном сохранении стимулирующего эффекта синтезированных органических веществ на рост рододендрона желтого. Во всех вариантах концентраций водных растворов 6-гидрокси-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолина отмечена стимуляция ростовых показателей сахарной свеклы после предпосевной обработки недражированных семян: длина листовая пластинки увеличивалась, по сравнению с контролем, на 5,5...11,7 %, ширина листовая пластинки – на 6,5...16,3 %, число листьев – на 7,7...20,5 %, длина листового черешка – на 14,8...20,3 %, выживаемость растений – на 7,5...11,5 %.

**SEARCH FOR PHYSIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS AMONG SYNTHESISED ORGANIC SUBSTANCES OF THE QUINOLINE SERIES**

T. V. Vostrikova<sup>1</sup>, Kh. S. Shikhaliev<sup>2</sup>, S. M. Medvedeva<sup>2</sup>, N. V. Stolpovskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar,  
396030, Voronezhskaya obl., Ramonskii r-n, pos. VNISS, 86  
E-mail: tanyavostric@rambler.ru

<sup>2</sup>Voronezh State University,  
394018, Voronezh, Universitetskaya pl., 1  
E-mail: shikh1961@yandex.ru

Various chemicals, growth regulators, stimulating and accelerating the development of plants are introduced into production. Therefore, the search for physiologically active compounds (FAS) and their effective concentrations is relevant. The aim of the work is to study the effect of 6-hydroxy-2,2,4-trimethyl-1,2-tetrahydroquinoline, 6-hydroxy-2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline and its derivatives on the growth of yellow rhododendron (*Rhododendron luteum Sweet*) and sugar beet (*Beta vulgaris L.*) to expand the range of application of compounds. The work was carried out in 2018 and in 2021 in the Voronezh region. The studied FAS were divided into tetrahydroquinolines: 6-hydroxy-2,2,4-trimethyl-1,2-tetrahydroquinoline (FAS 1), its derivative FAS 3; dihydroquinolines: 6-hydroxy-2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline (FAS 2) and its derivatives FAS 4 and FAS 5. Each compound was tested on rhododendron yellow in concentrations of 0.01, 0.05, 0.10 %. Sugar beet seeds were treated with 6-hydroxy-2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline at the same concentrations. For *Rh. luteum* dihydroquinolines are more effective and, to a lesser extent, tetrahydroquinolines. The increase in the height of *Rh. luteum* seedlings relative to the control after FAS seed treatment in different concentrations was 18.2...54.5 %, and the height of seedlings was 3.0...61.2 % relative to the control. This fact indicates the long-term preservation of the stimulating effect of synthesized organic substances on the growth of yellow rhododendron. In all variants of concentrations of aqueous solutions of 6-hydroxy-2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline, stimulation of sugar beet growth indicators after pre-sowing treatment of undrafted seeds was noted: the length of the leaf blade increased by 5.5...11.7 %, the width of the leaf blade – by 6.5...16.3 %, the number of leaves – by 7.7...20.5 %, the length of the leaf blade petiole – by 14.8...20.3 %, plant survival – by 7.5...11.5 %, relative to the control.

**Ключевые слова:** стимуляторы, ростовые показатели, синтезированные органические соединения, рододендрон желтый (*Rhododendron luteum Sweet*), сахарная свекла (*Beta vulgaris L.*).

**Keywords:** stimulants, growth traits, synthesized organic compounds, yellow rhododendron (*Rhododendron luteum Sweet*), sugar beet (*Beta vulgaris L.*).

Проявление адаптивного потенциала растений выражается в изменении их ростовой активности, роста и развития. В последние годы в производстве активно

используют различные химические вещества, стимулирующие и ускоряющие развитие растений. В связи с этим актуальны работы в направлении поиска физио-

логически активных соединений (ФАС) и выбора их эффективных концентраций.

Кроме того, важным для изучения вопросом остается долговременность воздействия ФАС и сохранение его эффекта на более поздних стадиях развития растений. Это касается поиска веществ для повышения устойчивости, увеличения адаптивного потенциала и защиты растений от абиотических и биотических стрессоров [1, 2]. Различные проявления биологической активности такими синтезированными химическими веществами, как 6-гидрокси-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолин, его производные и их гидрированные аналоги [3], а также соединениями ряда 1-алкил-2,2,4-триметил-6-аминокарботиол-1,2-дигидрохинолина в диапазоне концентраций 0,01...0,10%, применение которых обеспечило повышение ростовой активности рододендрона Ледебура и других видов рода *Rhododendron* L. [4], позволяют называть их физиологически активными.

При этом исследований в направлении поиска регуляторов роста для такой ценной технической культуры, как сахарная свекла, недостаточно. Использование адаптивных технологий помогает выращивать сельскохозяйственные культуры, в том числе сахарную свеклу, в неблагоприятных или экстремальных погодных условиях и получать при этом оптимальный урожай [5, 6, 7].

Рододендрон кавказский (*Rh. caucasicum* Pall), рододендрон желтый (*Rh. luteum* Sweet) и рододендрон японский (*Rh. japonicum* L.) – декоративные и лекарственные кустарники, которые широко используют в городском озеленении и на приусадебных участках [8, 9]. Благодаря высокой морозостойкости рододендрон желтый подходит для выращивания в умеренном климате, что делает его востребованной культурой в отечественном питомниководстве [8]. По морфологическим признакам листопадные виды – рододендроны желтый и японский – сходны. Использование определенных концентраций брассиностероидов оказывает влияние на изменчивость признаков «высота растения», «количество настоящих листьев», стимулирует рост и развитие, повышает жизнеспособность растений рододендрона японского в стрессовых условиях [8, 9]. Оценка возможности применения соединений хинолинового ряда в качестве стимуляторов роста для более широкого спектра сельскохозяйственных и декоративных культур, в сравнении с традиционными брассинолидами, весьма актуальна.

Цель исследований – изучение действия 6-гидрокси-2,2,4-триметил-1,2-тетрагидрохинолина, 6-гидрокси-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолина и их производных на показатели роста рододендрона желтого и сахарной свеклы для расширения спектра применения соединений.

**Методика.** Работу выполняли на базе ботанического сада им. проф. Б. М. Козо-Полянского Воронежского госуниверситета (в 2018 г.) и во Всероссийском научно-исследовательском институте сахарной свеклы и сахара им. А. Л. Мазлумова (в 2021 г.), расположенных в зоне Центрального Черноземья. Объектами исследований служили представители разных групп культурных растений. Рододендрон желтый выступал в качестве древесно-декоративного вида, сахарная свекла – как техническая культура. У листопадного кустарника родо-

дендрона желтого определяли высоту проростков и сеянцев, у сахарной свеклы – длину и ширину листа, длину черешка и число листьев, которое считают наиболее объективным признаком степени развития растения [3, 4]. Изучали влияние ФАС, синтезированных на кафедре органической химии Воронежского государственного университета.

Исследуемые физиологически активные соединения разделяли на следующие группы: тетрагидрохинолины – 6-гидрокси-2,2,4-триметил-1,2-тетрагидрохинолин (ФАС 1) и его производное (ФАС 3); дигидрохинолины – 6-гидрокси-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолин (ФАС 2) и его производные (ФАС 4 и ФАС 5). На рододендроне желтом испытывали все соединения в концентрациях 0,01, 0,05, 0,10%, на сахарной свекле – 6-гидрокси-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолин в этих же концентрациях.

Объектом обработки ФАС служили недрожжируемые семена *Rh. luteum* и *B. vulgaris* линии МС-2113. Перед проращиванием их замачивали в водных растворах ФАС с экспозицией 18 ч в трех повторностях по 100 семян. В качестве контроля использовали семена, замоченные в водопроводной воде и растворе стандартного стимулятора роста эпинбрасинолида (коммерческий препарат Эпин-экстра) в рабочей концентрации 0,05%. Семена *Rh. luteum* высевали в условиях защищенного грунта, а *B. vulgaris* – в открытом грунте. Полевые опыты закладывали согласно общепринятой методике [10]. Семена *Rh. luteum* помещали в ящики с верховым торфом (рН=4...5) поверхностно, накрывали стеклом и содержали при температуре 20...24 °С. Через 14 дней стекло убирали.

Высоту проростков *Rh. luteum* измеряли линейкой на 21-й день эксперимента, высоту сеянцев – через 7 мес. от начала эксперимента. Первый подсчет растений *B. vulgaris* проводили на 30-й день (ювенильное возрастное состояние), второй – на 60-й день эксперимента (имматурное возрастное состояние). Тогда же измеряли и подсчитывали листья в соответствие с ранее проведенными исследованиями по возрастному состоянию сахарной свеклы [11]. Выживаемость растений определяли как отношение числа растений на 60-й день эксперимента к их числу на 30-й день, выраженное в процентах.

Статистическую обработку данных выполняли с использованием пакета программ Stadia 7.0. Для сравнения результатов в контрольном и опытных вариантах использовали t-критерий Стьюдента, по показателям выживаемости – Z-аппроксимацию для критерия равенства частот. Влияние факторов «обработка ФАС» и «концентрация» оценивали по результатам непараметрического дисперсионного анализа.

**Результаты и обсуждение.** Высота проростков *Rh. luteum* во всех экспериментальных вариантах достоверно увеличивалась на 18,2...54,5%, тогда как традиционный стимулятор роста (коммерческий препарат Эпин-экстра) не оказывал на нее значительного влияния. По сравнению с контролем и вариантом обработки семян Эпином-экстра больше всего высоту проростков увеличивали соединения ФАС 2, 4 и 5 во всех испытанных концентрациях (табл. 1).

Табл. 1. Высота проростков *Rh. luteum* в зависимости от обработки ФАС, см\*

| Концентрация, % | Контроль  | Эпин-экстра | ФАС 1         | ФАС 2         | ФАС 3         | ФАС 4         | ФАС 5         |
|-----------------|-----------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                 | 1,10±0,03 | 1,20±0,02   |               |               |               |               |               |
| 0,01            |           |             | 1,30±0,03*1   | 1,40±0,02**2  | 1,30±0,02*1   | 1,40±0,02**2  | 1,50±0,04***3 |
| 0,05            |           |             | 1,40±0,02**2  | 1,50±0,02***3 | 1,40±0,03**2  | 1,50±0,03**2  | 1,60±0,03***3 |
| 0,10            |           |             | 1,50±0,03***3 | 1,60±0,03***3 | 1,50±0,03***3 | 1,60±0,03***3 | 1,70±0,04***3 |

\*Здесь и в табл. 2 и 3 различия с контролем достоверны при  $p<0,05$ ; \*\* – при  $p<0,01$ ; \*\*\* – при  $p<0,001$ ; 1 – различия с вариантом с обработкой Эпином-экстра достоверны при  $p<0,05$ ; 2 – при  $p<0,01$ ; 3 – при  $p<0,001$ .

Табл. 2. Высота сеянцев *Rh. luteum* в зависимости от обработки ФАС, см

| Концентрация, % | Контроль | Эпин-экстра | ФАС 1       | ФАС 2       | ФАС 3       | ФАС 4       | ФАС 5        |
|-----------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
|                 | 6,7±0,2  | 6,9±0,2     |             |             |             |             |              |
| 0,01            |          |             | 6,9±0,2*    | 7,6±0,1**2  | 6,8±0,2     | 6,8±0,2     | 7,7±0,2**2   |
| 0,05            |          |             | 7,8±0,2**2  | 7,9±0,2**2  | 7,0±0,2*1   | 7,1±0,2*1   | 8,9±0,3***3  |
| 0,10            |          |             | 8,4±0,2***3 | 9,4±0,2***3 | 8,3±0,2***3 | 9,5±0,2***3 | 10,8±0,3***3 |

ФАС 1 и 3 проявляли наибольшую активность в концентрации 0,1 %. В целом, на наш взгляд, более эффективными веществами на ранних этапах развития *Rh. luteum* можно считать дигидрохинолины, в меньшей степени – тетрагидрохинолины.

рами 6-гидроксиди-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолина на длину листа, длину черешка, число листьев, а также выживаемость растений относительно контроля и варианта обработки Эпин-экстра ( $p<0,05$ ;  $p<0,01$ ). При этом наиболее сильное увеличение параметров отмечено при

Табл. 3. Ростовые показатели сахарной свеклы в зависимости от обработки семян 6-гидроксиди-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолином

| Вариант (концентрация, %)                       | Длина листа, см | Ширина листа, см     | Число листьев, шт. | Длина черешка, см | Выживаемость, % |
|-------------------------------------------------|-----------------|----------------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| Контроль (вода)                                 | 12,8±0,1        | 9,2±0,1              | 11,7±0,1           | 10,8±0,1          | 80              |
| Эпин-экстра (0,05)                              | 12,9±0,1        | 9,7±0,1*             | 11,9±0,1           | 11,0±0,1          | 85*             |
| 6-гидроксиди-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолин: |                 |                      |                    |                   |                 |
| 0,01                                            | 14,3±0,1**2     | 10,7±0,1**2          | 14,1±0,1**2        | 13,0±0,1**2       | 92*1            |
| 0,05                                            | 13,7±0,2**2     | 9,8±0,2*             | 12,8±0,2**2        | 12,7±0,2**2       | 88*             |
| 0,10                                            | 13,5±0,2**2     | 8,9±0,2 <sup>1</sup> | 12,6±0,2*1         | 11,6±0,2*1        | 86*             |

Высота сеянцев под воздействием стандартного стимулятора роста (коммерческий препарат Эпин-экстра) оставалась примерно такой же, как в контрольном варианте, после обработки семян ФАС в разных концентрациях она повышалась на 3,0...61,2 %. Соединения ФАС 1, 2 и 5 существенно увеличивали высоту растений, по сравнению с контролем и вариантом обработки семян Эпином-экстра, во всех испытанных концентрациях (табл. 2).

ФАС 3 проявляло наибольшую активность в концентрации 0,1 %, как и при воздействии на проростки. Однако ФАС 1 было эффективно в концентрации 0,05 %, а ФАС 4 не проявило активность в концентрациях 0,01 и 0,05 %. Это свидетельствует о различии долговременного влияния обработки семян как тетрагидрохинолинами, так и дигидрохинолинами. Эффективной на более поздних этапах развития *Rh. luteum* можно считать обработку семян водными растворами дигидрохинолинов и в меньшей степени – тетрагидрохинолинов в концентрации 0,10 %. Особенно активны во всех испытанных концентрациях (0,01...0,10 %) были соединения 2 и 5. В целом можно отметить долговременное сохранение стимулирующего эффекта синтезированных органических веществ на рост исследуемого декоративного растения.

На сахарной свекле отмечено увеличение средней длины листа (на 0,6...1,5 см) и длины черешка (на 0,6...2,2 см), а также числа листьев (на 0,7...2,4 шт.) после обработки семян растворами 6-гидроксиди-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолина во всех концентрациях, по сравнению как с контролем ( $p<0,05$ ;  $p<0,01$ ), так и с коммерческим препаратом Эпин-экстра ( $p<0,05$ ;  $p<0,01$ ). Ширина листа достоверно увеличивалась в вариантах с обработкой семян 0,01 % и 0,05 % растворами на 0,1...1,5 см (табл. 3).

Ранее была установлена генетическая вариабельность количественных признаков сахарной свеклы и ее взаимосвязь с продуктивностью, основными показателями которой выступают длина, ширина листовой пластинки, длина листового черешка [12]. Перечисленные количественные признаки можно использовать в качестве маркерных при оценке генотипов и фенотипов, а также в исследованиях по изучению влияния различных соединений на рост сахарной свеклы в качестве тестеров. В наших исследованиях отмечено положительное влияние обработки недражированных семян сахарной свеклы водными раство-

наименьшей из испытанных концентраций растворов (0,01 %). Наибольшая из исследованных концентраций растворов оказывает эффективное влияние не на все ростовые показатели.

Самое значительное увеличение, по отношению к контролю, числа листьев (на 20,5 %) и длины черешка (на 20,3 %) отмечено после обработки семян 0,01 %-ным раствором. Наиболее сильное воздействие, по сравнению с другими изучаемыми признаками, во всех испытанных концентрациях 6-гидроксиди-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолин оказывает на изменение длины черешка (табл. 4).

Табл. 4. Увеличение ростовых показателей сахарной свеклы по отношению к контролю в зависимости от концентрации 6-гидроксиди-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолина при обработке семян, %

| Концентрация, % | Длина листа | Ширина листа | Число листьев | Длина черешка | Выживаемость растений |
|-----------------|-------------|--------------|---------------|---------------|-----------------------|
| 0,01            | 11,7        | 16,3         | 20,5          | 20,3          | 11,5                  |
| 0,05            | 7,0         | 6,5          | 9,4           | 17,6          | 10,0                  |
| 0,10            | 5,5         | —            | 7,7           | 14,8          | 7,5                   |

**Выводы.** Предпосевная обработка недражированных семян водными растворами 6-гидроксиди-2,2,4-триметил-1,2-дигидрохинолина в концентрации 0,01...0,10 % увеличивает выживаемость растений и ростовые показатели сахарной свеклы по отношению к контролю. Наиболее эффективна концентрация раствора 0,01 %.

Наибольшее влияние на ранних и более поздних этапах развития сеянцев *Rh. luteum* оказала обработка семян (в концентрации 0,05...0,10 %) дигидрохинолинами, в меньшей степени – тетрагидрохинолинами.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания вузам в сфере научной деятельности на 2023–2025 гг., проект № FZGU-2023-0009. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликтов интересов.

# Литература.

1. Взаимодействие сорта риса Кубояр с препаратом бензихол / П. И. Костылев, Ю. П. Калиевская, М. В. Тесля и др. // *Аграрный вестник Урала*. 2016. № 11 (153). С. 40–45.
2. Открытие 4-нитропиразолин-5-онов в качестве нового легкодоступного структурного класса фунгицидов для защиты растений / А. С. Будников, Е. Р. Лопатьева, И. Б. Крылов и др. // *Биосфера*. 2022. № 4. С. 276–279.
3. Synthesized organic compounds as growth stimulators for woody plants / T. V. Vostrikova, V. N. Kalaev, S. M. Medvedeva, et al. // *Periódico Tchê Química*. 2020. No. 17 (35). P. 327–337.
4. Use of new compounds of the quinoline series as effective stimulants of growth processes / T. V. Vostrikova, V. N. Kalaev, A. Yu. Potapov, et al. // *Periódico Tchê Química*. 2020. No. 17 (35). P. 781–790.
5. Черепухина И. В., Безлер Н. В., Колесникова М. В. Зависимость эффективности использования соломы зерновых культур с дополнительными компонентами от погодных условий года // *Агрохимия*. 2019. № 6. С. 64–71.
6. Колесникова М. В., Черепухина И. В., Безлер Н. В. Влияние целлюлозолитического микромицета *Humicola fuscoatra* ВНИИСС 016 на некоторые показатели плодородия почвы в посевах сахарной свеклы // *Агрохимия*. 2018. № 4. С. 18–26.
7. Climatic and agronomic impacts on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) production / S. O. Bastaubayeva, L. K. Tabynbayeva, R. S. Yezhebayeva, et al. // *Sabrao Journal of Breeding and Genetics*. 2022. No. 54 (1). P. 141–152.
8. Ладыженская О. В., Крючкова В. А., Донских В. Г. Влияние различных препаратов на всхожесть семян рододендрона кавказского (*Rhododendron caucasicum* Pall) и рододендрона желтого (*Rhododendron luteum* Sweet) // *АгроЭкоИнфо*. 2022. № 3. URL: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/3/st\\_329.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/3/st_329.pdf) (дата обращения: 12. 09. 2024).
9. Стимуляция роста и развития растений *Rhododendron japonicum* L. in vivo при использовании брассиностероидов / О. А. Кудряшова, А. А. Волоотович, Т. В. Герасимович и др. // *Вестник Полесского государственного университета. Серия природоведческих наук*. 2011. № 1. С. 14–21.
10. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
11. Репродуктивная биология сахарной свеклы / Т. П. Жужжалова, В. В. Знаменская, О. А. Подвигина и др. Воронеж: Сотрудничество, 2006. 232 с.
12. Изатулаева В. И. Изучение генетического разнообразия генотипов сахарной свеклы на основе биоморфологических признаков // *Сахарная свекла*. 2013. № 5. С. 39–41.

Поступила в редакцию 26.06.2024

После доработки 20.08.2024

Принята к публикации 05.11.2024

## Зоотехния и ветеринария

УДК 575.174.015.3

DOI 10.31857/S2500262724060095 EDN RUTANH

ПОЛИМОРФИЗМ ГЕНА  $\beta$ -КАЗЕИНА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА МОЛОЧНУЮ ПРОДУКТИВНОСТЬ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА© 2024 г. О. С. Шаталина, старший научный сотрудник, кандидат биологических наук,  
А. А. Ярышкин, научный сотрудник, кандидат биологических наукУральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук  
620061, Екатеринбург, пос. Исток, ул. Главная, 21  
E-mail: shatalinao@list.ru

$\beta$ -казеин – это белок, состоящий из цепочки 224 аминокислот, на долю которого приходится около 30 % от всех молочных белков. Существует два основных аллеля гена  $\beta$ -казеина: A1 и A2. Вариант A1 отличается от A2 всего одной аминокислотой. Выявлена ассоциация между носительством генотипа A2A2  $\beta$ -казеина у коров и отсутствием аллергии на молоко у потребляющих его людей, а также влияние полиморфизма гена  $\beta$ -казеина на показатели молока, необходимые для сыроделия. Цель исследования – изучение полиморфизма гена  $\beta$ -казеина у коров голштинской породы Свердловской области в 2023 г. на 221 особи крупного рогатого скота голштинской породы. Генотипирование ДНК животных по гену  $\beta$ -казеина осуществляли на приборе 7500 Real Time PCR System (Applied Biosystem) с использованием программы 7500 Software V.2.0.1. Данные по молочной продуктивности коров взяты из программы ИАС «СЕЛЭКС» – Молочный скот. Частота встречаемости генотипа A1A1 в исследованном поголовье составила 15,4 %, A1A2 – 42,5 %, A2A2 – 42,1 %, аллеля A1 – 36,7 %, A2 – 63,3 %. Удой за 305 дней первой лактации носительниц генотипа A1A1 был равен 11 697 кг, A1A2 – 11 639 кг, A2A2 – 11 378 кг. Массовая доля жира в молоке у коров с генотипом A1A1 – 3,65 %, A1A2 – 3,73 %, A2A2 – 3,69 %. Существенных различий между показателями по удою и массовой доле жира между носительницами разных генотипов  $\beta$ -казеина не установлено. Массовая доля белка в молоке у коров с генотипом A2A2 составила 3,16 %, что на 0,02 % ( $p \leq 0,05$ ) больше, чем у носительниц генотипа A1A2, и на 0,09 % ( $p \leq 0,001$ ), по сравнению с особями с генотипом A1A1.

POLYMORPHISM OF THE  $\beta$ -CASEIN GENE AND ITS EFFECT ON THE DAIRY PRODUCTIVITY OF CATTLE THE URAL REGION

O. S. Shatalina, A. A. Yaryshkin

Ural Federal Agrarian Scientific Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,  
620061, Yekaterinburg, pos. Istok, ul. Glavnay, 21  
E-mail: shatalinao@list.ru

$\beta$ -casein is a protein consisting of a chain of 224 amino acids, which accounts for about 30 % of all milk proteins. There are two main alleles of the  $\beta$ -casein gene: A1 and A2. Variant A1 differs from A2 by only one amino acid. Researchers have revealed an association between the carrier of the A2A2  $\beta$ -casein genotype in cows and the absence of milk allergy in people who consume it, as well as the effect of the  $\beta$ -casein gene polymorphism on milk parameters necessary for cheese making. The aim of the study was to study the polymorphism of the  $\beta$ -casein gene in Holstein cows of the Sverdlovsk region and its effect on milk productivity. The work was carried out in 2023 on 221 individuals of Holstein cattle belonging to a breeding agricultural organization in the Sverdlovsk region. The genotyping of animal DNA by the  $\beta$ -casein gene was carried out using the 7500 Real Time PCR System (Applied Biosystem) device using the 7500 Software V.2.0.1 program. Data on dairy productivity of cows were taken from the IAS «SELEX» program – Dairy cattle. The frequency of occurrence of the A1A1 genotype was 15.4 %, the A1A2 genotype was 42.5 % and the A2A2 genotype was 42.1 %. The frequency of the A1 allele was 36.7 %, the A2 allele was 63.3 %. Milk yield for 305 days of the first lactation of carriers of the A1A1 genotype was 11697 kg, A1A2 – 11639 kg, A2A2 – 11378 kg. The mass fraction of fat in cows with the A1A1 genotype is 3.65 %, A1A2 is 3.73 %, and A2A2 is 3.69 %. There was no significant difference between the indicators of milk yield and fat mass fraction between carriers of different beta-casein genotypes. The mass fraction of protein in cows with the A2A2 genotype was 3.16 %, which is 0.02 % ( $p < 0.05$ ) more carriers of the A1A2 genotype and 0.09 % ( $p < 0.001$ ) more carriers of the A1A1 genotype.

**Ключевые слова:** крупный рогатый скот,  $\beta$ -казеин, генотип, удой, массовая доля жира, массовая доля белка.

**Keywords:** cattle,  $\beta$ -casein, genotype, milk yield, mass fraction of fat, mass fraction of protein.

Маркерная селекция в последние годы набирает широкое распространение в животноводстве. Определение генофонда животных в раннем возрасте и последующий отбор молодняка с лучшими генотипами несут значительные перспективы для селекции и формирования стад крупного рогатого скота [1]. В молочном скотоводстве ежегодно выявляются новые гены-кандидаты – маркеры молочной продуктивности, воспроизводства, здоровья [2].

Более 95 % белков коровьего молока состоят из казеина и сывороточных белков. Среди казеинов второй

по частоте встречаемости в молоке – бета-казеин. На его долю приходится до 45 % от общего количества казеинов. Этот белок отличается от  $\alpha$ -казеина сильной зависимостью от температуры, а также растворимостью в присутствии ионов кальция при определенной температуре.  $\beta$ -казеин включает 209 аминокислотных остатков, из которых 16,7 % приходится на пролин, равномерно распределенный вдоль полипептида, что ограничивает образование  $\alpha$ -спирали. Распознано 12 генетических вариантов, которые по-разному выделя-

ются с помощью электрофореза, в зависимости от того используются кислотные или щелочные условия [3]. Варианты A1 и A2 встречаются наиболее часто. Варианты A можно отличить от B, C и D с помощью электрофореза: B, C и D определяются в щелочных условиях, A могут быть отделены только в кислых условиях. Варианты A1 и A2  $\beta$ -казеина различаются заменой в гене, благодаря которой A1 содержит аминокислоту гистидин в 67-й позиции, а A2 – пролин [4].

Согласно результатам исследования генетической структуры различных пород крупного рогатого скота по гену  $\beta$ -казеина и его связи с хозяйственно-полезными признаками показатель РТАМ (прогнозируемая передающая способность по молочной продуктивности – прогноз среднего показателя молочной продуктивности дочерей быка сверх или ниже уровня генетической базы породы на каждый период лактации) выше у быков с генотипом A2A2 [5].  $\beta$ -казеин A2A2 способствует усиленной выработке глутатиона у людей [6]. Молоко, полученное от коров с генотипом A2A2, менее аллергенно, и его употребление способствует сокращению количества случаев некоторых заболеваний [7].

Цель исследования – изучение полиморфизма гена  $\beta$ -казеина у коров голштинской породы Свердловской области и его влияния на показатели молочной продуктивности для ведения дальнейшей селекции.

**Методика.** Исследования проводили в 2023 г. на 221 особи крупного рогатого скота голштинской породы 2015–2020 гг. рождения. Коровы происходили от 49 отцов – выдающихся быков-производителей. Количество дочерей одного быка варьировало от одной до шестнадцати. Животные принадлежали племенной сельскохозяйственной организации в Свердловской области. Выделение ДНК осуществляли с использованием наборов ООО «Синтол» согласно методике изготовителя. Генотипирование ДНК животных по гену  $\beta$ -казеина проводили на приборе 7500 Real Time PCR System (Applied Biosystem) с использованием программ 7500 Software V.2.0.1.

Состав микса для проведения ПЦР на одну пробу: буфер – 1,08 мкл, dNTP – 0,31 мкл, CSN2 RT F – 0,63 мкл, CSN2 RT R – 0,63 мкл, CSN2 RT P1 – 0,35 мкл, CSN2 RT P2 – 0,35 мкл, MgCl<sub>2</sub> – 0,2 мкл, Taq-полимераза – 0,25 мкл, деионизированная вода – 3,6 мкл. Микс разносили по 7,1 мкл + 3 мкл ДНК.

Время RealTime ПЦР 2 мин – 95 °C; 11 циклов 95 °C – 30 с, 60 °C – 1 мин, 72 °C – 30 с; 27 циклов с детекцией 95 °C – 30 с, 60 °C – 1 мин, 72 °C – 30 с.

Данные по молочной продуктивности коров брали из программы ИАС «СЕЛЭКС» – Молочный скот. Частоту встречаемости генотипов гена  $\beta$ -казеина рассчитывали по формулам Р. Фишера. Частоту аллелей определяли по формуле:

$$A1 = 2A1A1 + A1A2 / 2N, A2 = 2A2A2 + A1A2 / 2N,$$

где A1 и A2 – частоты встречаемости соответствующих аллелей; A1A1, A1A2, A2A2 – количество особей с соответствующими генотипами; N – общее число особей.

В процессе селекции происходит общее увеличение молочной продуктивности коров. Поэтому животные, рожденные позже, характеризуются более высокими показателями. Для демонстрации влияния генотипа коровы были разделены по годам рождения. Анализ показателей молочной продуктивности в зависимости от происхождения проводили на основе данных по потомству трех быков-производителей с наибольшим количеством дочерей в выборке.

Биометрическую обработку данных проводили с использованием программы Microsoft Excel. Достоверность различий определяли с использованием критерия Стьюдента, уровни значимости:  $p \leq 0,05$ ,  $p \leq 0,01$  и  $p \leq 0,001$ .

**Результаты и обсуждение.** Частота встречаемости генотипа A1A1 в исследуемой выборке коров составила 15,4 %, A1A2 – 42,5 %, A2A2 – 42,1 %. Генотип A1A1 у исследованных животных встречался реже, чем остальные, а распространение генотипов  $\beta$ -казеина A1A2 и A2A2 было практически одинаковым (разница 0,4 %). Частота аллеля A1 составила 36,7 %, аллеля A2 – 63,3 %. Аллель A2 получил большее распространение в этой выборке крупного рогатого скота голштинской породы.

**Табл. 1. Динамика частоты встречаемости генотипов  $\beta$ -казеина**

| Год рождения (количество) | Генотип | Частота встречаемости, % |
|---------------------------|---------|--------------------------|
| 2016 (n=11)               | A1A1    | 9,2                      |
|                           | A1A2    | 45,4                     |
|                           | A2A2    | 45,4                     |
| 2017 (n=34)               | A1A1    | 6,0                      |
|                           | A1A2    | 47,0                     |
|                           | A2A2    | 47,0                     |
| 2018 (n=60)               | A1A1    | 21,6                     |
|                           | A1A2    | 43,4                     |
|                           | A2A2    | 35,0                     |
| 2019 (n=77)               | A1A1    | 14,4                     |
|                           | A1A2    | 42,8                     |
|                           | A2A2    | 42,8                     |
| 2020 (n=36)               | A1A1    | 19,5                     |
|                           | A1A2    | 33,3                     |
|                           | A2A2    | 47,2                     |

Определение встречаемости генотипов  $\beta$ -казеина коров с учетом их года рождения свидетельствует об отсутствии какой-либо значительной динамики (табл. 2). Генотип A1A1 неизменно остается наименее распространенным, а A1A2 и A2A2 встречаются примерно с одинаковой частотой в интервале от 33 до 47,2 %.

**Табл. 2. Влияние генотипов  $\beta$ -казеина на показатели молочной продуктивности коров за первую лактацию (n=201, X  $\pm$  Sx)**

| Генотип | n  | Удой, кг        | МДЖ, %          | МДБ, %          |
|---------|----|-----------------|-----------------|-----------------|
| A1A1    | 31 | 11697 $\pm$ 390 | 3,65 $\pm$ 0,03 | 3,07 $\pm$ 0,01 |
| A1A2    | 87 | 11639 $\pm$ 162 | 3,73 $\pm$ 0,02 | 3,14 $\pm$ 0,01 |
| A2A2    | 83 | 11378 $\pm$ 168 | 3,69 $\pm$ 0,03 | 3,16 $\pm$ 0,01 |

Популяции разных пород крупного рогатого скота отличаются по генетической структуре гена  $\beta$ -казеина. Так, в холмогорской породе крупного рогатого скота Республики Коми также преобладает аллель A2 с частотой встречаемости 41...59 % и генотип A1A2 с частотой 45 % [6]. У холмогорского скота Архангельской области установлено уменьшение количества животных с генотипом A1A2 и преобладание особей с генотипом A1A1 [7]. В красно-пестрой породе крупного рогатого скота племенных хозяйств Красноярского края (n=70) также наиболее распространен аллель A2 [8].

**Табл. 3. Динамика показателей молочной продуктивности коров за 305 дней 1-й лактации (X  $\pm$  Sx)**

| Год рождения | Генотип     | Удой, кг         | МДЖ, %          | МДБ, %          |
|--------------|-------------|------------------|-----------------|-----------------|
| 2017 (n=34)  | A1A1 (n=2)  | 11929 $\pm$ 2463 | 3,87 $\pm$ 0,17 | 3,18 $\pm$ 0,03 |
|              | A1A2 (n=16) | 11129 $\pm$ 332  | 3,89 $\pm$ 0,05 | 3,21 $\pm$ 0,01 |
|              | A2A2 (n=16) | 11302 $\pm$ 361  | 3,86 $\pm$ 0,06 | 3,23 $\pm$ 0,03 |
| 2018 (n=60)  | A1A1 (n=13) | 10876 $\pm$ 390  | 3,65 $\pm$ 0,02 | 3,07 $\pm$ 0,03 |
|              | A1A2 (n=26) | 11441 $\pm$ 295  | 3,67 $\pm$ 0,03 | 3,09 $\pm$ 0,02 |
|              | A2A2 (n=21) | 11358 $\pm$ 332  | 3,73 $\pm$ 0,05 | 3,12 $\pm$ 0,02 |
| 2019 (n=77)  | A1A1 (n=11) | 12091 $\pm$ 647  | 3,61 $\pm$ 0,07 | 3,08 $\pm$ 0,02 |
|              | A1A2 (n=33) | 12308 $\pm$ 273  | 3,62 $\pm$ 0,03 | 3,15 $\pm$ 0,01 |
|              | A2A2 (n=33) | 11401 $\pm$ 290  | 3,57 $\pm$ 0,04 | 3,17 $\pm$ 0,01 |

Табл. 4. Молочная продуктивность коров от различных отцов

| Бык-производитель<br>(число дочерей) | Генотип по $\beta$ -казеину | Частота встречаемости, % | Удой, кг   | МДЖ, %    | МДБ, %     |
|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------|-----------|------------|
| Аардема Маджист                      | A1A2 (n=3)                  | 23,1                     | 13140±1147 | 3,67±0,03 | 3,10±0,03  |
| 3129037660 (n=13)                    | A2A2 (n=10)                 | 76,9                     | 12204±620  | 3,59±0,08 | 3,18±0,02  |
| Трой 71753166 (n=16)                 | A1A1 (n=3)                  | 18,7                     | 11174±1236 | 3,67±0,05 | 3,12±0,05  |
|                                      | A1A2 (n=9)                  | 56,3                     | 11017±305  | 3,69±0,11 | 3,12±0,04  |
|                                      | A2A2 (n=4)                  | 25,0                     | 11908±880  | 3,66±0,08 | 3,15±0,05  |
| Мэнни 74307908 (n=16)                | A1A1 (n=3)                  | 18,7                     | 11853±589  | 3,65±0,12 | 3,03±0,08  |
|                                      | A1A2 (n=9)                  | 56,3                     | 11414±663  | 3,56±0,09 | 3,15±0,02* |
|                                      | A2A2 (n=4)                  | 25,0                     | 10087±1215 | 3,73±0,10 | 3,16±0,06  |

Изучение связи между полиморфизмом по гену  $\beta$ -казеина и молочной продуктивностью животных за 305 дней первой лактации коров показало, что удой у носительниц генотипа A1A1 составил 11 697 кг, A1A2 – 11 639 кг, A2A2 – 11 378 кг (табл. 3). Разница по величине этого показателя была равна 58...319 кг. Массовая доля жира у коров с генотипом A1A1 – 3,65 %, A1A2 – 3,73 %, A2A2 – 3,69 %, разница составила 0,04...0,08 %. Существенных различий между величинами показателей удоя и массовой доли жира между носительницами разных генотипов  $\beta$ -казеина не установлено. Некоторые авторы отмечают аналогичные результаты по удою [8], в то же время в других исследованиях установлены высокие показатели молочной продуктивности коров черно-пестрой породы с генотипом A2A2 [9].

Массовая доля белка у коров с генотипом A2A2 была равна 3,16 %, что на 0,02 % ( $p \leq 0,05$ ) больше, чем у животных с генотипом A1A2, и на 0,09 % ( $p \leq 0,001$ ), по сравнению с особями с генотипом A1A1. Выявленная связь генотипа A2A2 с повышенным содержанием белка в молоке согласуется с данными других исследований [8].

С каждым последующим годом рождения отмечено уменьшение содержание жира в молоке на 0,01...0,29 %. Также с течением времени наблюдается незначительное увеличение удоев на 50...300 кг. Отсутствие динамики изменения содержания белка в молоке позволяет предположить, что повышенная массовая доля белка связана с носительством коровами генотипа A2A2, а не со сроком их рождения. В группах животных каждого года рождения массовая доля белка в молоке коров – носительниц генотипа A2A2 на 0,05...0,09 % выше, чем у сверстниц ( $p \leq 0,05$ ...0,001).

Содержание белка в молоке дочерей всех 3 быков-производителей, потомство которых было наиболее широко представлено в выборке, с генотипом A2A2 превышало величину этого показателя у коров аналогичного происхождения с другим генотипом на 0,03...0,13 %. Большинство дочерей быка Аардема Маджист 3129037660 в изученной выборке имело генотип A2A2, Трой 71753166 и Мэнни 74307908 – A1A2. Это дает возможность предположить, что быки Трой 71753166 и Мэнни 74307908 – носители генотипа A1A2 по гену  $\beta$ -казеина, а Аардема Маджист 3129037660 обладает ценным генотипом A2A2.

**Выводы.** Аллель A2 гена  $\beta$ -казеина имеет наибольшее распространение (63,3 %) среди животных голштинской породы в Свердловской области. Генотип A1A1 встречается реже (15,4 %), генотипы A1A2 и A2A2 распространены практически одинаково. Ген  $\beta$ -казеин оказывает влияние на массовую долю белка в молоке коров. Коровы-носительницы генотипа A2A2 и аллеля A2 – наиболее желательны для селекции крупного рогатого скота, так как этот генотип связан с высоким содержанием белка в молоке, что делает его наиболее пригодным для производства сыра. Разница между носительницами генотипа A2A2 и сверстницами по мас-

совой доле белка в молоке составляет 0,05...0,09 % ( $p \leq 0,05$ ...0,001).

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Источником финансирования являлось выполнение государственного задания по теме: «Изучить селекционно-генетические характеристики крупного рогатого скота Уральского региона с использованием биотехнологических методов в целях создания новых селекционных форм животных, обладающих высоким генетическим потенциалом молочной продуктивности, качества молока и продолжительности хозяйственного использования».

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с использованием животных в качестве объектов.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### БЛАГОДАРНОСТИ.

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела животноводства и генетических исследований Уральского НИИСХ – филиала ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН за помощь в подборе методики и подготовке проб ДНК.

#### Литература.

1. Полиморфизм гена лептина у коров молочного направления продуктивности / Л. Н. Чижова, Л. В. Кононова, Г. Н. Шарко, Г. П. Ковалева // Сборник научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства. Михайловск. 2017. Т. 2. № 10. С. 113–117.
2. Характеристика биологической эффективности и полноценности молочной продуктивности голштинских коров-первотелок с разными генотипами лептина (LEP) / Н. Ю. Сафина // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 4. С. 131–133.
3. Молекулярно-генетические модификации К-казеина / А. Г. Кручинин, С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова и др. // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2020. № 4 (376). С. 12–16. doi: 10.26297/0579-3009.2020.4.3.
4. Beta-Casein – an overview | Science Direct Topics URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/food-science/beta-casein> (дата обращения: 28.09.2023).
5. Новые сочетания аллелей в вариантах генов казеинового кластера крупного рогатого скота и ревизия их номенклатуры / С. Б. Кузнецов, Е. В. Солоднева, М. Т. Семина и др. // Генетика. 2022. Т. 58. № 8. С. 889–901. doi: 10.31857/S0016675822080057.
6. Токарчук Т. А., Кожевникова И. С., Кудрина М. А.  $\beta$ -казеин *Bos taurus*: структура белка, полиморфизм гена, влияние на желудочно-кишечный тракт человека (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2023. Т. 58. № 4. С. 598–608. doi: 10.15389/agrobiology.2023.4.598rus.

7. Рыбалова Т. И. A2 против A1 // Молочная промышленность. 2018. № 5. С. 50–52.
8. Худякова Н. А., Кудрина М. А., Ступина А. О. Частота встречаемости генотипов молочных белков у коров холмогорской породы // Молочная промышленность. 2022. № 12. С. 45–47. doi: 10.31515/1019-8946-2022-12-45-47.
9. Ассоциация генотипов коров холмогорской породы по бета-казеину с молочной продуктивностью / Е. В. Парыгина, Н. А. Худякова, О. В. Тулинова и др. // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022. Т. 23. № 6. С. 877–883. doi: 10.30766/2072-9081.2022.23.6.877-883.
10. Молочная продуктивность коров красно-пестрой породы с разными генотипами бета-казеина / Л. А. Калашикова, Я. А. Хабибрахманова, А. И. Голубков и др. // Молочное и мясное скотоводство. 2022. № 2. С. 21–24. doi: 10.33943/MMS.2022.82.31.005.
11. Парамонова М. А. Влияние полиморфизма гена молочного белка CSN2 на продуктивные качества скота черно-пестрой породы // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 5 (103). С. 300–305. doi: 10.37670/2073-0853-2023-103-5-300-305.

Поступила в редакцию 18.03.2024

После доработки 01.08.2024

Принята к публикации 22.10.2024

## ИЗМЕНЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЭКСПРЕССИИ ГЕНОВ *TRPM2* И *RYR2* В ПЕРИОД СОЗРЕВАНИЯ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ ЦЫПЛЯТ КАК РЕЗУЛЬТАТ ДОЗИРОВАННОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД РАННЕГО ЭМБРИОГЕНЕЗА

© 2024 г. **Е. С. Федорова**, кандидат биологических наук, **Е. Г. Чугунова**,  
**М. В. Позовникова**, кандидат биологических наук

Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных – филиал Федерального исследовательского центра животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста, 196601, Санкт-Петербург, Пушкин, Московское ш., 55а  
E-mail: pozovnikova@gmail.com

Исследования проводили с целью оценки вовлеченности генов-кандидатов *TRPM2* и *RYR2*, предположительно связанных с высокими адаптационными способностями кур в раннем онтогенезе, в процессы терморегуляции и термоадаптации в условиях гипотермического стресса. Работу проводили на курах генотипных пород русская белоснежная (отсеlectionированной на терморезистентность молодняка в условиях низких температур) и амрокс (селекция на терморезистентность не проводили). Для «перепрограммирования» адаптационных паттернов регуляторных характеристик системы температурного гомеостаза применяли дозированное низкотемпературное воздействие (+14...+16 °C, 6 ч) в чувствительный период раннего эмбриогенеза (5-е сутки инкубации). У суточных цыплят оценивали изменение ориентации обменных процессов, а у 14-суточных дополнительно – изменение уровня адаптационных способностей организма после воздействия низкотемпературного стресс-фактора (+7 °C, 1 ч) в сравнении с контрольными группами, не подвергавшимися охлаждению. Относительную экспрессию генов *TRPM2* и *RYR2* в образцах тканей эмбрионов и цыплят определяли методом ПЦР. Для 14-суточных цыплят русской белоснежной породы сила воздействия абиотического стресс-фактора, вероятно, была недостаточной для того, чтобы вызвать серьезные перестройки в обменных процессах организма. Однократное дозированное охлаждение эмбрионов породы амрокс привело к изменениям нормы реакции организма цыплят опытной группы, которые сохранились до 14-суточного возраста. Цыплята этой группы лучше адаптированы к холодовому стрессу, в качестве энергетического субстрата используют преимущественно липиды и белки, для поддержания температуры тела задействуют механизмы нескратительного термогенеза в мышцах. Это подтверждают различия в паттернах экспрессии генов *RYR2* и *TRPM2*, уровень относительной экспрессии которых в грудной мышце цыплят опытных групп выше, чем в контроле (для цыплят амрокс в 2,5 раза). Дозированное однократное низкотемпературное воздействие в чувствительный период раннего эмбриогенеза может способствовать повышению адаптационных способностей организма цыплят до 14-суточного возраста в условиях гипотермического стресса.

## CHANGES IN THE EXPRESSION PROFILE OF *TRPM2* AND *RYR2* GENES DURING THE MATURATION OF THE CHICK THERMOREGULATION SYSTEM AS A RESULT OF DOSED LOW-TEMPERATURE EXPOSURE DURING THE SENSITIVE PERIOD OF EARLY EMBRYOGENESIS

**E. S. Fedorova, E. G. Chugunova, M. V. Pozovnikova**

Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding –  
Branch of the L. K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry,  
196601, Sankt-Peterburg, Pushkin, Moskovskoe sh., 55a  
E-mail: pozovnikova@gmail.com

The studies were conducted to assess the involvement of candidate genes *TRPM2* and *RYR2*, presumably associated with high adaptive abilities of chickens in early ontogenesis, in the processes of thermoregulation and thermal adaptation under hypothermic stress. The work was carried out on chickens of the Russian Snow-White gene pool breed (isolated for thermal resistance of chicks at low temperatures) and Amrox (selection for thermal resistance was not carried out). To «reprogram» the adaptive patterns of the regulatory characteristics of the temperature homeostasis system, dosed low-temperature exposure (+14...+16 °C, 6 h) was used during the sensitive period of early embryogenesis (day 5 of incubation). In day-old chicks, a change in the orientation of metabolic processes was evaluated, and in 14-day-old chicks, additionally, a change in the level of adaptive abilities after exposure to a low-temperature stress factor (+7 °C, 1 hour) in a comparative aspect (experimental groups vs control groups that were not cooled). The relative expression of the *TRPM2* and *RYR2* genes in tissue samples of embryos and chicks was determined by PCR. For 14-day-old chicks of the Russian Snow-White breed, the strength of the impact of the abiotic stress factor was probably insufficient to cause serious changes in the metabolic processes of the body. A single dosed cooling of Amrox embryos led to changes in the body reaction rate of the chicks of the experimental group, which survived until the age of 14 days. Chicks of this group are better adapted to cold stress, lipids and proteins are mainly used as an energy substrate and the mechanisms of non-shivering thermogenesis in muscles are used to maintain body temperature. This is confirmed by differences in the expression patterns of the *RYR2* and *TRPM2* genes, the level of relative expression of which in the pectoral muscle of chicks of the experimental groups is higher than in the control (in Amrox chicks by 2.5 times). Dosed single low-temperature exposure during the sensitive period of early embryogenesis can help to increase the adaptive abilities of the body of chicks up to 14 days of age in conditions of hypothermic stress.

**Ключевые слова:** куры, эмбрион, терморезистентность, абиотический фактор, экспрессия генов.

**Keywords:** chickens, embryo, thermoresistance, abiotic factor, gene expression

Терморегуляция – это физиологический процесс, позволяющий поддерживать постоянную температуру тела в условиях непостоянной температуры внешней среды посредством регулирования процессов теплоотдачи и теплообразования.

Изучение особенностей биологического развития эмбриона птиц (в частности, кур) под влиянием абиотических факторов, например высокой или низкой температуры, – удобная модель исследования его адаптационных возможностей, поскольку эмбрион развивается вне тела матери, а также поддается «перепрограммированию» под влиянием внешних факторов, воздействующих в период эмбриогенеза. Так, широко исследовано улучшение термотолерантности цыплят к жаре в более позднем возрасте посредством предоставления развивающемуся эмбриону тепловых стимулов во время инкубации. В литературе достаточно много информации о влиянии повышенного температурного фона инкубации яиц на приобретение термотолерантности у кур, в частности, цыплят-бройлеров, на развитие продуктивных и адаптивных признаков в условиях жаркого климата [1, 2, 3]. Улучшенная термоустойчивость цыплят была достигнута путем использования повышенных температур инкубации, при этом период, в течение которого выполняли такие манипуляции, варьировал от 7-го до 20-го дня эмбрионального развития, а продолжительность воздействия – от 3 до 12 ч [4, 5].

В то же время низкотемпературное воздействие в эмбриональный период рассматривали исключительно для изучения снижения негативного влияния метаболического тепла на эмбрион и профилактики эндокринных заболеваний у птицы мясных промышленных кроссов [6, 7, 8]. Аналогично «программируется» адаптация к пониженным температурам среды, однако низкотемпературное влияние изучено в гораздо меньшей степени. Поскольку значительное количество кур содержится в странах с холодным климатом и поддержание оптимальных условий выращивания связано со значительными затратами на энергоресурсы, исследования, направленные на выявление генов-кандидатов, участвующих в механизмах терморегуляции при низких температурах, также актуальны.

Существует ряд генофондных пород кур, приспособившихся к жизни в условиях холодной среды и в результате развивших различные физиологические и биохимические механизмы адаптации к низким температурам [9, 10, 11]. К их числу относится русская белоснежная порода кур (РБ), содержащаяся в коллекции биоресурсов «Генетическая коллекция редких и исчезающих пород кур» Российского научно-исследовательского института генетики и селекции сельскохозяйственных животных – филиала Федерального исследовательского центра животноводства им. Л. К. Эрнста (<http://vniigen.ru/ckp-geneticheskaya-kollekciya-redkix-i-ischezayushhix-porod-kur>). Ее представители обладают высокими адаптивными способностями, начиная с суточного возраста.

В более ранних исследованиях идентифицированы 12 генов-кандидатов в специфичных для РБ породы гомозиготных районах (ROH), которые предположительно связаны с ее терморегуляционными особенностями [12]. Для более подробного изучения были выбраны 2 наиболее релевантных гена: *TRPM2* и *RYR2*.

Как известно, за поддержание температуры тела отвечает вегетативная нервная система и гипоталамус. Организм воспринимает изменения температуры окружающей среды благодаря нервным окончаниям – терморецепторам, расположенным в различных органах и тканях, включая мозг. Они постоянно пере-

дают информацию в центральную нервную систему, а именно в гипоталамус, в котором расположен центр терморегуляции. Самое большое семейство «датчиков температуры» представляют собой ионные каналы с переходным рецепторным потенциалом (TRP). TRP активируются, если температура окружающей среды выходит за пределы верхнего или нижнего порогового значения. У млекопитающих известно 11 таких каналов, а у домашней птицы – только 3, и они почти не изучены [13]. Согласно литературным данным, за чувствительность к холоду отвечает ионный канал *TRPM8*. *TRPM2* филогенетически близок к этому каналу, однако считается, что его физиологическая роль заключается в предотвращении повышения температуры тела [14], что актуально для РБ кур, поскольку состояние перегрева у холодоадаптированных организмов наступает гораздо быстрее, чем у неадаптированных. Кроме того, некоторые активные формы кислорода также служат положительными регуляторами активации *TRPM2*, благодаря чему этот ионный канал может выступать в качестве датчика окислительной реакции в некоторых клеточных системах [15]. Предположительно, этот ген влияет на снижение чувствительности центральных терморецептивных структур РБ цыплят к низкой температуре.

Ген *RYR2* был выбран на основании того, что каналы высвобождения  $\text{Ca}^{2+}$  с высокой проводимостью, известные как рианодиновые рецепторы (RyR), опосредуют высвобождение  $\text{Ca}^{2+}$  из эндо/саркоплазматического ретикула в цитоплазму и, таким образом, играют важную роль, регулируя возбуждение и сокращение клеток скелетных и сердечных мышц, тем самым влияя на скорость метаболизма. Длительное воздействие холода на птиц вызывает развитие несократительного термогенеза (НСТ), процессы которого протекают преимущественно в скелетных мышцах. НСТ осуществляется при бесполезном переносе кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ) через рианодиновый рецептор (RyR) и сарко-эндоплазматический ретикулум  $\text{Ca}^{2+}$ -АТФазу (SERCA) [16]. Скелетные мышцы птиц обладают очень высокой способностью поглощать циркулирующие жирные кислоты. В отличие от млекопитающих, до 95% мышечной работы на выносливость у птиц может обеспечивать энергия, полученная из липидов. Использование этого высококалорийного топлива, вероятно, сначала развивалось как адаптация к энергозатратному полету [17]. Терморегуляторный термогенез у птиц осуществляют именно скелетные мышцы, поскольку у них нет бурой жировой ткани.

В связи с изложенным основной целью исследований было определение участия аннотированных генов-кандидатов, предположительно связанных с высокими адаптационными способностями кур в раннем онтогенезе, в процессах терморегуляции и термоадаптации.

**Методика.** Объектом исследования были куры породы русская белоснежная и амрокс (<http://vniigen.ru/ckp-geneticheskaya-kollekciya-redkix-i-ischezayushhix-porod-kur>) в возрасте 52 недель жизни. Порода кур русская белоснежная, яичного направления продуктивности – специализированная, для целей биопромышленности (производство эмбриональных вирусных вакцин). Кроме того, при ее создании проводили селекцию на терморезистентность молодняка в условиях низких температур, а также на устойчивость птицы к неопластическим заболеваниям. Амрокс – порода комбинированного направления продуктивности, селекцию на терморезистентность в ней не проводили.

Для постановки эксперимента яйца взвешивали на электронных весах HL-400EX (A&D Company Ltd.,

**Табл. 1. Весовые характеристики инкубационного яйца и цыплят разного возраста, отобранных для исследования**

| Показатель          |                | Группа      |             |             |             |
|---------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                     |                | контрольная |             | опытная     |             |
|                     |                | амрокс      | РБ          | амрокс      | РБ          |
| Инкубационные яйца  | п              | 60          | 60          | 60          | 60          |
|                     | масса яйца, г  | 55,1 ± 0,3  | 58,3 ± 0,4  | 53,5 ± 0,4  | 60,1 ± 1,1  |
| Суточные цыплята    | п              | 10          | 10          | 10          | 10          |
|                     | живая масса, г | 39,4 ± 0,5  | 41,9 ± 1,0  | 38,5 ± 0,6  | 42,2 ± 1,0  |
| 14-суточные цыплята | п              | 10          | 10          | 10          | 10          |
|                     | живая масса, г | 173,5 ± 4,3 | 149,2 ± 1,5 | 181,0 ± 4,6 | 153,1 ± 2,4 |

Япония) и помещали в инкубаторе «РЭМИЛ-С» (REMIL, Россия). Инкубировали в лабораторных условиях при следующем режиме: +38,3 °C с 1-е по 3-и сутки, +37,8 °C с 4-е по 17-е сутки, +37,3 °C с 18-е по 21-е сутки. Яйца кур опытных групп на 5-е сутки инкубации (чувствительный период эмбриогенеза) охлаждали в течение 6 ч при +14...+16 °C. Суточных цыплят, отобранных для изучения активности релевантных генов-кандидатов, не подвергали охлаждению с целью определения динамики изменений регуляторных характеристик системы температурного гомеостаза. В 14-суточном возрасте после 12-часовой голодной выдержки их охлаждали в течение 1 ч при +7 °C для выяснения механизмов адаптации, сформировавшихся под воздействием аналогичного стресс-фактора в раннем эмбриогенезе.

Скорость газообмена (потребление кислорода и образование углекислого газа) измеряли на газоанализаторе МАГ-6-П-К (НОВАПРИБОР, Россия). Для этого суточных цыплят помещали в герметичную камеру. Время выдержки составило 15 минут при температуре +33 °C. Объем камеры и время выдержки были выбраны таким образом, чтобы предотвратить гипоксию. Дыхательный коэффициент определяли как объем выделяемого углекислого газа, по сравнению с объемом кислорода, поглощенного во время дыхания. Это соотношение характеризует направленность обменных процессов в организме (дыхательный коэффициент, равный 1,0, характеризует катаболизм чистых углеводов, 0,5 – жиров) и используется для обозначения смеси липидов, углеводов и белков в метаболическом субстрате [18]. На всех этапах исследования формирование всех групп проводили по принципу групп-аналогов с учетом породных особенностей (табл. 1).

Убой цыплят проводили методом декапитации; кровь для биохимического анализа собирали в пробирки с активатором свертывания (кремнезем) (ООО «Астрamed», Китай). В сыворотки крови определяли содержание триглицеридов (ммоль/л), глюкозы (ммоль/л), общего белка (г/л) и креатинина (мкмоль/л) на спектрофотометре UNICO 1200/1201 (UNICO, США) с использованием коммерческих наборов фирмы АО «Витал Девелопмент Корпорэйшн» (Россия).

Для изучения относительной экспрессии генов *TRPM2* и *RYR2* в контрольных и опытных группах отбирали навески различных органов и тканей у 7-суточных эмбрионов (аллантоис, навеска тела и головы после энуклеации), у суточных цыплят (мозг, печень, грудные мышцы) и у 14-суточных цыплят через 3 ч после воздействия абиотического стресс-фактора (мозг, печень, грудные мышцы). Образцы ткани немедленно помещали в стабилизатор РНК (ООО «Биолабмикс», Россия) и хранили при –80 °C. РНК выделяли с использованием коммерческого набора «Реагент «Лири»» (ООО «Биолабмикс», Россия). Концентрацию суммарной РНК в образцах определяли на спектрофотометре NanoDrop

(Thermo Fisher Scientific, США). Средняя величина этого показателя варьировала в зависимости от типа ткани в пределах 350...800 нг/мкл. Уровень относительной экспрессии определяли двухэтапным методом, который включал в себя синтез кДНК с реагентами набора «Обратная транскриптаза М-MuLV-RH» (ООО «Биолабмикс», Россия) и ПЦР-РВ с использованием «БиоМастер ОТ-ПЦР SYBR Blue (2×)» (ООО «Биолабмикс», Россия) на приборе QuantStudio™ 5 Real Time PCR System (Thermo Fisher Scientific, США). В качестве эндогенного контроля был выбран ген *Ap2m1* (табл. 2). Подбор последовательности праймеров выполняли в программе BLAST (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>).

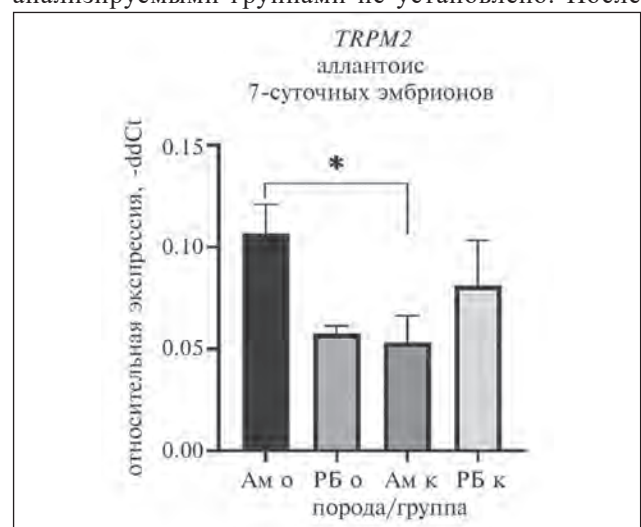
**Табл. 2. Последовательность праймеров для генов и режим амплификации**

| Ген          | Олигонуклеотидная последовательность               | Режим ПЦР-РВ                                                                                                    |
|--------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Ap2m1</i> | F: AAAAACAGGGCAAAGGGACT<br>R: CACGGAAGGGAAGGATGATG | горячий старт – 95 °C, 5 мин,                                                                                   |
| <i>RYR2</i>  | F: ACAACAAAACAGGCTCCGC<br>R: CCAGCTTCCTTCCCAGCTAC  | 40 циклов:                                                                                                      |
| <i>TRPM2</i> | F: GAACCAAGGCAGCCTCTCAT<br>R: CTCCAGCACCACACAAACG  | денатурация – 95 °C, 30 с<br>отжиг праймеров – 60 °C, 30 с<br>элонгация – 72 °C, 30 с<br>плавление – 65...95 °C |

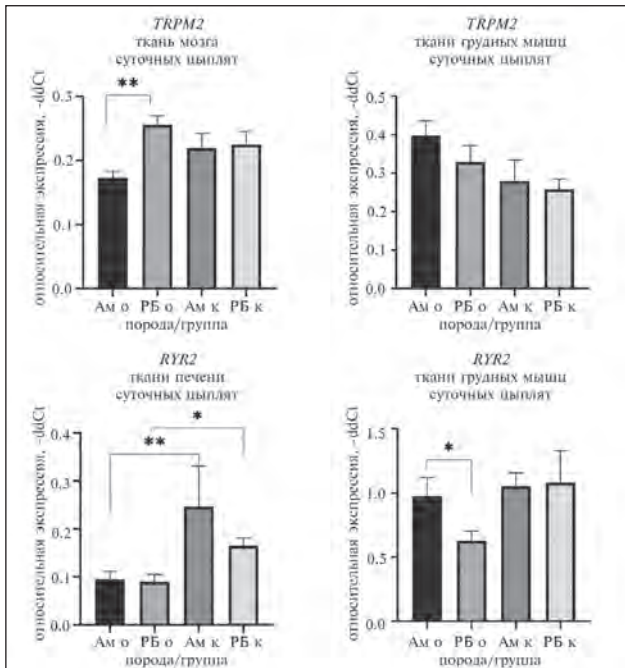
Данные на графиках и в таблице представлены в виде Mean±SE. Достоверность различий оценивали с использованием критерия Манна – Уитни. Различия считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ . Расчет изменения уровня экспрессии генов выполняли методом 2ddCt [19]. Полученные результаты обрабатывали с использованием GraphPad Prism 12.0 (GraphPad Software Inc., США).

**Результаты и обсуждение.** Согласно литературным данным, формирование адаптивных изменений начинается сразу после воздействия температурного раздражителя на организм и впоследствии проявляется в изменении терморегуляторного ответа организма на аналогичное повторное воздействие [14].

По уровню относительной экспрессии гена *RYR2* в эмбриональных тканях достоверных различий между анализируемыми группами не установлено. После



**Рис. 1. Относительная экспрессия гена *TRPM2* в аллантоисе 7-суточных эмбрионов (\* $p < 0,05$ ): Ам к – амрокс, контрольная группа; РБ к – русская белоснежная, контрольная группа; Ам о – амрокс, опытная группа; РБ о – русская белоснежная, опытная группа.**



**Рис. 2. Относительная экспрессия гена *TRPM2* и *RYR2* в образцах тканей суточных цыплят (\* $p<0,05$ ; \*\* $p<0,01$ ): Ам к – амрокс, контрольная группа; РБ к – русская белоснежная, контрольная группа; Ам о – амрокс, опытная группа; РБ о – русская белоснежная, опытная группа.**

охлаждения эмбрионов в чувствительный период повышенная активность гена *TRPM2* была отмечена только в аллантаоисе 7-суточных эмбрионов. Уровень относительной экспрессии этого гена у эмбрионов породы амрокс опытной группы, в сравнении с контролем, увеличился более чем в 2 раза (рис. 1). Эмбрионы русских белоснежных кур практически не отреагировали на воздействие изучаемого стресс-фактора.

Аналогичные результаты по уровню экспрессии гена *TRPM2* наблюдали у суточных цыплят: особи русской белоснежной породы почти не отреагировали на охлаждение изменением уровня относительной экспрессии *TRPM2* в мозге и грудной мышце, в то время как у цыплят амрокс величина этого показателя в грудной мышце выросла в 1,4 раза (рис. 2). Предположительно, это связано с тем, что длительная селекция на терморезистентность в русской белоснежной породе привела к физиологическим изменениям, вызвавшим смещение диапазона температур, выход за пределы которых приводит к активации гена ионного канала *TRPM2*.

Холодовой стресс оказывает большое влияние на обмен веществ в организме и задействует каскад механизмов поддержания температурного гомеостаза. В результате активации оси гипоталамус – гипофиз увеличивается уровень тиреоидных гормонов, мобилизуются запасы гликогена, а также повышается экспрессия генов, таких как *RYR2*, связанных с сократительными элементами. Особую роль в метаболизме тиреоидных гормонов и поддержании термогенеза играет печень, которая имеет тесную метаболическую связь с мышцами и способна стимулировать их сокращение, тем самым регулируя выработку тепла [20].

Относительная экспрессия *RYR2* в грудной мышце суточных цыплят русской белоснежной и амрокс в контрольных группах была ниже, чем в опытных, в 2,0 и 2,8 раза соответственно. Уровень экспрессии

этого гена в печени был выше, чем в грудной мышце, для всех групп, за исключением опытной группы амрокс, в 3,5...6,5 раз (рис. 2). Предположительно, у неонатальных цыплят контрольных групп различные манипуляции на выводе (сортировка, взвешивание, мечение крыловыми кольцами), сопряженные с нахождением в более холодной среде (23 °C в комнате против 37,3 °C в инкубаторе) привели к стрессу, в ответ на который организм был вынужден усилить интенсивность обмена веществ, о чем и свидетельствует повышенная экспрессия *RYR2* в печени. Однако у цыплят опытных групп попадание в более холодную среду (23 °C) не вызвало стрессовой реакции. Очевидно, однократное глубокое охлаждение эмбрионов в чувствительный период эмбриогенеза привело к трансформации процессов основного обмена и регуляторных характеристик системы температурного гомеостаза, что выражается в повышении порога возникновения реакции у суточных цыплят на температуры ниже термонейтральной.

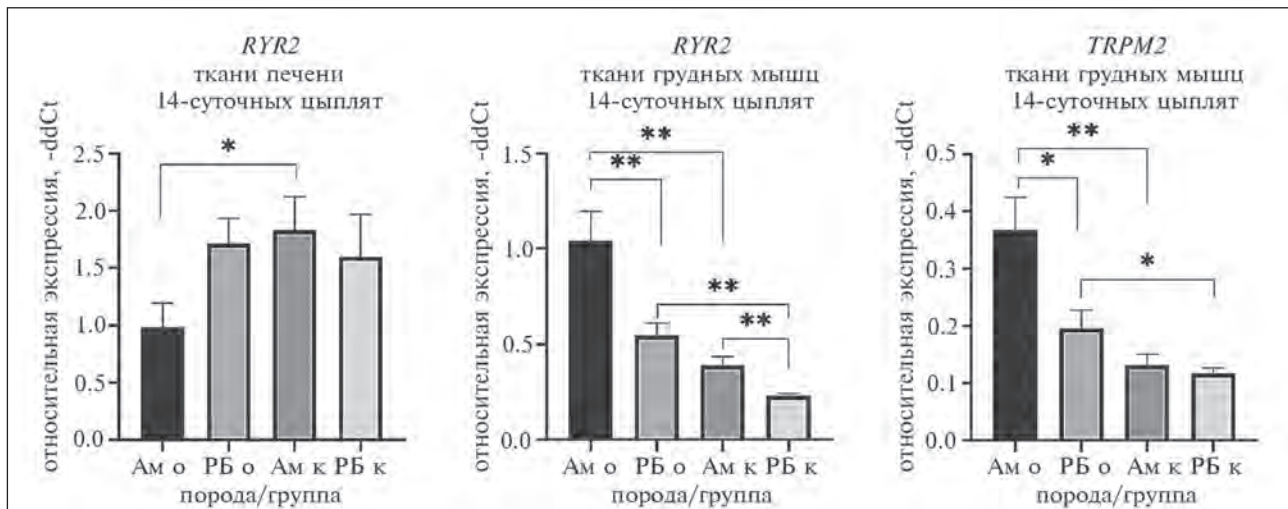
Указанные особенности цыплят контрольных и опытных групп сохранились до 14-суточного возраста и проявились на фоне дозированного низкотемпературного воздействия (1 ч при +7 °C). Прежде всего, необходимо отметить межпородные различия в реакции на холод. Молодняк русской белоснежной породы легко перенес воздействие низкотемпературного стресс-фактора, в то время как цыплята породы амрокс продемонстрировали такие характерные признаки гипотермии, как вялость, сонливость, холодная дрожь, скрюченность тела (рис. 3).

Если суточный цыпленок не способен эффективно поддерживать температурный гомеостаз, оставаясь, по сути, еще пойкилотермным, то в возрасте 2 недель он обладает более совершенными механизмами терморегуляции и может поддерживать температуру тела посредством сократительного (холодовая дрожь) и несократительного термогенеза.

На наш взгляд, более высокий уровень относительной экспрессии *RYR2* в печени 14-суточных цыплят амрокс контрольной группы (почти в 2 раза, по сравнению с опытной) и низкий (в 2,8 раза, по сравнению с опытной) – в грудной мышце, после низкотемпературного воздействия, в сочетании с холодной дрожью – свидетельствует о мобилизации запасов гликогена в организме и активации процессов глюконеогенеза в печени с целью поддержания температуры тела. Цыплята опытной группы задействовали иной механизм терморегуляции. В ответ на охлаждение у них увеличилась относительная экспрессия гена *RYR2* в грудной мышце (в 2,5 раза, по сравнению



**Рис. 3. Фенотипические проявления реакции на холод у цыплят контрольных групп пород амрокс (слева) и русская белоснежная (справа).**



**Рис. 4. Относительная экспрессия генов RYR2 и TRPM2 в образцах тканей 14-суточных цыплят спустя 3 ч после дозированного низкотемпературного воздействия (\* $p<0,05$ ; \*\* $p<0,01$ ): Ам к – амрокс, контрольная группа; РБ к – русская белоснежная, контрольная группа; Ам о – амрокс, опытная группа; РБ о – русская белоснежная, опытная группа.**

с контролем), что, по нашему мнению, служит показателем активации механизма НСТ, который, как известно, происходит преимущественно в мышцах (рис. 4).

Молодняк русской белоснежной породы, как и ожидалось, отреагировал на охлаждение в гораздо меньшей степени, в целом уровень экспрессии гена RYR2 в грудной мышце у них был ниже, чем у цыплят амрокс (в среднем в 2 раза); в опытной группе величина этого показателя была несколько выше, чем в контроле. Уровень экспрессии гена рианодиневого рецептора в печени у 14-суточных цыплят русской белоснежной породы после охлаждения был довольно высок, разницы между контролем и опытом практически не наблюдалось. Вероятно, это связано тем, что желток яиц кур русской белоснежной породы мельче, чем у птиц породы амрокс: относительная величина желтка 26...27% против 32...33% соответственно [21]. Поэтому, обладая более ограниченными ресурсами питательных веществ в организме, неонатальные цыплята русской белоснежной породы вынуждены в целях обеспечения энергетических потребностей организма более интенсивно абсорбировать остаточный желточный мешок.

**Табл. 3. Биохимические показатели крови цыплят разного возраста анализируемых групп (n=10 в каждой группе)**

| Показатель                                                       | Группа                   |                          |                          |                          |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                                                                  | контрольная              |                          | опытная                  |                          |
|                                                                  | амрокс                   | русская белоснежная      | амрокс                   | русская белоснежная      |
| <b>Суточные цыплята на выводе</b>                                |                          |                          |                          |                          |
| Триглицериды, ммоль/л                                            | 2,2 <sup>a</sup> ± 0,3   | 1,5 <sup>b</sup> ± 0,1   | 1,6 ± 0,2                | 1,2 ± 0,1                |
| Глюкоза, ммоль/л                                                 | 15,2 ± 0,4               | 14,3 <sup>a</sup> ± 0,4  | 14,2 <sup>a</sup> ± 0,5  | 12,8 <sup>b</sup> ± 0,4  |
| Общий белок, г/л                                                 | 41,9 <sup>a</sup> ± 1,9  | 29,4 <sup>c</sup> ± 3,6  | 31,1 <sup>c</sup> ± 3,1  | 28,9 ± 1,9               |
| Креатинин, мкмоль/л                                              | 47,2 ± 3,7               | 30,5 ± 12,0              | 32,2 ± 8,0               | 37,5 ± 7,0               |
| Дыхательный коэффициент                                          | 0,67 <sup>a</sup> ± 0,03 | 0,68 ± 0,02              | 0,78 <sup>b</sup> ± 0,04 | 0,65 <sup>a</sup> ± 0,03 |
| <b>14-суточные цыплята после низкотемпературного воздействия</b> |                          |                          |                          |                          |
| Триглицериды, ммоль/л                                            | 2,6 <sup>a</sup> ± 0,2   | 0,7 <sup>c</sup> ± 0,1   | 1,7 <sup>ac</sup> ± 0,2  | 0,7 <sup>d</sup> ± 0,1   |
| Глюкоза, ммоль/л                                                 | 20,6 <sup>ac</sup> ± 0,6 | 17,6 <sup>d</sup> ± 0,3  | 15,3 <sup>c</sup> ± 1,7  | 15,1 <sup>b</sup> ± 0,9  |
| Общий белок, г/л                                                 | 32,3 <sup>a</sup> ± 1,4  | 26,9 <sup>ac</sup> ± 0,7 | 31,9 ± 1,2               | 31,9 <sup>d</sup> ± 1,0  |
| Креатинин, мкмоль/л                                              | 29,5 ± 5,2               | 27,5 ± 3,9               | 33,0 ± 5,4               | 23,6 ± 4,8               |

Различия между показателями в соответствующих строках статистически достоверны: <sup>ab, bd</sup> при  $p<0,05$ , <sup>ac</sup>  $p<0,01$ , <sup>ed</sup>  $p<0,001$ .

Активность гена TRPM2 после низкотемпературного воздействия возрастает у цыплят всех опытных групп, в сравнении с контрольными. Поскольку механизмы НСТ сопряжены с повышенным потреблением кислорода, необходимого для окислительного фосфорилирования, увеличивается и относительная экспрессия гена ионного канала TRPM2 как датчика окислительной реакции. Это косвенно свидетельствует и о различиях в ориентации адаптационного паттерна у цыплят контрольных и опытных групп.

Однократное дозированное воздействие сублетальных пониженных температур в чувствительный период эмбриогенеза изменило ориентацию адаптационного паттерна у цыплят опытных групп, в сравнении с контрольными (табл. 3). Так, у неонатальных цыплят амрокс контрольной группы, в сравнении с цыплятами остальных групп, отмечено более высокое содержание в крови триглицеридов (в 1,4...1,8 раза,  $p<0,05$ ) и общего белка (в 1,3...1,4 раза,  $p<0,01$ ), а также самое высокое содержание продукта белкового обмена – креатинина (в 1,3...1,5 раза). Очевидно, основным источником энергии для них служат жиры; запасы гликогена в организме значительно истощены. Показатель дыхательного коэффициента также указывает на преимущественно жировой обмен.

Креатинин – конечное звено белкового обмена, продукт распада аминокислоты креатина, вырабатывается в мышцах и участвует в энергетическом обмене мышечной и других тканей. Согласно литературным данным, предшественник креатинина – креатин – у эмбрионов перед выводом накапливается в основном в мышцах груди, в то время как гликоген, основное место метаболизма которого печень, накапливается преимущественно в ткани желточного мешка. К моменту вылупления уровень креатина увеличивается, а гликогена – снижается. При истощении запасов гликогена, который служит основным источником энергии до начала потребления корма неонатальными цыплятами, эту функцию берет на себя креатин [22]. Таким образом, уровень содержания креатинина в крови косвенно позволяет судить о наличии запасов гликогена.

Неонатальные цыплята амрокс опытной группы, в сравнении с птицей остальных групп, наоборот, более равномерно, без отклонения в преимущественное ис-

пользование какого-либо субстрата, использовали все виды питательных веществ; показатель дыхательного коэффициента указывает на использование преимущественно белков желточного мешка и запасов гликогена.

У суточных цыплят русской белоснежной породы, адаптированной к низким температурам и характеризующейся мелкожелткостью яиц, значения всех биохимических показателей крови были ниже, чем у цыплят амрокс. Особи опытной группы в большей степени израсходовали углеводные запасы организма, их обмен веществ уклонялся в сторону использования жиров в качестве основного источника энергии.

Повторное дозированное воздействие на 14-суточных цыплят стресс-фактора (низкая температура), аналогичное воздействию, которому подверглись цыплята опытных групп в период раннего эмбриогенеза, вызвало разные терморегуляторные реакции, которые зависели как от породы птиц, так и от того, сталкивался ли их организм с этим абиотическим фактором в пренатальный период. Кроме того, эксперимент был проведен после предварительной 12-часовой голодной выдержки, и до его окончания цыплята не получали корм. Отсутствие источника доступных углеводов в процессе эксперимента в сочетании с гипотермическим воздействием оказали на организм глубокое стрессовое влияние. Сильнее всего на охлаждение реагировали цыплята амрокс контрольной группы, которые для поддержания температуры тела активировали механизм глюконеогенеза, то есть синтеза глюкозы из жиров и белков. Косвенно об этом можно судить по высоким уровням триглицеридов (в 1,5 раза больше, чем в опытной группе, и в 3,7 раза, чем у цыплят РБ обеих групп,  $p < 0,01$ ), глюкозы (в 1,4 раза выше, чем у РБ,  $p < 0,01$ ) и общего белка (в 1,2 раза выше, чем у РБ контрольной группы) в крови. Глюконеогенез важен для предупреждения существенного снижения уровня глюкозы в крови во время голодания, он также активируется на холоде для получения дополнительной энергии, необходимой для поддержания температурного гомеостаза. Цыплята амрокс опытной группы отреагировали на низкотемпературное воздействие в меньшей степени, поскольку их организм уже сталкивался с этим стресс-фактором и смог в некоторой степени к нему адаптироваться.

Конечно, процесс глюконеогенеза протекал в печени цыплят всех групп, поскольку они все находились на голодной выдержке, однако птица русской белоснежной породы (а также цыплята амрокс опытной группы) для поддержания температуры тела задействовала и другие механизмы, в частности НСТ. Кроме того, для особей русской белоснежной породы, особенно в опытной группе, уровень воздействия стресс-фактора был недостаточным для того, чтобы вызвать серьезные перестройки в обменных процессах организма.

**Выводы.** Однократное дозированное охлаждение эмбрионов в диапазоне сублетальных температур в чувствительный период эмбриогенеза приводит к изменению ориентации адапционного паттерна регуляторных характеристик системы температурного гомеостаза, которые сохраняются до 14-суточного возраста цыплят. Птица, которая подверглась такому воздействию, для поддержания температуры тела задействует не только процессы использования в качестве энергетического субстрата гликогена и активацию глюконеогенеза в печени, но и более эффективный механизм терморегуляции – несократительный термогенез в мышцах, что подтверждают различиями в паттернах экспрессии генов *RYR2* и *TRPM2* у цыплят контрольных и опытных групп.

Необходимо также отметить межпородные различия. Поскольку в русской белоснежной породе проводили селекцию на терморезистентность молодняка к холоду, у этой птицы произошел сдвиг диапазона термонейтральных температур в сторону понижения. В результате уровень и экспозиция температурного стресс-фактора в проведенных исследованиях были недостаточными для того, чтобы вызвать серьезные перестройки в обменных процессах организма.

При этом даже однократное дозированное низкотемпературное воздействие в чувствительный период раннего эмбриогенеза позволило «перепрограммировать» ориентацию обменных процессов у эмбрионов и цыплят, что увеличило адаптационные возможности 2-недельных цыплят в условиях пониженных температур среды.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по темам ГЗ 124020200114-7 / 124020200029-4.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

Все процедуры на животных проводили в соответствии с Протоколом Комиссии по этике экспериментов на животных Федерального научного центра животноводства им. Л. К. Эрнста (№ 2020/2) и Законом Российской Федерации о ветеринарной медицине (№ 4979-1 от 14 мая 1993 г.).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Литература.

1. *Brooding temperatures for chicks acclimated to heat during incubation: effects on post-hatch intestinal development and body weight under heat stress* / M. Aksit, S. Yalcin, C. Yenisey, et al. // *British Poultry Science*. 2010. Vol. 51. No. 3. P. 444–452. doi: 10.1080/00071668.2010.495746.
2. *Cyclic variations in incubation conditions induce adaptive responses to later heat exposure in chickens: a review* / T. Loyau, L. Bedrani, C. Berri, et al. // *Animal*. 2015. Vol. 9. No. 1. P. 76–85. doi: 10.1017/S1751731114001931.
3. *Morita V.S., Almeida V.R., Matos Junior J.B., Vicentini T.I., van den Brand H., Boleli I. C. Incubation temperature alters thermal preference and response to heat stress of broiler chickens along the rearing phase* // *Poultry Science*. 2016; 1; 95 (8): 1795–1804. doi: 10.3382/ps/pew071.
4. *Hatching phase influences thermal preference of broilers throughout rearing* / Júnior J. B. Matos, T. I. Vicentini, A. R. Almeida, et al. // *PLoS One*. 2020. Vol. 15. No. 7. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0235600> (дата обращения 05.06.2024). doi: 10.1371/journal.pone.0235600.
5. *Al-Zghoul M. B., Mohammad K. M. M. Saleh Effects of thermal manipulation of eggs on the response of jejunal mucosae to posthatch chronic heat stress in broiler chickens* // *Poultry Science*. 2020. Vol. 99. No. 5. P. 2727–2735. doi: 10.1016/j.psj.2019.12.038.
6. *Exposure of embryos to cyclically cold incubation temperatures durably affects energy metabolism and antioxidant pathways in broiler chickens* / T. Loyau, A. Collin, C. Yenisey, et al. // *Poultry Science*. 2014. Vol. 93. No. 8. P. 2078–86. doi: 10.3382/ps.2014-03881.
7. *Effect of low incubation temperature and low ambient temperature until 21 days of age on performance and body temperature in fast-growing chickens* / D. Nyuadzi, A. Travel, B. Méda, et al. // *Poultry Science*. 2017. Vol. 96. No. 12. P. 4261–4269. doi: 10.3382/ps/pex264.

8. Short cold exposures during incubation and postnatal cold temperature affect performance, breast meat quality, and welfare parameters in broiler chickens / D. Nyuadzi, C. Berri, L. Dusart, et al. // *Poultry Science*. 2020. Vol. 99. No. 2. P. 857–868. doi: 10.1016/j.psj.2019.10.024.
9. Genome-wide scan for selective footprints and genes related to cold tolerance in Chantecler chickens / N. Y. Xu, W. Si, M. Li, et al. // *Zoological Research*. 2021. Vol. 42. No. 6. P. 710–720. doi: 10.24272/j.issn.2095-8137.2021.189.
10. Thyroid transcriptome analysis reveals different adaptive responses to cold environmental conditions between two chicken breeds / S. Xie, X. Yang, D. Wang, et al. // *PLoS One*. 2018. Vol. 13. No. 1. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0191096> (дата обращения 05.06.2024). doi: 10.1371/journal.pone.0191096.
11. Performance differences of Rhode Island Red, Bashang Long-tail Chicken, and their reciprocal crossbreds under natural cold stress / S. Xie, X. Yang, Y. Gao, et al. // *Asian-Australasian journal of animal sciences*. 2017. Vol. 30. No. 10. P. 1507–1514. doi: 10.5713/ajas.16.0957.
12. Identification of Key Candidate Genes in Runs of Homozygosity of the Genome of Two Chicken Breeds, Associated with Cold Adaptation / E. S. Fedorova, N. V. Dementieva, Y. S. Shcherbakov, et al. // *Biology (Basel)*. 2022. Vol. 11. No. 4. URL: <https://www.mdpi.com/2079-7737/11/4/547> (дата обращения 05.06.2024). doi: 10.3390/biology11040547.
13. Influence of temperature during incubation on the mRNA levels of temperature sensitive ion channels in the brain of broiler chicken embryos / S. M. D. Verlinden, T. Norton, M. L. V. Larsen, et al. // *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. 2022. Vol. 268. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1095643322000575?via%3Dihub> (дата обращения 05.06.2024). doi: 10.1016/j.cbpa.2022.111199.
14. Evtushenko A. A., Voronova I. P., Kozyreva T. V. Effect of Long-Term Adaptation to Cold and Short-Term Cooling on the Expression of the TRPM2 Ion Channel Gene in the Hypothalamus of Rats // *Current Issues in Molecular Biology*. 2023. Vol. 45. No. 2. P. 1002–1011. doi: 10.3390/cimb45020065.
15. Hydrogen peroxide and ADP-ribose induce TRPM2-mediated calcium influx and cation currents in microglia / R. Kraft, C. Grimm, K. Grosse, et al. // *American Journal of Physiology-Cell Physiology*. 2004. Vol. 286. No. 1. P. 129–137. doi: 10.1152/ajpcell.00331.2003.
16. Seasonal cold induces divergent structural/biochemical adaptations in different skeletal muscles of Columba livia: evidence for nonshivering thermogenesis in adult birds / P. Pani, G. Swalsingh, S. Pani, et al. // *Biochemical Journal*. 2023. Vol. 480. No. 17. P. 1397–1409. doi: 10.1042/BCJ20230245
17. Muscle non-shivering thermogenesis and its role in the evolution of endothermy / J. Nowack, S. Giroud, W. Arnold, et al. // *Frontiers in physiology*. 2017. Vol. 8. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/physiology/articles/10.3389/fphys.2017.00889/full> (дата обращения 05.06.2024). doi: 10.3389/fphys.2017.00889.
18. Walsberg G., Wolf B. Variation in the respiratory quotient of birds and implications for indirect calorimetry using measurements of carbon dioxide production // *Journal of Experimental Biology*. 1995. Vol. 198. No. 1. P. 213–219. doi: 10.1242/jeb.198.1.213.
19. Livak K. J., Schmittgen T. D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2<sup>−ΔΔC(T)</sup> Method // *Methods*. 2001. Vol. 25. P. 402–408. doi: 10.1006/meth.2001.1262.
20. Ruuskanen S., Hsu B. Y., Nord A. Endocrinology of thermoregulation in birds in a changing climate // *Molecular and Cellular Endocrinology*. 2021. Vol. 519. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303720720303907?via%3Dihub> (дата обращения 05.06.2024). doi: 10.1016/j.mce.2020.111088.
21. Станишевская О. И., Федорова Е. С. Сравнительная оценка стресс-реактивности организма кур пород русская белая с мутацией sw<sup>+</sup> и амрокс на гипотермию в эмбриональном и раннем постнатальном периодах онтогенеза // *Сельскохозяйственная биология*. 2019. Vol. 54. No. 6. P. 1135–1143. doi: 10.15389/agrobiology.2019.6.1135rus.
22. Supply and demand of creatine and glycogen in broiler chicken embryos / J. Dayan, T. Melkman-Zehavi, N. Reich, et al. // *Frontiers in Physiology*. 2023. Vol. 14. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/physiology/articles/10.3389/fphys.2023.1079638/full> (дата обращения 05.06.2024). doi: 10.3389/fphys.2023.1079638.

Поступила в редакцию 02.07.2024

После доработки 30.08.2024

Принята к публикации 05.11.2024

**АНТИОКСИДАНТНЫЙ СТАТУС ПЕРЕПЕЛОВ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОБИОТИКА И ЦЕОЛИТА**

© 2024 г. **В. В. Герасименко**, доктор биологических наук, **А. А. Еремина**, аспирант, **М. В. Сычева**, доктор биологических наук, **О. Ю. Ежова**, кандидат биологических наук, **В. А. Шахов**, доктор технических наук, **Р. З. Мустафин**, кандидат биологических наук

Оренбургский государственный аграрный университет,  
460014, Оренбург, ул. Челюскинцев, 18  
E-mail: na\_er\_1999@mail.ru

Исследования проводили с целью определения влияния комплексного использования культуры *Enterococcus faecium* RCAM05160 и синтетического цеолита типа NaX на антиоксидантный статус перепелов породы Феникс. Птица опытной группы с суточного возраста, помимо основного рациона, ежедневно получала взвесь культуры *E. faecium* RCAM05160 с концентрацией клеток  $1 \cdot 10^9$  в 1 мл из расчета 0,1 мл на 1 кг живой массы и синтетический цеолит типа NaX в количестве 3 % от массы корма совместно со скормливанием основного рациона. Продолжительность эксперимента – 42 дня. Антиоксидантный статус организма перепелов оценивали по следующим параметрам: активность супероксиддисмутазы, каталазы и церулоплазмينا, концентрация малонового диальдегида, антиокислительная активность плазмы крови. В опытной группе активность супероксиддисмутазы в конце периода наблюдения была статистически значимо выше, чем в контрольной, на 7,0 %, каталазы – на 30,2 %, церулоплазмин – на 33,5 %. Концентрация малонового диальдегида, одного из основных продуктов ПОЛ, на 42-е сутки эксперимента в опытной группе была ниже на 13,6 %, а общая антиокислительная активность – выше на 20,7 %. В течение всего эксперимента наибольший прирост живой массы наблюдали у перепелов опытной группы. Выход мяса полупотрошенной и потрошенной тушки в опытной группе был выше на 6,67 % и 9,49 % соответственно. Комплексное использование культуры *E. faecium* RCAM05160 и синтетического цеолита типа NaX при выращивании перепелов оказывает положительное влияние на антиоксидантный статус перепелов, динамику живой массы и показатели мясной продуктивности.

**ANTIOXIDANT STATUS OF QUAILS WITH THE COMPLEX USE OF PROBIOTIC AND ZEOLITE**

V. V. Gerasimenko, A. A. Eremina, M. V. Sycheva, O. Yu. Ezhova, V. A. Shakhov, R. Z. Mustafin

Orenburg State Agrarian University,  
460014, Orenburg, ul. Chelyuskintsev, 18  
E-mail: na\_er\_1999@mail.ru

The study was conducted to determine the effect of the combined use of *Enterococcus faecium* RCAM05160 culture and synthetic zeolite NaX on the antioxidant status of Phoenix quail. In addition to the main diet, the experimental group of birds were given daily, from the age of one day, a suspension of *E. faecium* RCAM05160 culture with a cell concentration of  $1 \times 10^9$  in 1 ml at a rate of 0.1 ml per 1 kg of live weight and synthetic zeolite NaX in an amount of 3 % of the feed weight together with the main diet. The duration of the experiment was 42 days. The antioxidant status of the quail body was assessed by the following parameters: activity of superoxide dismutase, catalase and ceruloplasmin, concentration of malonic dialdehyde, antioxidant activity of blood plasma. In the experimental group, the activity of superoxide dismutase at the end of the observation period was statistically significantly higher than in the control group by 7.0 %, catalase – by 30.2 %, ceruloplasmin – by 33.5 %. The concentration of malondialdehyde, one of the main products of lipid peroxidation, on the 42<sup>nd</sup> day of the experiment in the experimental group was lower by 13.6 %, and the total antioxidant activity was higher by 20.7 %. Throughout the experiment, the greatest increase in live weight was observed in quails of the experimental group. The yield of semi-eviscerated and eviscerated carcasses in the experimental group was higher by 6.67 % and 9.49 %, respectively. The combined use of *E. faecium* RCAM05160 culture and synthetic NaX-type zeolite in quail cultivation has a positive effect on the antioxidant status of quails, live weight dynamics and meat productivity indicators.

**Ключевые слова:** пробиотик; цеолит; перепела; продуктивность; живая масса; антиоксидантный статус.

**Keywords:** probiotic; zeolite; quail; productivity; live weight; antioxidant status.

Птицеводство – одна из наиболее интенсивно развивающихся отраслей сельского хозяйства, что обусловлено быстрым ростом птицы и более высоким выходом продукции с единицы производственной площади. Одна из актуальных проблем современной прикладной биологии в птицеводстве – оптимизация процессов адаптации сельскохозяйственной птицы к постоянно изменяющимся условиям внешней среды. Поиск новых отечественных биологически активных добавок, предназначенных для оптимизации метаболических процессов в организме птицы в стрессовых условиях, – важное направление развития отрасли. В свою очередь, стимуляция метаболических процессов может способствовать повышению жизнеспособности

поголовья, увеличению продуктивности и качества продукции.

Стресс – неотъемлемый элемент промышленной технологии содержания птиц. Под влиянием стрессовых факторов различной природы (перепады температур, содержание токсинов микробиологического происхождения в корме, развитие инфекционного процесса) происходит чрезмерная активация перекисного окисления липидов (ПОЛ), что приводит к развитию окислительного стресса. В этих условиях организм птицы расходует значительное количество энергии и биологически активных веществ не на рост и развитие, а на сохранение гомеостаза и поддержание жизненных функций. На сегодняшний день окислительный стресс рассматривается

в качестве универсального неспецифического звена патогенеза многих заболеваний, причины снижения темпов роста птицы, ухудшения качества мяса и, как следствие, повышения производственных затрат [1].

Для обеспечения развития отрасли необходим поиск новых путей коррекции нарушений, сопровождающих окислительный стресс, и повышения продуктивности сельскохозяйственной птицы. Среди биологически активных кормовых добавок особый интерес представляют экологически безопасные стимуляторы продуктивности животных, к числу которых можно отнести пробиотики, цеолиты, лекарственные растения и др.

На сегодняшний день в литературе отсутствуют данные о комплексном использовании цеолита типа NaX и культуры бактерий *Enterococcus faecium* RCAM05160 в качестве кормовой добавки, влияющей на антиоксидантный статус сельскохозяйственных животных, а в состав существующих средств входят другие компоненты. Например, известна кормовая добавка для профилактики микотоксикозов птицы Цеотон, включающая природный цеолит и тиосульфат натрия [2].

Ранее было установлено положительное влияние на усвояемость компонентов корма, а также обменные процессы и, как следствие, мясную продуктивность совместного использования культуры *E. faecium* RCAM05160 и цеолита типа NaX в кормлении перепелов [3]. Важно отметить, что бактерии *E. faecium* входят в состав нормальной микрофлоры сельскохозяйственной птицы, в том числе перепелов, что обуславливает безопасность их включения в рацион птицы в качестве биологически активной добавки [4]. Результаты современных исследований свидетельствуют о положительном влиянии пробиотиков на коррекцию окислительного стресса сельскохозяйственной птицы [5]. Все изложенное позволяет рассматривать культуру *E. faecium* RCAM05160 в качестве перспективной пробиотической добавки с целью коррекции нарушений, сопровождающих окислительный стресс.

Применение цеолитов в кормлении животных и птиц обусловлено их сорбционными, ионно-обменными и каталитическими свойствами. Имеющиеся результаты использования цеолитов природного и синтетического происхождения в птицеводстве и животноводстве свидетельствуют об их положительном влиянии на зоотехнические, морфологические и биохимические показатели, антиоксидантный статус и естественную резистентность организма [6, 7, 8].

На основании изложенного можно предположить, что в комплексе перечисленные кормовые добавки, показавшие хорошие результаты в качестве однокомпонентного средства для оптимизации антиоксидантного статуса и при сочетании использованием с целью повышения продуктивности сельскохозяйственной птицы, будут эффективны и в отношении нивелирования последствий окислительного стресса.

Цель исследования – определить эффективность комплексного использования культуры *E. faecium* RCAM05160 и синтетического цеолита типа NaX для коррекции антиоксидантного статуса перепелов породы Феникс.

**Методика.** В 2023–2024 гг. в условиях вивария ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ согласно общепринятой методике проведения научных и производственных исследований по кормлению сельскохозяйственной птицы [9] был поставлен опыт на перепелах породы Феникс. Методом пар-аналогов сформировали 2 группы по 35 голов: контрольная и опытная. Всю птицу содержали в одинаковых условиях. Температуру в первую неделю

эксперимента поддерживали на уровне 35...37 °С, затем ее снижали каждую неделю на 2 °С. Таким образом, к концу эксперимента она достигла оптимальной для содержания перепелов репродуктивного возраста и составляла 20...21 °С. Относительная влажность воздуха находилась в пределах 65...75 %, освещение птичника в первые две недели было круглосуточным, затем его сократили до 16 ч в сутки. Птица имела постоянный свободный доступ к корму и воде. Кормление осуществляли сухими сбалансированными комбикормами с параметрами питательности, соответствующими рекомендуемым нормам кормления [10]. Перепела опытной группы с точного возраста, помимо основного рациона, ежедневно получали взвесь культуры *E. faecium* RCAM05160 с концентрацией клеток  $1 \times 10^9$  в 1 мл из расчета 0,1 мл на 1 кг живой массы и синтетический цеолит типа NaX в количестве 3 % от массы корма совместно с основным рационом. Оптимальная дозировка культуры бактерий и цеолита была обоснована в ранее проведенных исследованиях [3, 7]. Взвесь культуры *E. faecium* RCAM05160 вносили в определенный объем питьевой воды, который рассчитывали, исходя из суточной потребности птицы. Цеолит перед использованием измельчали до размеров гранул комбикорма. Продолжительность опыта составила 42 дня.

С начала наблюдения и по 21-е сутки эксперимента все анализируемые показатели фиксировали суммарно для самцов и самок, с 21-е по 42-е сутки – исследование осуществляли только в отношении самок. Разделение молодняка по полу обусловлено значительными различиями зоотехнических показателей: самки перепелов, как правило, имеют большую массу и, как следствие, показатели мясной продуктивности, что, безусловно, имеет значение в условиях промышленного птицеводства.

Определение пола осуществляли с учетом морфологических и этологических данных (окрас, поведение, строение клоаки, наличие секрета). В результате разделения объем контрольной группы составил 29 самок, опытной – 31. Для чистоты эксперимента численность обеих групп с 21-й недели сократили до 29 особей.

За всеми перепелами устанавливали наблюдение, при этом особое внимание обращали на клиническое состояние, сохранность, динамику живой массы. В течение всего опыта еженедельно до утреннего кормления проводили индивидуальное взвешивание перепелат каждой группы.

Анализ крови проводили в центре оценки и экспертизы ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ. Забор крови для оценки показателей антиоксидантного статуса проводили у 5 птиц из каждой группы на 1-е, 21-е и 42-е сутки эксперимента. Антиоксидантный статус организма перепелят оценивали по следующим параметрам: активность супероксиддисмутазы, каталазы и церулоплазмينا [11], концентрация малонового диальдегида [12], антиокислительная активность плазмы крови [13]. В конце эксперимента проводили контрольный убой по 3 головы из каждой группы с целью анатомической разделки тушек и оценки показателей мясной продуктивности. Отбор птиц для убоя проводили с учетом медианных показателей для группы наблюдения в целом.

Статистическую обработку данных осуществляли посредством определения следующих непараметрических критериев: U-критерия Манна-Уитни – для независимых выборок и T-критерий Вилкоксона – для зависимых выборок с использованием модуля надстройки AtteStat (GNU General Public License version 3.0) для работы с электронными таблицами Microsoft Office Excel. Данные, анализируемые с использованием непараметриче-

ских критериев, приведены в виде «медиана (25-й; 75-й процентиль)». Выбор непараметрических критериев в отношении ряда показателей обоснован малым объемом сравниваемых статистических данных ( $n=3; 5$ ), что не позволяет получить явные подтверждения гипотезы нормальности распределения. Обработку показателей живой массы проводили посредством определения Т-критерия Стьюдента; данные далее по тексту указаны в виде « $M \pm m$ », где  $M$  – среднее арифметическое,  $m$  – ошибка среднего арифметического. Различия между группами считали значимыми при  $p \leq 0,05$ .

**Результаты и обсуждение.** За время опыта сохранность птиц в контрольной и опытной группах составила 94,3 % и 97,1 % соответственно.

Концентрация антиоксидантных ферментов в крови – важный маркер стрессов различной этиологии [14]. Они жизненно важны для удаления избытка активных форм кислорода. Результаты изучения активности супероксиддисмутазы свидетельствуют, что ее медианное значение снижалось с возрастом птицы, однако различия не были статистически значимыми (табл. 1). Так, в крови суточных перепелят она находилась на уровне 1215,0 Ед/г Нв. В контрольной группе с суточного до 21-дневного возраста отмечали уменьшение активности фермента на 7,0 %, в опытной – на 1,4 %. Такая тенденция сохранялась и в течение трех следующих недель учетного периода. При этом в возрасте 21 день активность энзима в крови перепелят опытной группы была достоверно выше, чем в контрольной, на 6,0 %, в 42 дня – на 7,0 %.

Комплексное использование исследуемых кормовых добавок в опытной группе повлекло за собой стойкое повышение активности каталазы во все исследуемые возрастные периоды (см. табл. 1). При этом возрастная динамика изменения величины этого показателя в обеих группах выглядела практически одинаково. Статистически значимые различия в опытной группе относительно контрольной наблюдали на 42-е сутки исследования, разница составила 30,2 %.

Используемые кормовые добавки статистически значимо повышали активность церулоплазмينا относительно контроля в течение всего периода наблюдения, разница на 21-е сутки исследования составила 22,9 % на 42-е – 33,5 % (см. табл. 1).

Малоновый диальдегид – один из основных продуктов ПОЛ, а его концентрация в сыворотке крови во многом зависит от активности основных ферментов антиоксидантной защиты организма. Оценка возрастной динамики изменения его концентрации в сыворотке крови перепелов показала снижение величины этого показателя в обеих группах (табл. 2). Статистически значимые различия (13,6 %) между опытной и контрольной группами наблюдали в конце периода наблюдения.

Общая антиокислительная способность плазмы крови зависит как от факторов ферментативной природы, так и от других компонентов, осуществляющих защиту организма от перекисей и свободных радикалов. Определение антиоксидантной активности плазмы крови перепелов дает возможность оценить антиоксидантную защиту организма перепелов в целом. Комплексное использование культуры *E. faecium* RCAM05160 и синтетического цеолита типа NaX оказало положительное воздействие на антиокислительные резервы организма перепелов (см. табл. 2). Статистически значимые ( $p < 0,05$ ) различия между показателями антиокислительной активности плазмы крови перепелов на протяжении всего эксперимента наблюдали как в возрастной динамике в обеих группах, так и между птицей контрольной

**Табл. 1. Влияние комплексного использования пробиотика и цеолита на активность некоторых антиоксидантных ферментов крови перепелов (медиана (25-й; 75-й процентиль),  $n=5$ )**

| Возраст, сут. | Активность супер-оксиддисмутазы, Ед/г Нв |                          | Активность каталазы, мкмоль $H_2O_2$ /л·мин |                    | Активность церулоплазмينا, мкмоль/л бензохинона/л·мин |                    |
|---------------|------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------|--------------------|
|               | контроль                                 | опыт                     | контроль                                    | опыт               | контроль                                              | опыт               |
| 1             | 1215,0 (1203,8; 1234,6)                  |                          | 29,5 (26,7; 31,9)                           |                    | 30,6 (29,3; 31,5)                                     |                    |
| 21            | 1130,0 (1129,6; 1144,4)                  | 1198,3 (1108,8; 1200,4)* | 30,3 (29,7; 30,9)                           | 40,0 (39,4; 40,7)  | 40,1 (39,0; 42,7)                                     | 49,3 (48,3; 50,3)* |
| 42            | 1054,9 (1051,1; 1058,1)                  | 1128,9 (1128,4; 1143,6)* | 39,8 (37,6; 40,2)                           | 51,8 (51,1; 52,3)* | 47,8 (46,6; 48,5)                                     | 63,8 (62,6; 64,8)* |

\*Различия с контрольной группой статистически значимы при  $p < 0,05$ .

и опытной групп. У птиц, получавших изучаемые кормовые добавки, медианное значение антиокислительной активности плазмы крови было выше, чем у особей контрольной группы, на 21-е сутки на 7,5 %, на 42-е сутки – на 20,7 %.

Уровень окислительного стресса в организме оказывает прямое влияние на его рост и развитие и, следовательно, продуктивность. В целом перепела опытной группы в течение всего опыта демонстрировали достоверно ( $p < 0,01$ ) больший прирост живой массы, по сравнению с контролем. К концу первой недели их масса превышала величину этого показателя в контроле на 9,77 %, в последующие пять недель разница составляла 8,98 %, 3,25 %, 2,79 %, 5,2 % и 3,2 %. К концу периода наблюдения живая масса перепелов опытной группы составляла  $231,15 \pm 25,21$  г, в контрольной она была на 3,2 % меньше [3].

Аналогичную закономерность наблюдали при анализе массы полупотрошенных и потрошенных тушек перепелов, которая в опытной группе была значимо выше, чем у птиц в контроле, на 10,5 % и 13,1 % ( $p < 0,05$ ) и составляла соответственно 203,80 г и 189,30 г. Выход мяса полупотрошенной тушки в опытной группе находился на уровне 84,62 %, что на 5,9 % выше, чем в контрольной, для потрошенной тушки величины этих показателей составляли соответственно 78,60 % и 8,4 %. На наш взгляд, одна из причин повышения интенсивности роста и мясной продуктивности перепелов – оптимизация антиоксидантного статуса, отражающего эффективность адаптации птицы к стрессовым условиям.

Изучение активности антиоксидантных ферментов крови перепелов опытной и контрольной групп свидетельствует о позитивном влиянии комплексного исполь-

**Табл. 2. Влияние комплексного использования пробиотика и цеолита на концентрацию малонового диальдегида и антиоксидантную активность плазмы крови перепелов (медиана (25-й; 75-й процентиль),  $n=5$ )**

| Возраст, сут. | Концентрация малонового диальдегида в сыворотке, мкмоль/л |                    | Антиокислительная активность плазмы, % |                       |
|---------------|-----------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------|-----------------------|
|               | контроль                                                  | опыт               | контроль                               | опыт                  |
| 1             | 9,83 (8,95; 9,90)                                         |                    | 25,30 (24,87; 25,69)                   |                       |
| 21            | 7,29 (6,98; 7,36)                                         | 6,98 (6,54; 7,15)  | 34,82 (34,02; 35,12)                   | 37,43 (37,12; 37,56)* |
| 42            | 5,85 (5,53; 5,92)                                         | 5,18 (4,96; 5,65)* | 51,79 (50,96; 51,82)                   | 62,50 (62,13; 62,97)* |

\*Различия с контрольной группой статистически значимы при  $p < 0,05$ .

зования культуры *E. faecium* RCAM05160 и синтетического цеолита типа NaX на процессы антирадикальной защиты. При этом важно отметить, что различия между контрольной и опытной группой в конце наблюдения были статистически значимы в отношении всех исследуемых показателей антиоксидантного статуса, тогда как оценка возрастной динамики активности антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутазы, каталазы, церулоплазмينا) не показала статистически значимых различий. Авторы ряда исследований полагают, что отсутствие возрастной динамики в показателях ферментативного звена антиоксидантной защиты в организме служат доказательством того, что ее уровень возрастает в основном благодаря неферментативному звену [15].

Одним из возможных факторов увеличения активности антиоксидантных ферментов и общей антиокислительной активности плазмы крови может быть оптимизация минерального статуса организма [16, 17]. Активаторами супероксиддисмутазы, каталазы, церулоплазмينا и других ферментов антиоксидантной защиты служат различные микроэлементы. Увеличение их уровня в сыворотке крови перепелов, получавших комплексную кормовую добавку, может быть закономерной причиной возрастания активности этих ферментов, что требует дальнейшего исследования механизмов действия пробиотика и цеолита в комплексе. Авторы предполагают, что такой результат связан прежде всего с воздействием исследуемых кормовых добавок на процессы усвояемости компонентов корма [3], в том числе минеральных элементов, которые служат активаторами ферментов антиоксидантной защиты организма.

Важно отметить, что наблюдаемый эффект может быть вызван влиянием и пробиотика, и сорбента одновременно. Исследования различных штаммов *E. faecium* показывают суммарное увеличение конверсии корма и некоторых минеральных элементов [18]. Цеолит в качестве минерального сорбента может вызывать изменения количественного и качественного состава кишечной микрофлоры, а также структуры слизистой оболочки кишечника и, следовательно, влиять на эффективность всасывания нутриентов [19, 20].

Результаты, полученные авторами, подтверждаются исследованиями, проведенными с целью изучения эффективности пробиотических препаратов, содержащих различные штаммы *E. faecium*. Так, было показано, что пробиотический препарат, содержащий живые культуры *E. faecium*, уменьшает показатели перекисного окисления липидов и содержание малонового диальдегида, при этом наблюдается также снижение и активности каталазы [21]. Наблюдаемый в нашем исследовании эффект может быть обусловлен присутствием в составе описанной кормовой добавки не только пробиотика, но и небактериальных компонентов. Однако следует отметить, что механизм наблюдаемой оптимизации антиоксидантного статуса птиц требует более детального изучения.

**Выводы.** Комплексное использование культуры *E. faecium* RCAM05160 и синтетического цеолита типа NaX при выращивании перепелов оказывает позитивное влияние на процессы антиоксидантной защиты и, как следствие, рост и продуктивность птицы. При этом активность супероксиддисмутазы в конце периода исследований была выше, чем у перепелов, потреблявших только основной рацион, на 7,0 %, каталазы – на 30,2 %, церулоплазмينا – на 33,5 %.

Изменение активности антиоксидантных ферментов закономерно отразилось на концентрации в сыворотке крови продуктов перекисного окисления

липидов и уровне общей антиокислительной активности плазмы крови перепелов. Так, концентрация малонового диальдегида на 42-е сутки эксперимента в опытной группе была на 13,6 % ниже, а общая антиокислительная активность – на 20,7 % выше.

При контрольном убое у птицы, потреблявшей изучаемые кормовые добавки, отмечены более высокие медианные значения массы потрошенной и полупотрошенной тушки – 189,30 г и 203,80 г соответственно, что на 17,8 % и 24,0 % выше, чем в контроле.

Таким образом, результаты исследования открывают перспективы для использования культуры *E. faecium* RCAM05160 и синтетического цеолита в составе рациона птиц с целью оптимизации метаболических процессов в организме птицы.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства сельского хозяйства Российской Федерации № госрегистрации 1022071200014-6-4.5.1

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

Эксперименты с животными проводили в соответствии с инструкциями и рекомендациями Russian Regulations, 1987 (Order № 755 on 12.08.1977 the USSR Ministry of Health) and «The Guide for Care and Use of Laboratory Animals (National Academy Press Washington, D.C. 1996)». Протоколы по использованию животных были одобрены комиссией по биоэтике ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ (приказ № 429 от 18 октября 2021 г.).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов

#### Литература.

1. *Oxidative stress in poultry production* / O. E. Oke, A. A. Oluwaseun, A. Oni, et al. // *Poultry Science*. 2024. Vol. 103 (2). 104003. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579124005820?via%3Di-hub> (дата обращения: 05.10.2024). doi: 10.1016/j.psj.2024.104003.
2. *Кормовая добавка для профилактики микотоксикозов птицы «Цеотон» и способ ее скармливания* / В. И. Шайкин, А. М. Шадрин, О. А. Донченко и др. Патент РФ № 2262863, 27.10.2005.
3. *Комплексное использование пробиотика и цеолита для повышения мясной продуктивности перепелов* / В. В. Герасименко, М. В. Сычева, А. А. Еремина и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2023. № 11. С. 70–74. doi: 10.53859/02352451\_2023\_37\_11\_70.
4. *A catalog of microbial genes and metagenome-assembled genomes from the quail gut microbiome* / X. Xiong, Y. Rao, J. Ma, et al. // *Poultry Science*. 2024. Vol. 102 (10). 102931. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579123004509?via%3Di-hub> (дата обращения: 05.10.2024). doi: 10.1016/j.psj.2023.102931.
5. Hashemitabar S. H., Hosseini S. A. *The comparative effects of probiotics on growth, antioxidant indices and intestinal histomorphology of broilers under heat stress condition* // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14 (1). 23471. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-66301-9> (дата обращения: 05.10.2024). doi: 10.1038/s41598-024-66301-9.
6. Кичеева А. Г., Терещенко В. А. *Перспективы использования природных глинистых минералов в животноводстве (обзор)* // *Аграрный научный журнал*. 2021. № 12. С. 88–93. doi: 10.28983/asj.y2021i12pp88-93.

7. Определение эффективной дозы синтетического цеолита типа NaX при введении в рацион птицы / В. В. Герасименко, Н. В. Семькина, А. Г. Гончаров и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. № 12. С. 55–58. doi: 10.53859/02352451\_2022\_36\_12\_55.
8. Береговая Н. Г., Герасименко В. В. Влияние цеолита типа NaX на антиоксидантный статус и неспецифическую резистентность организма // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация*. 2018. № 1. С. 41–52.
9. Методика проведения научных и производственных исследований по кормлению сельскохозяйственной птицы / И. А. Егоров, В. А. Манукян, Т. Н. Ленкова и др. Сергиев Посад: ВНИТИП, 2013. 52 с.
10. Фисинин В. И., Егоров И. А., Драганов И. Ф. Кормление сельскохозяйственной птицы. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2011. 337 с.
11. Методы ветеринарной клинической лабораторной диагностики / под ред. И. П. Кондрахина. М.: КолосС, 2004. 519 с.
12. Андреева Л. И., Кожемякин Л. А., Кишкун А. А. Модификация метода определения перекисей липидов в тесте с тиобарбитуровой кислотой // *Лабораторное дело*. 1988. № 11. С. 41–43.
13. Оценка антиокислительной активности плазмы крови с применением желточных липопротеидов / Г. И. Клебанов, И. В. Бабенкова, Ю. О. Теселкин и др. // *Лабораторное дело*. 1988. № 5. С. 59–62.
14. Effects of resveratrol on growth performance, intestinal development, and antioxidant status of broilers under heat stress/ C. Wang, F. Zhao, Z. Li, et al. // *Animals*. 2021. Vol. 11 (5). 1427. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/11/5/1427> (дата обращения: 05.10.2024). doi: 10.3390/ani11051427.
15. Возрастные изменения биохимических и клинических показателей крови цыплят-бройлеров / Н. В. Боголюбова, Р. В. Некрасов, Р. А. Рыков и др. // *Ветеринария и кормление*. 2024. № 3. С. 27–33. doi: 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2024-3-4.
16. Котарев В. И., Денисенко Л. И., Шипилов В. В. Динамика показателей крови молодняка кур яичного направления на фоне применения комплексной пробиотической добавки // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. № 1. С. 188–192. doi: 10.18286/1816-4501-2021-1-188-192.
17. Губайдуллина И. З., Вершинина И. А., Иванничева А. П. Влияние различных форм хрома на биохимические показатели, антиоксидантный статус организма и микробиологический состав кишечника цыплят-бройлеров // *Животноводство и кормопроизводство*. 2023. № 1. С. 215–227. doi: 10.33284/2658-3135-106-1-215.
18. *Enterococcus faecium* modulates the gut microbiota of broilers and enhances phosphorus absorption and utilization / W. Wang, H. Cai, A. Zhang, et al. // *Animals*. 2020. Vol. 10. P. 12–32. doi: 10.3390/ani10071232.
19. Effect of feeding Transcarpathian zeolite on gastrointestinal morphology and function in broiler chickens / A. Wawrzyniak, M. Popielarz (Kapica), D. Stępień-Pyśniak, et al. // *Revista Brasileira de ciência avícola*. 2017. Vol. 19. P. 737–746. doi: 10.1590/1806-9061-2016-0360.
20. Effect of zeolite on small intestine microbiota of broiler chickens: a case study / S. Le Gall-David, V. Meuric, G. Benzoni, et al. // *Food and Nutrition Sciences*. 2017. Vol. 8. P. 163–188. doi: 10.4236/fns.2017.81011.
21. The effect of a probiotic containing *Enterococcus faecium* DSM7134 on redox and biochemical parameters in chicken blood / O. Katarzyna, M. Krauze, E. Cholewińska, et al. // *Annals of Animal Science*. 2017. Vol. 17 (4). P. 1075–1088. doi: 10.1515/aos-2016-0097.

Поступила в редакцию 11.10.2024  
После доработки 04.11.2024  
Принята к публикации 19.11.2024

## КОНСТИТУЦИОННЫЕ КОНСТАНТЫ КАК БИОМАРКЕРЫ СОСТОЯНИЯ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ ЖИВОТНЫХ

© 2024 г. **И. Ю. Ездакова**, доктор биологических наук,  
**О. В. Капустина**, доктор ветеринарных наук, **А. Г. Григорьев**

Федеральный научный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной ветеринарии имени К. И. Скрябина и Я. Р. Коваленко Российской академии наук,  
109428, Москва, Рязанский просп., 24/1  
E-mail: ezdakova.i@yiv.ru

*Корреляционные константы – это количественные показатели взаимосвязи структурных компонентов иммунной системы. Изменение их величины и направленности свидетельствует о нестабильности работы иммунной системы, приводящей к развитию заболевания. Цель исследования – определение конституционных констант иммунологических показателей (Нф/Лф и IgG/IgM) как биомаркеров иммуногенеза при экспериментальном заражении овец вирусом лейкоза крупного рогатого скота. Уровень иммуноглобулинов в сыворотке крови овец определяли методом простой радиальной иммунодиффузии с поли- и моноклональными антителами к IgM и IgG, относительное количество нейтрофилов и лимфоцитов – по стандартной методике. Для оценки взаимосвязи между показателями использовали коэффициент корреляции Пирсона. Силу корреляции оценивали по шкале Чеддока. На всех этапах исследования сохранялась отрицательная корреляция между числом нейтрофилов и лимфоцитов, хотя ее значения имели нестабильный характер. Снижение силы корреляции между уровнями нейтрофилов и лимфоцитов отмечали только на 3-и сутки после заражения, затем к 7 месяцам иммуногенеза, что могло быть связано с увеличением числа нейтрофилов и развитием бактериальных осложнений. Конституционная константа IgG/IgM изменялась с 1-х суток развития иммунного ответа. Достоверное уменьшение силы корреляции произошло в период с 7-х до 14-х суток после иммунизации. Нестабильный характер динамики взаимосвязи между «ранними» и «поздними» иммуноглобулинами показывает, как патоген блокирует синтез вируснейтрализующих антител, что может привести к развитию иммунопатологии. Но при высокой отрицательной корреляции ( $r = -0,9$ ) между показателями нейтрофилов и лимфоцитов сохраняются адаптивные возможности иммунной системы, так как именно эта корреляционная константа приоритетна при вирусных инфекциях. Проведенные исследования показали перспективность использования конституционных констант в качестве биомаркеров различных этапов иммуногенеза.*

## CONSTITUTIONAL CONSTANTS AS BIOMARKERS OF THE STATE IMMUNE SYSTEM OF ANIMAL

**I. Yu. Ezdakova, O. V. Kapustina, A. G. Grigoriev**

Federal Research Center – All-Russian Research Institute of Experimental Veterinary  
Medicine named K. I. Scriabin and Ya. R. Kovalenko of the Russian Academy of Sciences,  
109428, Moskva, Ryazanskii prosp., 24/1  
E-mail: ezdakova.i@yiv.ru

*Correlation constants are quantitative indicators of the relationship between the structural components of the immune system. A change in their magnitude and orientation is an indicator of the instability of the immune system, leading to the development of the disease. The purpose of this study was to determine the constitutional constants of immunological parameters during experimental BLV infection of sheep as biomarkers of immunogenesis. The level of immunoglobulins in blood serum was determined by simple radial immunodiffusion with poly- and monoclonal antibodies to IgM and IgG. Determination of the relative number of neutrophils and lymphocytes in the blood of sheep was carried out according to standard methods. To assess the relationship between indicators, the Pearson correlation coefficient was used. The strength of correlation was assessed according to the Chaddock scale. At all stages of the study, a negative correlation between the number of neutrophils and lymphocytes remained, although its values were unstable. A decrease in the strength of the correlation between the parameters of neutrophils and lymphocytes was noted only on the 3rd day after infection, then on the 7th month of immunogenesis, which could be associated with an increase in the number of neutrophils and the development of bacterial complications. It was established that the constitutional constant of IgG/IgM changed from the 1st day of the immune response. A significant decrease in the strength of the correlation occurred in the period from 7 to 14 days of the immune response. The unstable of the dynamics of the relationship between “early” and “late” immunoglobulins shows how the pathogen blocks the synthesis of virus-neutralizing antibodies, which can lead to the development of immunopathology. But with a high negative correlation ( $r = -0.7-0.9$ ) between the indicators of neutrophils and lymphocytes, the adaptive capabilities of the immune system are preserved, since it is this correlation constant that is a priority in viral infections. The conducted studies showed the promise of using constitutional constants as biomarkers of various stages of immunogenesis.*

**Ключевые слова:** конституционные константы, биомаркеры, нейтрофилы, лимфоциты, иммуноглобулины.

**Keywords:** constitutional constants, biomarkers, neutrophils, lymphocytes, immunoglobulins.

Иммунная система представляет собой совокупность лимфоидных органов, иммунокомпетентных клеток и молекул, которые находятся в постоянном взаимодействии со всеми системами организма. Известно, что в иммунной системе существуют определенные корреляционные константы (стойкие прямые и обратные взаимосвязи

иммунологических показателей), которые характеризуют функциональное состояние иммунной системы в онто- и иммуногенезе [1]. Определение таких констант значительно расширяет диагностические, прогностические и лечебные возможности, что позволяет использовать их в качестве потенциальных биомаркеров состояния иммунной системы.

Следует отметить, что функциональные связи, определяемые как сильные устойчивые корреляции, играют важную роль в нормальном функционировании различных систем организма, поскольку они характеризуют сбалансированность работы компонентов таких систем [2, 3, 4]. В предыдущих исследованиях с целью повышения диагностической значимости иммунологических показателей были определены корреляционные константы (КК), которые можно использовать в качестве биомаркеров степени активации иммунной системы организма животных [5]. Это положительные устойчивые коэффициенты корреляции между показателями IgG/IgM и отрицательная корреляция между параметрами нейтрофилов и лимфоцитов [6]. На основании корреляционного анализа уровней основных изотипов иммуноглобулинов у клинически здоровых животных на различных этапах онтогенеза была показана устойчивая положительная корреляция между IgG и IgM у всех исследуемых групп животных. Корреляционная пара IgG/IgM может служить биомаркером здоровья животного и качества иммунопрофилактики, так как изменение силы и направленности взаимосвязи между IgM-антителами первичного и IgG-антителами вторичного иммунного ответа свидетельствует о нарушении иммунореактивности организма.

Иммунная система (ИС), постоянно испытывающая функциональную нагрузку, не может одновременно активировать врожденные и адаптивные механизмы иммунного ответа. Вначале включаются естественные неспецифические клетки, к числу которых относятся нейтрофилы, затем начинается процесс специфического отбора лимфоцитов. Этот процесс отражает отрицательная корреляция указанных структурных компонентов иммунной системы. Увеличение или уменьшение, смена направленности такой взаимосвязи характеризует напряженность иммунной системы, которая при хроническом процессе может привести к формированию иммунопатологии.

В то же время, несмотря на наличие многочисленных исследований по проблемам лейкоза крупного рогатого скота, на сегодняшний день трудно ответить на вопросы, связанные с иммунопатогенезом и существованием каких-либо маркеров хронической инфекции.

Цель исследования – определение взаимосвязи между количеством нейтрофилов и лимфоцитов (Нф/Лф) и концентрациями иммуноглобулинов (IgM/ IgG) на разных стадиях развития инфекционного процесса для изучения патогенеза лейкоза овец.

**Методика.** Для заражения овец ( $n=10$ ) использовали кровь от BLV-положительной коровы ( $16 \times 10^3$  лейкоцитов/мкл). Образцы крови овец отбирали из яремной вены до заражения и после него на 1, 3, 5, 7, 10, 12, 14 и 20-е сутки. Затем на 7, 15, 18 и 21-й месяцы после экспериментального заражения. Для определения концентрации иммуноглобулинов классов М и G в сыворотке крови овец использовали метод простой радиальной иммунодиффузии с поли- и моноклональными антителами к Ig. Относительное количество нейтрофилов и лимфоцитов в крови овец определяли по стандартной методике. Для анализа взаимосвязей определяли коэффициенты корреляции, которые позволяют оценить степень линейной связи между двумя переменными. Так, коэффициент корреляции больше 0,8 показывает функциональную связь между двумя иммунологическими параметрами. Оценку взаимосвязи между показателями осуществляли на основе коэффициента корреляции Пирсона, статистически значимым считали  $p < 0,05$ . Силу корреляции оценивали по шкале Чеддока: отсутствие связи – 0; слабая –  $r=0,1 \dots 0,3$ ; умеренная –  $r=0,3 \dots 0,5$ ; заметная –  $r=0,5 \dots 0,7$ ; высокая –

$r=0,7 \dots 0,9$ ; весьма высокая  $r=0,9 \dots 1,0$ . Статистическую обработку данных проводили с использованием программ Excel (Microsoft) и Statistica 8.0.

**Результаты и обсуждение.** Вирус лейкоза КРС (BLV) после этапа острой инфекции способен персистировать в организме в неинфекционной форме, в какой-то момент времени, например при иммуносупрессии, он может реактивироваться с образованием новых инфекционных вирусных частиц, что отражается в нестабильных параметрах иммунного ответа. Первые сутки острого инфекционного процесса характеризуются напряженностью иммунной системы и уменьшением конституционных констант Нф/Лф, а также отсутствием взаимосвязи между уровнями IgG и IgM ( $r=0,02$ ). На всех этапах исследования сохранялась отрицательная корреляция между числом нейтрофилов и лимфоцитов, хотя ее значения имели нестабильный характер (рис. 1). Популяция нейтрофилов, их про- и противовоспалительное действие играет неоднозначную роль в развитии лейкоза. При хроническом течении заболевания рост числа нейтрофилов и уменьшение количества лимфоцитов может ассоциироваться с неблагоприятным прогнозом [7]. Взаимосвязь величин этих показателей может служить потенциальным биомаркером прогноза течения инфекционного процесса.

На 3-и сутки иммунного ответа установлено уменьшение корреляции между нейтрофилами и лимфоцитами ( $r=-0,46$ ) по сравнению с фоновыми значениями ( $r=-0,66$ ). Вероятно, в этот период клетки врожденной и адаптивной иммунной системы испытывают сильную функциональную нагрузку, характерную для формирования адекватного ответа на инфекцию. Затем в течение 20 суток сила корреляции повышается. Через 7 месяцев после экспериментального заражения животных установлено ее уменьшение, что могло быть связано с увеличением числа нейтрофилов и развитием бактериальных осложнений при хронизации вирусной инфекции.

В течение второго года наблюдений корреляционная константа Нф/Лф демонстрировала заметную и высокую обратную функциональную связь между количеством нейтрофилов и лимфоцитов, что свидетельствует о стабильном состоянии иммунной системы. Таким образом, во все сроки наблюдений за экспериментально инфицированными животными общее число нейтрофилов было связано обратной корреляцией с количеством лимфоцитов. Возможно, именно эта функциональная связь, которая не изменяла направленности в течение 21 месяца (срок наблюдений) хронической вирусной инфекции у овец, способствовала адекватному иммунному ответу.

Имуноглобулины выполняют различные функции, и их исключительная вариабельность обусловлена мно-

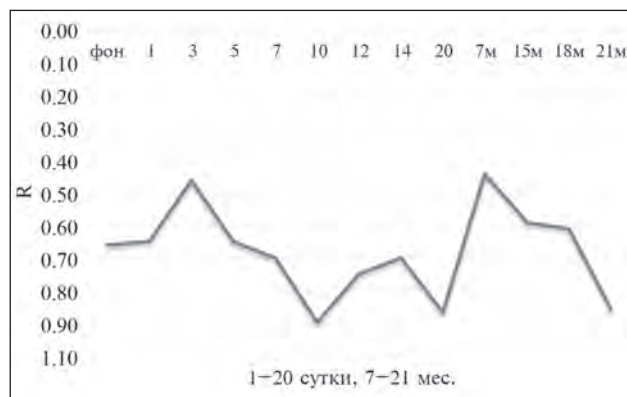


Рис. 1. Динамика конституционных констант Нф/Лф в процессе иммунного ответа.

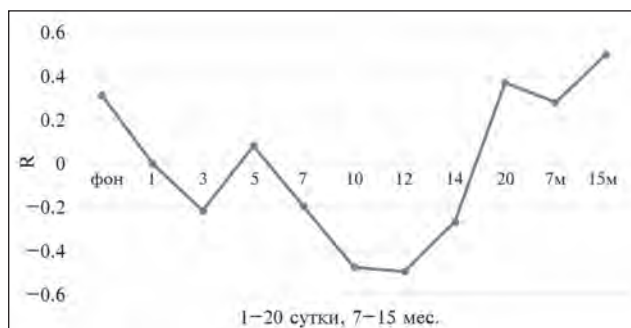


Рис. 2. Динамика конституционных констант IgG/IgM в процессе иммунного ответа: —●— IgG/IgM.

жественностью генов, соматическими рекомбинациями и мутациями. При первичном контакте с чужеродным антигеном в сыворотке крови повышается концентрация иммуноглобулинов класса М (IgM). В процессе иммунного ответа происходит переключение изотипов иммуноглобулинов и изменение преобладающих антител в сторону специфических Ig G. Рассматривая взаимосвязь данных классов антител в динамике, а не отдельные их показатели, мы получаем комплексную информацию о механизмах формирования иммунного ответа.

Сила корреляции IgG/IgM изменялась с 1-х суток иммунного ответа (рис. 2). При этом на 1–5-е сутки после экспериментального заражения BLV связь между Ig отсутствовала. Затем она изменила свою направленность, наиболее заметная обратная корреляция была зарегистрирована на 10–12-е сутки иммуногенеза. С 20-х суток иммунного ответа корреляция стала умеренно положительной ( $r=0,37$ ), к 15-му месяцу — заметно положительной ( $r=0,5$ ). Хотя при вирусных инфекциях приоритетным считается клеточный иммунитет, антитела играют значимую роль в ограничении распространения вируса.

В наших предыдущих исследованиях было показано, что гуморальный иммунный ответ развивается вскоре после инфицирования животных к 1–8-й неделе иммунного ответа, а динамика показателей IgG и IgM в сыворотке крови крупного рогатого скота носит перемежающийся (волнообразный) характер [8]. Это согласуется с рассматриваемыми результатами исследований, проведенных на овцах. Отсутствие взаимосвязи и смена направленности корреляционной константы IgG/IgM показывают несогласованность синтеза «ранних» и «поздних» антител и риск развития иммунопатологического процесса. Но при сильной отрицательной корреляции между количеством нейтрофилов и лимфоцитов сохраняются адаптивные возможности иммунной системы, так как именно эта корреляционная константа приоритетна при вирусных инфекциях. Изменения в экспрессии генов вируса лейкоза крупного рогатого скота обуславливают его сложный цикл персистенции в клетках организма животных. Интенсивность вирусной репликации при хронической инфекции во многом зависит от состояния иммунной системы. В первые 20 дней иммунного ответа структурные компоненты ИС испытывают максимальную нагрузку, которая отражается на изменении силы и направленности конституционных констант. На 3-и сутки после экспериментального заражения BLV зарегистрировано синхронное уменьшение взаимосвязей Нф/Лф и IgG/IgM. На ранней стадии инфекции происходит распознавание вирусных антигенов дендритными клетками, макрофагами, а также нейтрофилами, находящимися в подкожных тканях, которые с помощью цитокинов активируют лимфоциты для индукции специфического иммунного

ответа. В процессе развития инфекции включаются компенсаторные реакции, что отражается на увеличении корреляционной связи между количеством нейтрофилов и лимфоцитов.

В предыдущих исследованиях была установлена стабильная функциональная связь между показателями количества нейтрофилов и лимфоцитов ( $r=-0,89$ ;  $r=-1,0$ ) в крови крупного рогатого скота и овец, которую можно назвать постоянной величиной (конституционной константой) адекватных реакций иммунной системы в норме [6]. Модуляция конституционной константы Нф/Лф указывает на бактериальную (увеличение числа нейтрофилов при уменьшении лимфоцитов) или вирусную (уменьшение нейтрофилов при увеличении лимфоцитов) инфекцию. Увеличение коэффициента корреляции ( $r=-0,9$ ) к 21-му месяцу хронической вирусной инфекции показало восстановление функциональной связи между параметрами нейтрофилов и лимфоцитов. Похожий алгоритм иммунных реакций отражает конституционная константа IgG/IgM. Корреляционная связь между уровнем первичных антител IgM и специфических иммуноглобулинов класса G в процессе адекватного иммунного ответа должна быть положительной, хотя не такой сильной, как корреляция между показателями нейтрофилов и лимфоцитов [5]. При экспериментальном заражении BLV овец величина конституционной константы IgG/IgM имела нестабильный профиль, который характеризовался отсутствием ( $r=0,02$ ) и сменой направленности ( $r=-0,5$ ) корреляции между основными показателями гуморального звена иммунной системы. Это может быть обусловлено способностью вируса лейкоза крупного рогатого скота непрерывно реплицироваться в инфицированных лимфоцитах овец, вызывая тем самым индукцию иммунопатологического В-клеточного ответа. Увеличение силы положительной корреляции IgG/IgM к 15-му месяцу указывает на развитие компенсаторных реакций для стабилизации иммуногенеза при хронической вирусной инфекции.

**Выводы.** При экспериментальном заражении вирусом лейкоза крупного рогатого скота овец корреляционные связи между количеством нейтрофилов и лимфоцитов в крови животных стабильно отрицательные, а их сила изменяется в течение срока наблюдений.

Результаты анализа модуляции конституционной константы IgG/IgM позволяют сделать вывод о неблагоприятном влиянии BLV на механизмы формирования защитных антител.

Величины корреляционных констант последовательно отражают механизмы иммуногенеза и могут быть использованы в качестве биомаркеров состояния иммунной системы животных в онто- и иммуногенезе.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБНУ ФНЦ ВИЭВ РАН.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

Порядок исследования был одобрен Комиссией по биоэтике ФГБНУ ФНЦ ВИЭВ РАН (протокол № 1 от 20.01.24 г.).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Литература.

1. Михайленко А. А., Федотова Т. А. Роль корреляционных взаимосвязей в оценке функциональных возможностей иммунной системы // *Иммунология*. 2000. № 6. С. 59–61.

2. Экспрессия NKG2D цитотоксическими Т-лимфоцитами как возможный механизм иммуннопатогенеза геморрагической лихорадки с почечным синдромом / М. Ф. Иванов, И. П. Балмасова, А. В. Жестков и др. // Иммунология. 2023. № 1. С. 93–102. doi: 10.33029/0206-4952-2023-44-1-93-102.
3. Correlation analysis of the peripheral blood lymphocyte count and occurrence of pneumonia after lung transplantation / X. He, Z. Luo, Yi. Han, et al. // Transplant Immunology. 2023. Vol. 78. 101822. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0966327423000394> (дата обращения: 08.06.2024). doi: 10.1016/j.trim.2023.101822.
4. Correlation of different cellular assays to analyze T cell-related cytokine profiles in vitamin D3-supplemented patients with multiple sclerosis / L. Rolf, J. Smolders, J. Quweland, et al. // Molecular Immunology. 2019. Vol. 105. P. 198–204. doi: 10.1016/j.molimm.2018.12.001.
5. Взаимосвязи между показателями естественных антител, общих иммуноглобулинов и иммунокомпетентных клеток крови овец в процессе поствакцинального иммунного ответа / И. Ю. Ездакова, О. В. Капустина, А. Г. Григорьев и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2023. № 5. С. 69–72. doi: 10.31857/S2500262723050137.
6. Ezdakova I. Yu., Eremina M. A. Structure of correlative relationships between immunological parameters in cattle// Russian Agricultural Sciences. 2017. Vol. 43. No. 4. P. 322–325. doi: 10.3103/S1068367417040073.
7. Потанин М. П., Гущина Л. М., Мороз Л. А. Фенотипическая и функциональная гетерогенность субпопуляций нейтрофилов в норме и при патологии // Иммунология. 2019. № 5. С. 84–96. doi: 10.24411/0206-4952-2019-15009.
8. Выявление специфических антител классов G и M к вирусу лейкоза крупного рогатого скота в сыворотках крови / М. И. Гулюкин, О. В. Капустина, И. Ю. Ездакова и др. // Вопросы вирусологии. 2019. № 4. С. 173–177. doi: 10.36233/0507-4088-2019-64-4-173-177.

Поступила в редакцию 19.06.2024  
После доработки 26.08.2024  
Принята к публикации 20.11.2024

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

Авторам высылается журнал в электронном виде.

С аспирантов плата за публикацию не взимается.

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

123995, Москва,

ул. Бронная, д. 6, стр. 1,

тел.: +7 (495) 697-33-35;

и на сайте РАО: [www.rao.ru](http://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.