

ISSN 2500-2627

Номер 2

Март – Апрель 2025



РОССИЙСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ НАУКА

Научно-теоретический журнал



НАУКА

— 1727 —

Российская академия наук

РОССИЙСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ НАУКА

№ 2 2025 Март - Апрель

Журнал основан в январе 1936 г.

Выходит 6 раз в год

ISSN 2500-2627

*Журнал издается под руководством
Отделения сельскохозяйственных наук РАН*

Главный редактор

Я.П. Лобачевский академик РАН
доктор технических наук, профессор

Редакционная коллегия:

Василевич Ф.И., академик РАН, докт., вет. наук, проф., Гончаренко А.А., академик РАН, докт. с.-х. наук, проф., Гулюкин М.И., академик РАН, докт. вет. наук, проф., Дубенок Н.Н., академик РАН, докт. с.-х. наук, проф., Долженко В.И., академик РАН, докт. с.-х. наук, проф., Ерохин М.Н., академик РАН, докт. техн. наук, проф., Завалин А.А., академик РАН, докт. с.-х. наук, проф. (зам. главного редактора), Зиновьева Н. А., академик РАН, докт. биол. наук, проф., Косолапов В.М., академик РАН, докт. с.-х. наук, проф., Лисицын А.Б., академик РАН, докт. техн. наук, проф., Пивоваров В.Ф., академик РАН, докт. с.-х. наук, проф., Плугатарь Ю.В., член-корр. РАН, докт. с.-х. наук, Харченко П.Н. академик РАН, докт. биол. наук, проф., Цой Ю.А., член-корр. РАН, докт. техн. наук, проф.

Editor-in-chief Yakov P. Lobachevsky

EDITORIAL BOARD:

academician Russian Academy Sciences:

Vasilevich F.E., Goncharenko A.A., Gulyukin M.E., Dubenok N.N., Dolzhenko V.E, Erokhin M.N., Zavalin A.A., Zinov'eva N.A., Kosolapov V.M., Lisitsin A.B., Pivovarov V.F., Kharchenko P.N.

member-correspondents Russian Academy Sciences:

Plugatar Yu.V., Tsoi Yu.A.

Редактор М. Ю. Гаитов

E-mail: nsm2308@yandex.ru

Москва
ФГБУ «Издательство «Наука»

Земледелие и мелиорация

- Д. А. Иванов, С. В. Архипов, О. Н. Анциферова, К. С. Курпас**
Методологические аспекты прогнозирования урожайности озимой ржи на землях, выбывших из сельскохозяйственного оборота 3
- Л. П. Шаталина, Ю. Б. Анисимов, Ю. С. Мошкина, П. М. Лопухов, Е. Л. Калюжина**
Факторы, влияющие на засоренность яровой пшеницы в северной лесостепи Южного Урала 11

Растениеводство, защита и биотехнология растений

- А. А. Гончаренко, А. В. Макаров, Н. В. Цыганкова, В. Н. Точилин, Н. А. Клочко, М. С. Гончаренко, А. К. Костин, П. А. Плотников**
Интегральная оценка адаптивного потенциала сортов озимой ржи по технологическим признакам качества зерна 16
- Н. В. Емелева, Г. А. Баталова**
Оценка показателей экологической адаптивности перспективных линий ярового овса по признаку «Масса 1000 зерен» в Кировской области 22
- М. В. Илюшко, С. С. Гученко**
Создание удвоенных гаплоидов *Oryza sativa* L. с геном устойчивости риса к пирикулярриозу *Pi-b* на российском Дальнем Востоке 27
- А. П. Савва, Г. В. Волкова, С. С. Ковалев, В. А. Суворова, А. К. Меряхин**
Осеннее применение гербицида баллиста, МД на посевах озимой пшеницы в степной зоне Краснодарского края 32
- Т. Я. Прахова, И. И. Плужникова**
Засоренность посевов и продуктивность мака масличного в зависимости от использования гербицидной защиты 36

Зоотехния и ветеринария

- М. В. Кузнецова, Ю. С. Пospelова, В. С. Михайловская, Д. А. Кочергина**
Антибиотикоустойчивость и зоонозный потенциал штаммов *Escherichia coli*, выделенных в условиях птицеводческого агропромышленного комплекса 41
- А. К. Пискунов, Н. Ю. Саушкин, Ж. В. Самсонова**
Биологическая вариация уровня кортизола в молоке домашних коз в естественной среде обитания 50

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

- Я. П. Лобачевский, В. Ф. Федоренко, В. В. Кирсанов, Д. Ю. Павкин, С. В. Кирсанов**
Моделирование взаимодействия магнитных сборок левитирующей доильной платформы «Карусель» 54
- В. К. Каличкин, В. И. Усенко, А. А. Гаркуша, Д. С. Федоров, К. Ю. Максимович**
Интерпретируемая модель машинного обучения для прогнозирования урожайности яровой пшеницы 59

Хранение и переработка сельскохозяйственной продукции

- И. М. Меджидов, В. А. Харламов, Н. Н. Лой, Д. И. Титова**
Применение ЭПР-спектроскопии для идентификации факта облучения низкоэнергетическими электронами семян пшеницы 67

Agriculture and land reclamation

- D. A. Ivanov, S. V. Arkhipov, O. N. Antsiferova, K. S. Kurpas**
Methodological aspects of forecasting winter rye yield on lands withdrawn from agricultural cultivation 3
- L. P. Shatalina, Yu. B. Anisimov, Yu. S. Moshkina, P. M. Lopukhov, E. L. Kalyuzhina**
Factors, influencing the contamination of spring wheat in the northern forest-steppe of the Southern Urals 11

Crop production, protection and biotechnology of plants

- A. A. Goncharenko, A. V. Makarov, N. V. Tsygankova, V. N. Tochilin, N. A. Klochko, M. S. Goncharenko, A. K. Kostin, P. A. Plotnikov**
Integral assessment of the adaptive potential of winter rye varieties based on technological traits of grain quality 16
- N. V. Emeleva, G. A. Batalova**
Assessment of indicators of ecological plasticity and stability of promising spring oat lines based on the «1000 grain weight» in the Kirov region 22
- M. V. Ilyushko, S. S. Guchenko**
Creation of *Oryza sativa* L. doubled haploids with the *Pi-b* gene of rice blast resistance in the Russian Far East 27
- A. P. Savva, G. V. Volkova, S. S. Kovalev, V. A. Suvorova, A. K. Meryakhin**
Autumn application of the herbicide ballista, MD on winter wheat crops in the steppe zone of the Krasnodar territory 32
- T. Ya. Prakhova, I. I. Pluzhnikova**
Weed infestation and productivity of oil poppy depending on the use of herbicide protection 36

Animal science and veterinary medicine

- M. V. Kuznetsova, Yu. S. Pospelova, V. S. Mihailovskaya, D. A. Kochergina**
Antibiotic resistance and zoonotic potential of *Escherichia coli* strains isolated from poultry agro-industrial complex 41
- A. K. Piskunov, N. Yu. Saushkin, J. V. Samsonova**
Biological variation of cortisol level in milk of domestic goats in natural habitat 50

Mechanization, electrification, automation and digitalization

- Ya. P. Lobachevsky, V. F. Fedorenko, V. V. Kirsanov, D. Yu. Pavkin, S. V. Kirsanov**
Simulation of the interaction of magnetic assemblies of the "Karusel" levitating milking platform 54
- V. K. Kalichkin, V. I. Usenko, A. A. Garkusha, D. S. Fedorov, K. Yu. Maksimovich**
Interpretable machine learning model for spring wheat yield forecasting 59

Storage and processing of agricultural products

- I. M. Medzhidov, V. A. Kharlamov, N. N. Loy, D. I. Titova**
Application of EPR spectrometry for identifying the irradiation of wheat seeds with low-energy electrons 67

Земледелие и мелиорация

УДК 631.5;631.6;911.2

DOI 10.31857/S2500262725020016 EDN DDWZNC

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ РЖИ НА ЗЕМЛЯХ, ВЫБЫВШИХ ИЗ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ОБОРОТА

© 2025 г. Д. А. Иванов, доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН, С. В. Архипов, кандидат физико-математических наук, О. Н. Анциферова, кандидат сельскохозяйственных наук, К. С. Курпас

Федеральный исследовательский центр
«Почвенный институт им. В. В. Докучаева»,
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2
E-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

Исследования проводили с целью сравнения пригодности двух математических методов для процедуры прогнозирования урожайности озимой ржи в пределах заброшенных земель. Обучающим множеством для настройки прогностических моделей (регрессионного и нейросетевого анализа) послужили результаты длительного мониторинга урожайности озимой ржи на агроэкологической трансекте, заложенной в пределах конечно-моренного холма вблизи г. Тверь. Уравнения регрессии и перцептроны, полученные для разных климатических обстановок, описывающие зависимость урожайности ржи от ландшафтных условий, были применены для прогнозирования ее продуктивности в условиях заброшенных земель, расположенных в том же регионе. Разработанные прогнозы на основе регрессионных и нейросетевых моделей различаются только в деталях. Карты прогнозной урожайности озимой ржи, созданные на основе различных математических подходов, свидетельствуют о пригодности изучаемой территории для выращивания этой культуры, прогнозная средневзвешенная урожайность которой в ее пределах варьирует от 1,52 до 2,61 т/га. Оптимальное местоположение для размещения посевов ржи на основании карты, созданной по результатам прогнозирования, – ландшафт моренно-ледниковой равнины, а ареалы, неблагоприятные для выращивания этой культуры, располагаются в пределах заливной равнины и долины р. Волга. Для целей адаптивно-ландшафтного земледелия Нечерноземья необходимо рекомендовать совместное использование регрессионного и нейросетевого анализа для получения наиболее достоверных и информативных прогнозов. Создание карт прогнозной урожайности озимой ржи в пределах заброшенного участка на основе архивных данных имеет не только методологический, но и прикладной смысл, так как эта процедура позволяет оценить его пригодность к выращиванию культуры и тем самым ответить на вопрос о целесообразности проведения дорогостоящих экспедиционных исследований.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF FORECASTING WINTER RYE YIELD ON LANDS WITHDRAWN FROM AGRICULTURAL CULTIVATION

D. A. Ivanov, S. V. Arkhipov, O. N. Antsiferova, K. S. Kurpas

Federal Research Center «Dokuchaev Soil Science Institute»,
119017, Moskva, Pyzhevskii per., 7, str. 2
E-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

The study was conducted to compare the suitability of two mathematical methods for the procedure of forecasting the winter rye yield within abandoned lands. The training set for adjusting the forecast models (regression and neural network analyses) was the results of long-term monitoring of the winter rye yield on an agroecological transect laid within a terminal moraine hill near the city of Tver. The regression equations and perceptrons obtained for different climatic conditions, describing the dependence of rye yield on landscape conditions, were used to forecast its productivity in abandoned lands located in the same region. The developed forecasts based on regression and neural network models differ only in details. Maps of the forecast winter rye yield, created on the basis of various mathematical approaches, indicate the suitability of the studied territory for growing this crop – its forecast average weighted yield within its limits fluctuates from 1.52 to 2.61 t/ha. The optimal location for rye crops based on the map created based on the forecast results will be the landscape of the moraine-glacial plain, and areas unfavorable for growing this crop are located within the outwash plain and the Volga River valley. For the purposes of adaptive landscape farming in the Non-Black Earth Region, it is necessary to recommend the combined use of regression and neural network analysis to obtain the most reliable and informative forecasts. The creation of maps of the predicted yield of winter rye within the boundaries of an abandoned site based on the available archival data has not only a methodological but also an applied meaning, since this procedure allows us to assess its suitability for growing this crop and, thus, answer the question of the advisability of conducting expensive expeditionary research on it.

Ключевые слова: адаптивно-ландшафтные системы земледелия, мониторинг, прогноз, регрессионный анализ, нейронные сети.

Keywords: adaptive landscape farming systems, monitoring, forecast, regression analysis, neural networks.

Проблема заброшенных земель в Российской Федерации становится все более актуальной вследствие экономических, экологических и политических причин. Сокращение площадей обрабатываемых земель в нашей стране началось еще в начале двадцатого века, усилилось в советские годы, а при переходе к рыночной экономике приобрело значительные масштабы [1, 2, 3]. Согласно

постановлению Правительства Российской Федерации от 14 мая 2021 г. № 731, за период с 2010 по 2020 г. площадь земель сельскохозяйственного назначения уменьшилась на 17,6 млн га (на 4,6 %), также по состоянию на 2021 г. 19,4 млн га пашни (5,1 %) остаются неиспользуемыми. Во исполнение этого постановления была запущена «Государственная программа эффективного

вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения ...».

Главной задачей при вовлечении заброшенных земель в сельскохозяйственный оборот выступает оценка их потенциальных возможностей для выращивания культур. Она проводится на основе прогнозирования урожайности в условиях вовлекаемой в оборот территории, которая может иметь различный производственный потенциал как в технологическом и конъюнктурном, так и в агроэкологическом отношении. На основе оценки этого потенциала возможно выделение категорий заброшенных земель по перспективности их освоения – устойчиво эффективных, неустойчиво эффективных и неэффективных и разработка для них рекомендаций по дальнейшему использованию [4].

Прогнозирование урожайности растений – одна из наиболее сложных проблем научной агрономии. Традиционный ее прогноз, опирающийся на изучение состояния посевов в определенные сроки и влияния на них почвенно-ландшафтных и климатических условий, предназначен для оценки будущего урожая на конкретном поле [5]. Для количественного учета влияющих на его размеры факторов необходимо периодическое измерение параметров абиотической и биотической среды поля. Поэтому математические модели прогнозирования, работающие на прямом трудоемком измерении набора показателей состояния посевов и ландшафтных условий, пока не получили большого распространения в реальном производстве [6, 7, 8].

Сельскохозяйственное использование заброшенных земель необходимо вести на основе адаптивно-ландшафтных подходов, обеспечивающих экологически обусловленное размещение посевов культур, способствующее раскрытию биологического потенциала растений и затуханию деградационных процессов в ландшафте [9, 10]. В режиме адаптивно-ландшафтной системы земледелия (АЛСЗ) также требуется применение прогнозных процедур для адаптации агротехнических приемов к условиям агроландшафта. Они должны давать возможность строить пространственные модели изменения урожайности культуры в пределах реального поля (хозяйства), что позволит определять оптимальные местоположения посевов, а также характер использования агротехнических приемов в конкретных местоположениях [11, 12].

В основу проектирования системы земледелия положен учет метеоусловий [13]. Воздействие погоды на урожайность проявляется в сложной системе временных и пространственных факторов, во многом определяющих направленность динамических процессов в агроэкокомплексе [14]. При этом известно влияние ландшафтных условий на характер пространственного перераспределения термических ресурсов и сложность взаимодействия энергии и пространства в процессе образования растительной биомассы [15, 16]. Информация об особенностях адаптивных реакций растений на смену ландшафтной и климатической обстановки, главным инструментом выявления которых служит долговременный мониторинг их произрастания в пределах опытного участка, – основа разработки проекта АЛСЗ генетически однотипной с опытным полигоном территории. В ходе статистической обработки данных этого мониторинга можно выявить факторы, влияющие на продукционный процесс в различных территориальных выделах, и создать математические модели, описывающие адаптивные реакции растений на изменчивость природной среды. На основе таких моделей и ГИС-технологий можно спрогнозировать «поведение» культуры (ее урожай-

ность) в пределах заброшенных земель, расположенных в аналогичных с полигоном ландшафтных условиях на базе имеющихся на них архивных данных. Анализ карт прогнозной урожайности выявит места с различными агроэкологическими и технологическими потенциалами, что позволит решить вопрос о перспективах их освоения [17].

Наиболее актуально прогнозирование урожайности зерновых как важнейших культур для питания человека и животных. Учет мероприятий по выращиванию озимой ржи играет существенную роль в конструировании севооборотов, структуры посевных площадей и общей направленности проектирования АЛСЗ [18, 19]. Озимая рожь (*Secale cereale* L.) относится к озимым хлебам I группы и выступает одной из основных зерновых культур России. Из ржаной муки изготавливают различные сорта хлеба, отличающиеся калорийностью и хорошими вкусовыми качествами, содержащие полноценные белки и витамины. Более 80 % посевных площадей под этой культурой сосредоточено в Нечерноземье. Озимая рожь особенно важна для северных регионов страны, где преобладают малоплодородные кислые почвы, а погодные условия часто неблагоприятны для растениеводства. Во многих странах мира рожь в качестве первой культуры эффективно используют для освоения заброшенных и малоплодородных земель [20].

Цель исследований – выявить методологические аспекты прогнозирования урожайности озимой ржи различными математическими методами и оценить на основе прогноза пригодность заброшенных земель для ее выращивания.

Методика. В работе выполняли прогнозирование урожайности озимой ржи для условий ликвидированного хозяйства в Тверской области на основе результатов многолетнего (1998–2024 гг.) мониторинга урожайности озимой ржи сорта Дымка на агрополигоне «Губино» ВНИИМЗ и использования архивных данных по хозяйству. Агрополигон расположен в пределах конечно-моренного холма в 4-х км к востоку от г. Тверь. Холм, с относительной высотой 15 м, состоит из плоской вершины, северного, крутизной 2...3°, и южного (3...5°) склонов и межхолмных депрессий (северной и южной). Почвенный покров – вариация-мозаика дерново-подзолистых глееватых и глеевых почв, образованная на двучленных отложениях – песчано-супесчаная толща в пределах почвенного профиля на разной глубине подстилается легко и среднесуглинистой закамененной мореной. На юге полигона мощность кроющего флювиогляциального наноса местами превышает 1,5 м – почвы здесь преимущественно песчаные. На вершине и северном склоне холма поверхностные горизонты сложены супесью и иногда легким суглинком, мощность кроющего наноса здесь составляет около 1 м, а в депрессии на севере морена изредка выходит на дневную поверхность.

Наблюдения проводили на агроэкологической трансекте (физико-географическом профиле) – массиве, пересекающем все микро-ландшафтные позиции (подурочища) конечно-моренного холма: транзитно-аккумулятивные депрессии; транзитные средних частей склонов; элювиально-транзитные верхних частей склонов; элювиально-аккумулятивные вершины. Трансекта состоит из десяти параллельных полос-полей, каждая из которых занята определенной культурой. В пределах конкретной полосы антропогенное воздействие одинаково, что позволяет изучать влияние ландшафтных условий на культуры в наименее искаженном виде. Поля имеют ширину 7,2 м, длину – 1300 м. Урожайность ржи опреде-



Рис. 1. Карта-схема ландшафтного устройства ОПХ «Заветы Ленина».

ляли прямым комбайнированием в 120-и точках, регулярно расположенных вдоль трансекты на расстоянии 10 м одна от другой. Размер учетной площадки – 20 м². Под рожь удобрения не вносили (экстенсивная технология), за исключением подкормки в фазе кущения аммиачной селитрой в дозе по физической массе 1 ц/га. Для прогнозирования урожайности ржи исследовали влияние на нее факторов рельефа (абсолютной высоты, крутизны и кривизны поверхности, интенсивности солнечной радиации) и агрохимических свойств почвы (содержание гумуса (по Тюрину), подвижных фосфора и калия (по Кирсанову), pH_{KCl}), определяемых в ранее перечисленных точках опробования, так как только эти параметры были известны для территории прогнозного хозяйства (ОПХ «Заветы Ленина», Калининский район Тверской области). Для изучения влияния погодных условий на урожай культуры использовали архивные данные метеостанции г. Тверь.

Прогнозное хозяйство, где размещен агрополигон «Губино», прекратило хозяйственную деятельность в конце 90-х гг. и было юридически ликвидировано в 2006 г. Общая его площадь составляла 6312 га, сельхозугодий – 4923 га, в том числе пашни – 3394 га. Территория ОПХ в агроэкологическом отношении может быть поделена на две части (рис. 1).

Долинный ландшафт на севере хозяйства, занимающий 29,2 % его площади, образован русловыми процессами. Рельеф его плоский, осложненный останцами гривистых зандров, сложенных аллювиальными отложениями различного возраста и гранулометрического состава, занятых сосновым бором (I). Доминантная местность – современная долина р. Волги (IA). Субдоминантная местность – древнеаллювиальная (зандровая) плоская равнина, сложенная слоистыми песками различной крупности, на разной глубине подстилаемыми карбонатной мореной (IB).

Ландшафт моренно-ледниковой равнины, занимающий центральные и южные части хозяйства, образован водноледниковыми процессами (II). Он расположен на 70,8 % площади ОПХ. Рельеф его волнисто-увалистый, с перепадами высот до 30 м. Почвообразующие породы – двучлены разной мощности, образованные флювиогляциальными песками и супесями, подстилаемыми завалуненной карбонатной мореной. Ландшафт образован одной местностью волнисто-увалистой равнины, которая состоит из сложных урочищ моренных холмов (IIA). Доминантными подурочищами здесь служат транзитные геокомплексы, субдоминантными – транзитно-аккумулятивные геосистемы (IIB).

Агроэкологическая трансекта, расположенная в полосе перехода моренно-ледниковой равнины к долинному геокомплексу, генетически однотипна ландшафтам, составляющим территорию ОПХ.

На основании архивных материалов ОПХ и ВНИИМЗ (материалы обследования Тверского филиала института «ЦентрНИИГИПРОЗЕМ», Института «Тверьгипроводхоз», Государственного центра агрохимической службы «Тверской», данных по опытному участку ВНИИМЗ) были составлены цифровая модель рельефа (ЦМР) хозяйства, агрохимические картограммы, почвенные и ландшафтные карты. В пределах ОПХ выбрана 61 равномерно расположенная опорная точка, для каждой из которых определены все ранее перечисленные параметры.

В процессе исследований использовали кластерный, дисперсионный, регрессионный, нейросетевой методы статистического анализа, а также приемы описательной статистики. Пространственные исследования и результаты их визуализации выполнены в среде ГИС. Статистическую и графическую обработку данных мониторинга и прогноз осуществляли с использованием пакетов программ Statgraphic-19, Excel 19 и геоинформационной системы ArcGIS 10. Степень влияния ландшафтных факторов на урожайность ржи рассчитывали на основе метода Н. А. Плохинского [21] путем деления частной факториальной суммы квадратов на общую.

Результаты и обсуждение. Начальным этапом обработки массива данных долговременного мониторинга урожайности озимой ржи выступает его структуризация – выделение групп достаточно однородных значений. Ее выполняли методом кластеризации (рис. 2).

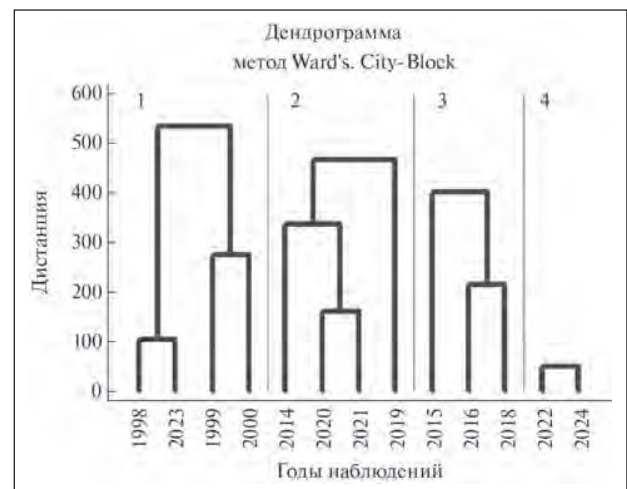


Рис. 2. Результаты кластеризации данных по урожайности озимой ржи на агроэкологической трансекте по годам наблюдения (1...4 номера кластеров).

Озимую рожь в период с 1998 по 2024 г. выращивали не каждый год – наблюдения за растениями осуществляли в 1998–2000 и 2014–2024 гг., при этом в 2017 г. произошла гибель посевов вследствие неудачной перезимовки. Годы наблюдений разделились на 4 кластера по характеру пространственной вариабельности урожайности культуры в пределах трансекты, которая отражает трансформацию климатической обстановки в пределах Нечерноземья. Характерно, что с увеличением номера кластера происходило усиление связи между входящими в него годами, что также, вероятно, обусловлено изменением климата.

На основе мультирегрессионного анализа для каждого кластера были выявлены закономерности формирования урожайности ржи в пределах трансекты. Уравнения регрессии показывают, как рассматриваемые факторы ландшафтной среды влияют на усредненные, в пределах кластера, величины урожайности культуры. Они могут служить моделями, на основе которых, с некоторой вероятностью, можно спрогнозировать урожайность культуры в пределах ОПХ для конкретной климатической обстановки.

Для условий первого кластера прогностическая регрессионная модель выглядит следующим образом:

$$\text{Урожай} = -96,497 + 0,812006_{\text{Высота}} + 0,0444461_{\text{Фосфор}} - 1,95195_{\text{Гумус}} \quad (1)$$

$$R^2 = 42,2 \%, p = 0,005.$$

Из восьми переменных, задействованных в расчете, достоверно на урожайность ржи в первом кластере влияли только три – положительное воздействие на размеры урожая оказывали высота местоположения и содержание подвижного фосфора в почве, тогда как содержание гумуса, который, как правило, концентрируется в понижениях, было обратно пропорционально величине результирующего показателя. Модель объясняет менее половины дисперсии урожайности – на ее основе можно воссоздать только самые общие черты пространственного распределения.

Прогноз урожайности для второго кластера можно рассчитать на основе следующего выражения:

$$\text{Урожай} = -74,0473 + 0,715856_{\text{Высота}} - 33,7848_{\text{Кривизна}} - 16,0661_{\text{Крутизна}} \quad (2)$$

$$R^2 = 26,6 \%, p = 0,008.$$

Из уравнения (2) видно, что максимальную урожайность озимой ржи в этих условиях можно получить на высоких, ровных и плоских поверхностях. Прогностическая способность модели невысока, агрохимические параметры почвы в ней не играют существенной роли, поэтому карты урожайности, созданные на основе этой модели, дают только самое общее представление о топографии посева ржи.

Пространственная вариабельность урожая в условиях третьего кластера описывается следующим уравнением:

$$\text{Урожай} = 27,9071 + 0,161179_{\text{Фосфор}} - 1,07745_{\text{Калий}} + 2,22754_{\text{Гумус}} \quad (3)$$

$$R^2 = 33,9 \%, p = 0,001.$$

Прогностическая поверхность урожая в этом случае зависит только от агрохимических свойств почвы – максимальный сбор зерна культуры будет зафиксиро-

ван на легких почвах с высоким содержанием гумуса и фосфора. Калий, маркирующий суглинистые породы, обратно пропорционально связан с урожайностью. Модель объясняет треть пространственной дисперсии урожая и может рассматриваться только как рекогносцировочная.

Для четвертого кластера прогностическое уравнение представлено в следующем виде:

$$\text{Урожай} = -830,149 + 0,650699_{\text{Высота}} + 0,00193236_{\text{Радиация}} + 5,8529_{\text{pH}} + 0,121126_{\text{Калий}} \quad (4)$$

$$R^2 = 41,0 \%, p = 0,000$$

Наибольшие урожаи ржи в условиях четвертого кластера можно получить на высоких, хорошо прогреваемых поверхностях, почвы которых имеют слабокислую реакцию и обогащены подвижным калием. Точность модели позволяет создать обзорную карту урожайности, что дает определенные возможности для оценки ресурсного потенциала территории.

В условиях первого кластера урожайность озимой



Рис. 3. Степени воздействия факторов на урожайность озимой ржи в условиях разных кластеров.

ржи в основном зависит от высоты местоположения, вторая группа лет характеризуется тем, что степень влияния варьирования гипсометрических отметок местности на урожай соизмерима с воздействием на него пестроты крутизны склонов (рис. 3). В условиях третьего кластера урожайность озимой ржи в основном зависит от гранулометрического состава почвы, а в четвертой совокупности лет характерно доминирование при продуцировании биомассы прогрева территории.

Отличительной особенностью моделей на основе нейросетевого анализа служит нелинейная структура зависимости выходной переменной от объясняющих факторов. Основным элементом сети выступает нейрон, на вход которого подается сигнал

$$Y_j = \sum w_i X_i + b_i \quad (5)$$

где w_i – весовые коэффициенты, b_i – смещение, X_i – входные сигналы.

Затем применяется функция активации $f(Y_j)$, преобразующая Y_j в выходной сигнал. В нашем случае производили нормализацию исходных данных на отрезок $[0,1]$ с использованием нормировки min-max, а функцией активации служила сигмоида

$$f(x) = 1/(1+\exp(-x)). \quad (6)$$

В процессе построения модели урожайности использовали перцептроны с одним или двумя скрытыми слоями. Эмпирически было проверено, что увеличение количества скрытых слоев ухудшает качество модели.

Программным средством реализации была выбрана статистическая среда R [22], выступающая безусловным лидером среди некоммерческих систем статистического анализа и имеющая огромное количество специализированных пакетов.

Для построения нейросетей применяли функцию `neuralnet` из одноименного пакета, в которой задавались параметры, задаваемые по умолчанию. Для вычисления весов w_i использовали метод устойчивого обратного распространения ошибок с обратным отслеживанием весов `grgor+`, а в качестве функционала ошибок вычислений выбирали сумму их квадратов.

Процесс выбора оптимальной сети реализован следующим образом. Исходная выборка с использованием датчика случайных чисел разбивается на обучающуюся (75 % элементов всей выборки) и тестирующую. Затем для каждой сети с одним или двумя скрытыми слоями происходит пятикратный процесс обучения на первой выборке. Он состоит в вычислении оптимальных весов w_i для каждого нейрона наиболее быстродействующим градиентным методом `grgor+`. Затем построенные сети применяются для прогнозирования выходного сигнала в тестирующей выборке и вычисляется MSE – средний квадрат отклонений наблюдаемых и предсказанных значений выходной переменной.

Оптимальной считается нейросеть, имеющая наименьшую величину среднего значения квадратов ошибок MSE по всем пяти итерациям. Параллельно с построением нейросетей для каждой случайной выборки строится многомерная регрессионная модель, которая только в единичных случаях показывает меньшую MSE. Обычно нейросеть имеет MSE в несколько раз меньше, чем у регрессии.

Последним этапом служит применение полученной таким образом оптимальной сети для всей выборки каждого кластера. Значения MSE для кластеров 1...4 составили 8,395; 23,424; 7,395; 5,681 соответственно.

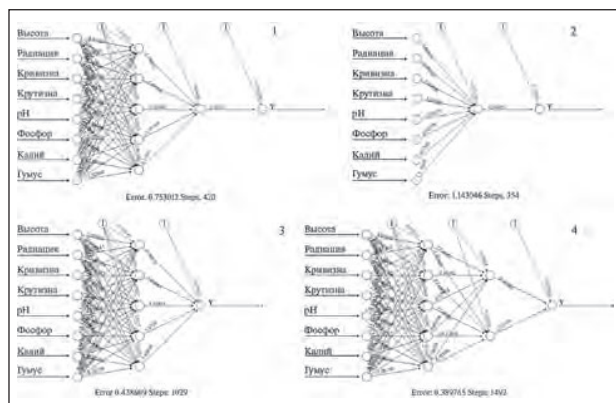


Рис. 4. Оптимальные нейросети для каждого кластера (1...4 – номера кластеров).

Дальнейшие шаги по построению оптимальной нейронной сети состоят в использовании альтернативных: функций активации, способов масштабирования, методов вычисления весов, функционалов ошибок, критериев для выбора оптимальной сети.

Оптимальные, наиболее полно описывающие пространственное колебание урожайности ржи, перцептроны, для каждого кластера имеют индивидуальные

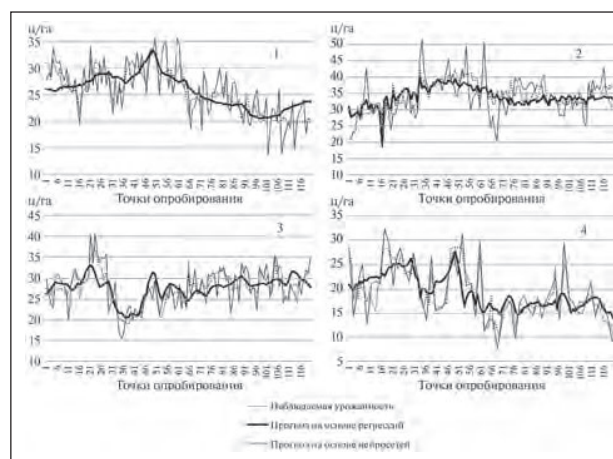


Рис. 5. Пространственная динамика реальной и прогнозной урожайности ржи в пределах агроэкологических трансект для разных кластеров (1...4 – номера кластеров).

черты (рис. 4). Так, нейросеть, описывающая урожайность во втором кластере, имеет относительно простую архитектуру и наибольшую ошибку, в то время как перцептрон для четвертого кластера наиболее сложен и точен. Это в некоторой степени совпадает с результатами регрессионного анализа.

Для сравнения прогностических возможностей разных математических подходов нами обоими методами были рассчитаны прогнозные значения урожайности на трансекте для каждого кластера. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что, во-первых, реальная урожайность культуры подвержена значительным пространственным колебаниям; во-вторых, регрессионные модели описывают изменения только пространственного тренда урожайности, в то время как модели, основанные на нейросетях, фиксируют и многие ее пространственные флуктуации (рис. 5).

Результаты корреляционного анализа между реальными и прогностическими данными для каждого кластера свидетельствуют о следующем: во-первых, коэффициенты корреляции достоверны для всех случаев (для 120 пар измерений достоверны коэффициенты со значениями $>0,16$); во-вторых, во всех кластерах совпадение реальных данных лучше с прогнозом, рассчитанным на основе нейросетевого анализа; в-третьих, условия кластеров сильно влияют на коэффициенты корреляции реальных данных и прогноза – для второго кластера оба математических метода дают наименее точный прогноз (рис. 6).

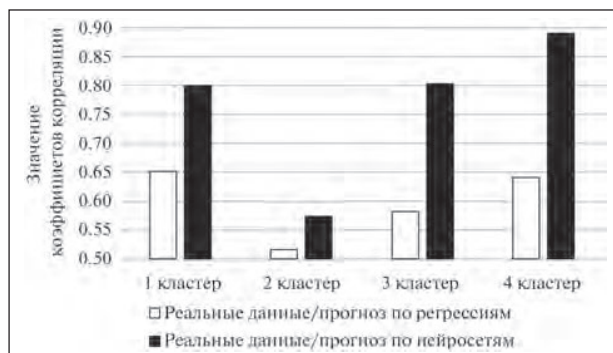


Рис. 6. Результаты кластерного анализа реальных и прогностических данных урожайности на трансекте.

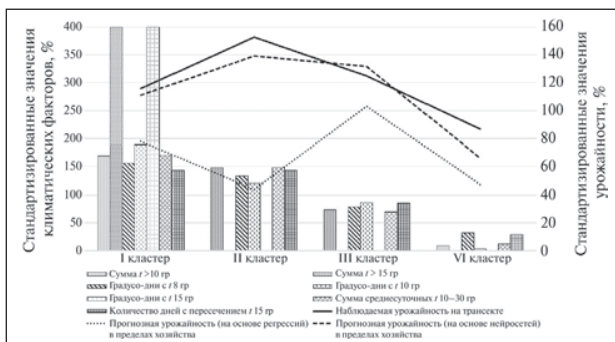


Рис. 7. Климатические условия, реальная (для трансекты) и прогностическая (для хозяйства) продуктивность ржи в условиях различных кластеров.

Использование архивных данных метеостанции позволило выявить индивидуальные черты агроклимата кластеров (рис. 7).

Анализ этого рисунка свидетельствует о том, что в климатическом отношении кластеры различаются в основном по количеству термических ресурсов – значения всех представленных параметров понижаются от первого кластера к четвертому. Максимальная урожайность на трансекте (3,4 т/га) зафиксирована для второго кластера, который можно определить как оптимальный по климатическим условиям. Для первого кластера, который можно назвать «жарким», средняя реальная урожайность ржи составляет 2,6 т/га, для третьего, «прохладного», кластера она равна 2,8 т/га, а для четвертого, «холодного», – 1,9 т/га. Средняя для всех лет наблюдений урожайность на трансекте равна 2,7 т/га. Все кластеры достоверно различаются по реальной урожайности ржи ($HC_{P,0.05} = 0,17$ т/га).

Средние значения прогностической урожайности для транsekты не отличаются от вышеприведенных (см. рис. 5).

Средняя прогнозная урожайность по хозяйству (для 61 точки), вычисленная на основе регрессионных уравнений 1...4, составляет 1,5 т/га, что существенно ниже урожайности по трансекте. Максимальная урожайность получена для третьего «прохладного» кластера (2,3 т/га), минимальная – для второго (1,0 т/га) и чет-

вертого (1,1 т/га) кластеров. В жаркую погоду регрессионная модель предсказывает среднюю урожайности по хозяйству, равную 1,7 т/га. Урожайность второго и четвертого кластеров достоверно не различается.

Среднее значение прогнозной урожайности по хозяйству, рассчитанное с использованием нейросетей, равно 2,5 т/га, что гораздо ближе к средней по трансекте. Максимальная урожайность прогнозируется для оптимального и «прохладного» кластеров (3,1 и 2,9 т/га соответственно). В жаркую погоду прогноз с использованием нейросетей предсказывает среднюю урожайность по хозяйству, равную 2,5 т/га, а в холодную – 1,5 т/га. Различия по всем кластерам достоверны ($НСР_{0,05} = 0,2$ т/га). В целом, временная динамика колебания реальной урожайности на трансекте ближе к предсказанной для условий хозяйства на основе нейросетей, чем регрессионных моделей.

На основе данных, полученных с использованием регрессионных и нейросетевых моделей, в среде ГИС были созданы карты средневзвешенной (по вероятности возникновения климатических обстановок) прогнозной урожайности хозяйства, которые показывают, что ее прогнозное значение для ОПХ при регрессионном моделировании ниже, чем рассчитанное на основе нейросетей (1,52 и 2,61 т/га соответственно). Были получены также карты коэффициентов вариабельности урожайности, анализ которых показал, что при регрессионном прогнозировании пространственная изменчивость урожая значительно выше (55,5 %), чем при нейросетевом (24,0 %). При сопоставлении этих карт сформированы синтетические карты условий культивирования ржи в пределах прогнозного хозяйства, рассчитанных на основе конкретного метода прогнозирования (рис. 8).

Сравнение их показывает, что способ прогнозирования не приводит к принципиальным различиям в закономерностях распределения ареалов пригодности для возделывания озимой ржи: расчеты на основе обоих методов показали, что благоприятными свойствами для выращивания культуры характеризуются незначительные по площади территории (от 4 до 19 %), в пределах которых можно ожидать наиболее высокую и устойчивую во времени продуктивность ржи (>3 т/га). Площади, характеризующиеся посредственными (с низкой, но устойчивой, либо с высокой, но неустойчивой



Рис. 8. Районирование территории хозяйства по степени пригодности к выращиванию озимой ржи на основе разных прогностических процедур.

урожайностью) занимают гораздо большие площади (30...32 %). Около половины территории хозяйства занято пространствами с неблагоприятными условиями выращивания ржи – в их пределах прогнозируется низкий урожай (1...2 т/га), существенно меняющийся год от году. Прогноз, созданный на основе нейросетей, предсказывает более благоприятную ситуацию для культивации ржи.

Закономерности пространственного расположения площадей также принципиально не отличаются в зависимости от метода прогноза. На карте, созданной на основе регрессионного моделирования, территории, оптимальные для выращивания ржи, располагаются на западе и частично на юге и юго-востоке хозяйства – в пределах водно-ледниковой равнины, тогда как территории, неблагоприятные для культивации этой культуры, занимают зандровую равнину и обширные межхолмные депрессии на юге хозяйства. Карта, полученная в ходе визуализации результатов нейросетевого прогнозирования, незначительно отличается от вышеописанной. Благоприятные для ржи места на ней занимают большие площади, особенно на юго-востоке и в центре хозяйства, а неблагоприятные территории полностью сосредоточены в пределах зандровой равнины и долины р. Волга.

Различия между картами можно объяснить особенностями алгоритмов регрессионного и нейросетевого анализов. Регрессионный анализ – линейная процедура, в ходе расчета которого игнорируются не только слабозначимые факторы, но и предикторы, связанные с урожайностью нелинейно. Нейросетевой подход учитывает все факторы, входящие в модель, а также нелинейные связи между ними и откликом, вследствие многослойности перцептронов. Совокупность линейных и нелинейных методов прогнозирования позволяет получать больше информации для землепользователя. Более общий анализ подходов множественной регрессии (линейной и аддитивной /GAM/), случайного леса /Random Forest/ и нейросетей проведен в работе [23], в которой показано, что нейросети и GAM имеют тенденцию преувеличивать влияние нелинейностей (давая завышенные R^2), в отличие от линейной множественной регрессии и Random Forest. Возможности применимости конкретных методов прогнозирования урожайности могут быть оценены только на практике путем верификации моделей с использованием натурных наблюдений – путем сравнения прогнозных данных с реальной урожайностью на ключевых участках, а также использования данных дистанционного зондирования Земли.

При сопоставлении прогнозных карт была получена комбинированная карта, на которой выделено четыре типа местоположений по условиям культивации ржи. Площади с оптимальными условиями характеризуются прогнозом наилучших условий для произрастания на основе обоих методов. Для территорий с благоприятными условиями прогноз наилучших условий отмечается только по одному методу, а другой метод предсказывает посредственные условия. В местах с посредственными (благоприятными) и неблагоприятными прогнозами располагаются поля с посредственными условиями выращивания ржи – здесь требуется вложение больших дополнительных средств для получения высоких и стабильных урожаев. Те пространства, где прогнозы по обоим методам неблагоприятны, можно отнести к местоположениям с неблагоприятными условиями – выращивание ржи в их пределах нецелесообразно. Косвенным подтверждением справедливости прогнозов служит распределение угодий до ликвидации хозяйства – места, неблагоприятные для выращивания

ржи, в основном заняты гослесфондом и внутрихозяйственными лесами.

Выводы. База многолетних данных по урожайности ржи на трансекте может быть разделена на четыре группы. Первая характеризуется повышенными термическими ресурсами. Вероятность проявления такой климатической обстановки – 0,29. Второй кластер, который оптимален для произрастания ржи, имеет такую же вероятность проявления (<30 % лет наблюдений). Третий кластер можно назвать «прохладным» – вероятность его проявления – 0,21, а четвертый, с вероятностью проявления 0,14, может быть охарактеризован как «холодный».

В условиях «жаркого» кластера средняя продуктивность озимой ржи в пределах трансекты равна 2,6 т/га и зависит в основном от высоты местоположения. При оптимальных климатических условиях средняя продуктивность достигает 3,4 т/га и зависит от колебания гипсометрических отметок местности и изменчивости крутизны склонов. В условиях прохладных лет средняя урожайность составляет 2,8 т/га, а основным фактором изменчивости продуктивности служит гранулометрический состав почв. В наиболее холодные годы средняя урожайность составляет только 1,9 т/га. Ее колебания зависят в основном от характера прогрева территории.

Карты прогнозной урожайности озимой ржи для хозяйства, созданные на основе различных математических подходов, принципиально не различаются. Бывшее ОПХ «Заветы Ленина» пригодно для выращивания этой культуры: ее прогнозная средневзвешенная урожайность в пределах хозяйства колеблется от 1,52 до 2,61 т/га, а ее временная вариабельность – от 55,5 до 24,0 %.

Оптимальным местоположением для размещения посевов ржи служит ландшафт моренно-ледниковой равнины, тогда как неблагоприятные для ее выращивания ареалы располагаются на зандровой равнине и в долине р. Волги.

Для целей адаптивно-ландшафтного земледелия необходимо рекомендовать совместное применение регрессионного и нейросетевого методов анализа, что обеспечивает получение наиболее достоверных и информативных прогнозов.

Создание карт прогнозной урожайности озимой ржи в пределах заброшенного участка имеет не только методологический, но и прикладной смысл, так как позволяет оценить его пригодность к выращиванию культуры и целесообразность выполнения дорогостоящих экспедиционных исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального исследовательского центра «Почвенный институт имени В. В. Докучаева». 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 заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв / Д. И. Люри, С. В. Горюшкин, Н. А. Караваева и др. М.: ГЕОС, 2010. 415 с. ISBN 978-5-89118-500-5.

2. Сысыев В. В., Матасов В. М., Бричева С. С. Геофизический подход к установлению ландшафтных границ // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2024. № 1. С. 34–48. doi: 10.17308/geo/1609-0683/2024/1/34-48.
3. Детерминанты пространственного распределения заброшенных сельскохозяйственных земель в европейской части России / А. В. Прищепов, Д. Мюллер, М. Ю. Дубинин и др. // Пространственная экономика. 2013. № 3. С. 30–62.
4. Щерба В. Н., Долматова О. Н. Оценка состояния и перспективы развития системы землепользования южной лесостепи Омской области // Московский экономический журнал. 2022. № 5. С. 107–122. doi: 10.55186/2413046X_2022_7_5_323.
5. Methodological evolution of potato yield prediction: a comprehensive review / Y. Lin, S. Li, S. Duan, et al // Frontiers in Plant Science. 2023. No. 14. P. 1214006. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1214006/full> (дата обращения: 21.01.2025). doi: 10.3389/fpls.2023.1214006.
6. Бисчоков Р. М., Ахматов М. М. Анализ и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур методами нечеткой логики // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2021. № 168. С. 274–287. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45849137> (дата обращения: 21.01.2025). doi: 10.21515/1990-4665-168-020.
7. Бисчоков Р. М. Анализ, моделирование и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур средствами искусственных нейронных сетей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2022. Т. 17. № 2. С. 146–157. doi: 10.22363/2312-797X_2022-17-2-146-157.
8. Лебедева В. М., Найдина Т. А. Учет осенне-зимнего увлажнения почвы в динамико-статистической модели прогноза урожайности озимых культур // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 79–95. doi: 10.37162/2618-9631-2022-4-79-95.
9. Андриющенко С. А. Тенденции и условия повышения экологической устойчивости АПК Российской Федерации // Международный сельскохозяйственный журнал. 2023. № 2(392). С. 143–146. doi: 10.55186/25876740_2023_66_2_143.
10. Шалов Т. Б., Азубеков Л. Х. Адаптивно-ландшафтные системы земледелия в схеме землеустройства территории сельского поселения // Земледелие. 2013. № 6. С. 28–29.
11. Principles and applications of topography in precision agriculture / A. H. Rabia, J. Neupane, Z. Lin, et al. // Advances in Agronomy. 2022. Vol. 171. P. 143–189. doi: 10.1016/bs.agron.2021.08.005.
12. Иванов Д. А., Карасева О. В., Рублюк М. В. Изучение динамики продуктивности трав на основе данных многолетнего мониторинга // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021. № 22(1). С. 76–84. doi: 10.30766/2072-9081.2021.22.1.76-84.
13. Средостабилизирующая роль многолетних трав в условиях современных вызовов экологического и климатического характера / А. И. Белолуццев, А. Н. Куприянов, И. А. Кузнецов и др. // АгроЭкоИнфо. 2023. № 1(55). URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/1/st_127.pdf (дата обращения: 21.01.2025).
14. The application of the soil-agroclimatic index for assessing the agronomic potential of arable lands in the forest-steppe zone of Russia / D. S. Bulgakov, D. I. Rukhovich, E. A. Shishkonakova, et al. // Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51 (4). P. 448–459. doi:10.1134/S1064229318040038.
15. Шапко Д. И. Розов Н. Н. Внутриобластное природно-сельскохозяйственное районирования как форма учета биоклиматического потенциала // Земледелие. 1989. № 3. С. 18–22.
16. Беручаивили Н. Л. Геофизика ландшафта. М.: Высшая школа, 1990. 287 с.
17. Иванов Д. А. Влияние почв и рельефа на продуктивность разновозрастных травостоев // Международный сельскохозяйственный журнал. 2021. № 4(382). С. 73–76. doi: 10.24412/2587-6740-2021-4-73-76.
18. Рублюк М. В., Иванов Д. А., Карасева О. В. Влияние осушаемых агроландшафтов на свойства почвы и элементы структуры урожая озимой ржи // Плодородие. 2023. № 1 (130). С. 72–76. doi: 10.25680/S19948603.2023.130.17.
19. Сысыев В. А., Кедрова Л. И., Уткина Е. И. Значение озимой ржи для сохранения природного агроэкологического баланса и здоровья человека (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 14–20. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-014-020.
20. Минаев П. А. Анализ неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения России // Наука без границ. 2021. № 9(61). С. 26–32.
21. Плохинский Н. А. Биометрия. М.: МГУ, 1970. 367 с.
22. Learn R Programming. Neuralnet: Training of neural networks. URL: <https://www.rdocumentation.org/packages/neuralnet/versions/1.44.2/topics/neuralnet> (дата обращения: 14.02.2025).
23. Hjort J., Marmion M. Effects of sample size on the accuracy of geomorphological models // Geomorphology. 2008. Vol. 102. P. 341–350.

Поступила в редакцию 03.03.2025
После доработки 17.03.2025
Принята к публикации 09.04.2025

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЗАСОРЕННОСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В СЕВЕРНОЙ ЛЕСОСТЕПИ ЮЖНОГО УРАЛА

© 2025 г. Л. П. Шаталина, кандидат сельскохозяйственных наук, Ю. Б. Анисимов, кандидат сельскохозяйственных наук, Ю. С. Мошкина, П. М. Лопухов, кандидат сельскохозяйственных наук, Е. Л. Калюжина

Челябинский научно-исследовательский институт сельского хозяйства,
456404, Челябинская область, Чебаркульский район,
пос. Тимирязевский, ул. Чайковского, 14
E-mail: chniisx2@mail.ru

Исследования проводили с целью определения влияния предшественника, минеральных удобрений и метеоусловий на формирование агрофитоценоза яровой пшеницы при использовании нулевой технологии обработки почвы. Объект исследований – сорный компонент агрофитоценозов и его влияние на продуктивность яровой пшеницы в северной лесостепной зоне Южного Урала на фоне нулевой технологии обработки почвы. Схема опыта реализована в 3 вариантах севооборотов и монокультуре, по 6 предшественникам яровой пшеницы на фонах без удобрений и с внесением азотных удобрений. При нулевой обработке почвы сорный компонент в посевах яровой пшеницы по всем вариантам опыта состоял из малолетних сорняков. Их численность при посеве по вариантам севооборотов существенно зависела от метеоусловий, в переувлажненный год в среднем по предшественникам различие достигало 27 шт./м², при коэффициенте вариации 47 %. Биомасса яровой пшеницы находилась в существенной зависимости от фона удобренности – в среднем по годам различия достигали 722 г/м². По предшественнику горох + овес отмечена более высокая масса малолетних сорняков, по сравнению с другими предшественниками, в среднем по фонам удобренности на 43...662 г/м². Удельная масса сорняков в общей фитомассе агрофитоценоза достоверно зависела от метеоусловий, различия достигали 7 %. В засушливые годы доля влияния численности малолетних сорняков и биомассы культуры на продуктивность яровой пшеницы на удобренном фоне достигала 80...82 %.

FACTORS, INFLUENCING THE CONTAMINATION OF SPRING WHEAT IN THE NORTHERN FOREST-STEPPE OF THE SOUTHERN URALS

L. P. Shatalina, Yu. B. Anisimov, Yu. S. Moshkina, P. M. Lopukhov, E. L. Kalyuzhina

Chelyabinsk Research Institute of Agriculture,
456404, Chelyabinskaya obl., Chebarkul'skii r-n,
pos. Timiryazevskiy, ul. Tchaikovskogo, 14
E-mail: chniisx2@mail.ru

The study was conducted to determine the effect of predecessor, mineral fertilizers and weather conditions on the formation of agrophytocenosis of spring wheat using zero tillage technology. The object of the study is the weed component of agrophytocenoses and the activity of its influence on the productivity of spring wheat in the northern forest-steppe zone of the Southern Urals against the background of zero tillage technology. The experimental design was implemented in 3 crop rotation variants and a monoculture, with 6 predecessors of spring wheat, against two fertilization backgrounds: without fertilizers (0) and with the application of nitrogen fertilizers (N). With zero tillage technology, the litter component in spring wheat crops consisted of juvenile weeds in all experimental variants. Their number during sowing according to crop rotation variants significantly depended on the weather conditions of the year, in a waterlogged year, on average, the difference reached 27 units/m², with a coefficient of variation of 47 %. The biomass of spring wheat was significantly dependent on the background of fertilization – on average, the differences over the years reached 722 g/m². According to the predecessor of spring wheat, peas + oats, a higher mass of juvenile weeds was noted, compared with other predecessors, on average by 43...66 g/m² in fertilization backgrounds. The specific mass of weeds significantly depended on the meteorological conditions of the year, with differences reaching 7 %. In dry years, the share of the influence of the number of annual weeds and the biomass of the crop on the productivity of spring wheat on a fertilized background reached 80–82 %.

Ключевые слова: яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.), сорные растения, агрофитоценоз, корреляция, предшественник, минеральные удобрения.

Keywords: spring wheat (*Triticum aestivum* L.), weeds, agrophytocenosis, correlation, precursor, mineral fertilizers.

Яровая пшеница – важнейшая зерновая культура, возделываемая по всему миру, на долю которой приходится 20 % сбора зерна в России. Усиление продовольственной безопасности страны обеспечивают эффективные приемы агротехнологий ее возделывания [1]. Одним из факторов, оказывающих высокое дестабилизирующее действие на урожайность яровой пшеницы, как известно, выступает сильная засоренность полей, как агрессивный конкурент культурных растений за потребление питательных веществ и воды, в конечном итоге оказывающий влияние и на качество производимой продукции. Применение системных гербицидов в период вегетации яровой пшеницы позволяет эффективно подавлять

сорные растения в посевах полевых культур, особенно злостных многолетних корнеотпрысковых видов, приводит к гибели корневой системы и предотвращает их обсеменение [2, 3]. Вегетативная масса сорняков формируется благодаря большому количеству питательных веществ и продуктивной влаги, что усугубляет и создает негативные условия для роста и развития культурных растений, особенно в годы с недобором осадков за вегетационный период [4]. Поэтому в условиях засухи большое влияние на формирование агрофитоценозов яровой пшеницы оказывают не только технологии возделывания, но и применяемые средства защиты от сорняков и вредителей [5]. Видовой состав сорных растений

формируется под воздействием факторов внешней среды и деятельности человека [6]. Изучение биологического разнообразия ассоциаций популяций сорных растений и анализ данных о реакции основной зерновой культуры на среду обитания дает возможность разрабатывать эффективные мероприятия по борьбе с сорной растительностью в агрофитоценозе [7].

Цель исследований – определение влияния предшественника, минеральных удобрений и метеоусловий на формирование агрофитоценоза яровой пшеницы при использовании нулевой технологии обработки почвы.

Методика. Работу выполняли в 2019–2024 гг. в длительном стационарном полевом опыте, заложенном в 1978 г. Схема опыта включала следующие варианты: предшественник (фактор А) – рапс, горох + овес (в соотношении 50:50), люпин, лен, соя, бессменное возделывание пшеницы;

фон минерального питания (фактор В) – без удобрений (0), азотные удобрения (N).

Предшественники пшеницы изучали в следующих севооборотах: рапс – пшеница – горох + овес – пшеница; пар – озимая рожь – люпин – пшеница – лен – пшеница; соя – пшеница – горох + овес – ячмень; пшеница при бессменном возделывании.

Азотные удобрения в севооборотах вносили под озимую рожь весной в качестве подкормки (N_{40}), под зернобобовые культуры (N_{10}), под пшеницу и ячмень после зернобобовых (N_{30}), под пшеницу при бессменном возделывании (N_{40}), под ячмень после зерновых (N_{50}).

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный маломощный тяжелосуглинистый с содержанием гумуса 6,0 %. Глубина пахотного слоя небольшая – 25...30 см, реакция почвенной среды – от слабокислой до нейтральной (рН = 5,1...7,0), обеспеченность подвижным фосфором – низкая (45 мг/кг по Чирикову), сумма поглощенных оснований – 28...30 мг-экв./100 г почвы.

Агротехника в опыте основана на нулевой технологии, согласно рекомендациям ФГБНУ «Челябинский НИИСХ». За 7 дней до посева применяли глифосат-содержащий гербицид Торнадо 540 в дозе 3...4 л/га. Азотные удобрения вносили поверхностно перед посевом (вручную). Посев осуществляли универсальной стерневой сеялкой СС-6 с приспособлениями для полусной обработки почвы турбодисками и 2-дисковыми смещенными сошниками. В 2021 и 2022 гг. в период вегетации посевы обрабатывали баковой смесью против двудольных и однодольных сорняков (Балерина 0,5 л/га + Ластик-экстра 1,0 л/га). В 2023 г. применяли системный гербицид избирательного действия против однолетних и некоторых многолетних двудольных сорняков (включая виды осота и бодяка) Диамакс 0,7 л/га и против однолетних злаковых (овсюг, просянка, щетинник) Овен 0,5 л/га. В севооборотах высевали яровую пшеницу сорта Челябин 75. Засоренность посевов учитывали в период молочно-восковой спелости количественно-весовым методом. Для математической обработки данных использовали компьютерную программу статистической обработки данных Snedecor методами дисперсионного и корреляционного анализа. В 2021 г. складывались засушливые условия (гидротермический коэффициент (ГТК) по Г. Т. Селянинову – 0,7), в 2022 г. – недостаточно увлажненные (ГТК = 1,0), в 2023 г. – достаточно влажные (ГТК = 1,5). Сумма осадков за вегетационные периоды в эти годы составляла соответственно 188,8 мм, 196,6 мм и 386,8 мм.

Результаты и обсуждение. Сорный компонент в посевах яровой пшеницы по всем вариантам опыта на 100 % состоял из малолетних сорняков, за исключе-

Табл. 1. Численность малолетних сорняков в посевах яровой пшеницы в зависимости от предшественников и азотных удобрений, шт./м²

Предшественник (фактор А)	Фон удобрений (фактор В)	Год/ГТК (фактор С)			
		2021/0,7	2022/1,0	2023/1,5	среднее
Горох+овес	0	47	20	104	57
	N	44	13	45	34
	среднее	45	16	74	45
Лен	0	22	59	132	71
	N	12	6	60	26
	среднее	17	32	96	48
Рапс	0	66	51	46	54
	N	38	16	52	35
	среднее	52	33	49	44
Люпин	0	36	75	22	44
	N	77	30	49	52
	среднее	56	52	36	48
Соя	0	32	20	56	36
	N	24	105	45	58
	среднее	28	62	50	47
Пшеница (бессменно)	0	21	42	63	42
	N	13	25	88	42
	среднее	17	33	75	42
Среднее	0	37	44	70	50
	N	35	32	56	41
	среднее	36	38	63	46
НСР ₀₅ для факторов	A	41	92	77	36
	B	24	53	44	21
	C			26	
Коэффициент вариации V, %		56	76	47	60

нием вариантов с предшественниками рапс (фон 0) и люпин (фон N), в которых доля сорняков этой группы составляла 98 %.

Посевы яровой пшеницы по численности малолетних сорняков в среднем по предшественникам различались не существенно (табл. 1). В 2021 г. менее засоренными были посевы яровой пшеницы после льна и при бессменном ее возделывании. В 2022 г. более чистыми от сорняков были посевы яровой пшеницы после зерносмеси горох + овес и рапса на фоне внесения азотных удобрений. В 2023 г. меньшее количество сорняков отмечено в посевах пшеницы после люпина без удобрений.

Табл. 2. Масса малолетних сорняков в посевах яровой пшеницы в зависимости от предшественников и азотных удобрений, г/м²

Предшественник (фактор А)	Фон удобрений (фактор В)	Год/ГТК (фактор С)			
		2021/0,7	2022/1,0	2023/1,5	среднее
Горох+овес	0	127	37	255	140
	N	220	17	105	114
	среднее	174	27	180	127
Лен	0	54	70	166	97
	N	51	8	105	55
	среднее	52	39	136	76
Рапс	0	94	52	105	84
	N	42	26	82	50
	среднее	68	39	94	67
Люпин	0	52	102	33	62
	N	122	54	90	89
	среднее	87	78	62	76
Соя	0	64	34	100	66
	N	54	165	85	101
	среднее	59	100	92	84
Пшеница (бессменно)	0	31	70	71	57
	N	26	29	140	65
	среднее	28	50	56	61
Среднее	0	70	61	122	84
	N	86	50	101	79
	среднее	78	55	111	81
НСР ₀₅ для факторов	A	99	129	146	68
	B	57	75	84	39
	C			48	
Коэффициент вариации V, %		71	78	50	66

Это обусловлено варьированием метеоусловий по годам исследований и биологическими особенностями разложения растительных остатков предшественников. Вследствие разницы в метеоусловиях численность малолетних сорняков в 2023 г. увеличивалась на 75 %, особенно из-за повышения суммы осадков за вегетацию, по сравнению с 2021 г., в 2,1 раза, а с 2022 г. – на 66 %. Наибольшую вариабельность численности малолетних сорняков в опыте отмечали в 2022 г. из-за менее благоприятных условий для сорной растительности.

Сорный компонент был представлен следующими малолетними видами: просо куриное (*Echinochloa crus-galli* L.); щетинник зеленый (*Setaria viridis* L., Beauv.). В засушливом 2021 г. наибольшую массу малолетних сорняков в среднем по фонам удобренности отмечали в посевах по предшественнику горох + овес, она была выше, чем после бессменного посева, на 1452 г/м² (табл. 2).

В 2022 г. масса малолетних сорняков при посеве после зерносмеси горох + овес в среднем по фонам удобренности была в 1,8 раза меньше, чем по бессменному посеву, и в 3,7 раза, по сравнению с посевом после сои. В 2023 г. самую низкую в опыте массу сорняков в среднем по фонам удобренности отмечали после люпина – в 3,0 раза меньше, чем после смеси горох + овес. В среднем по предшественникам по массе малолетних сорняков существенных различий за 2021–2023 гг. не отмечено. Коэффициент вариации величины этого показателя в 2021 г. был больше, чем в 2023 г., на 21 %, в 2022 г. – на 28 %. Масса малолетних сорняков при посеве по зерносмеси горох + овес в среднем за 2021–2023 гг. была на 43...662 г/м² больше, чем по другим предшественникам. В целом изменение массы малолетних сорняков зависело от количества выпавших осадков по фазам роста и развития культуры. В 2022 г. сложились лучшие условия, чем в 2021 г., а в 2023 г. сумма осадков во второй половине вегетации превышала норму более чем в 3 раза, что вызвало новую волну роста злаковых сорняков.

Варьирование биомассы яровой пшеницы в севообороте по годам исследований составляло 33 % (табл. 3). В засушливом 2021 г. с суммой осадков за вегетацион-

Табл. 3. Биомасса яровой пшеницы в зависимости от предшественников и азотных удобрений, г/м²

Предшественник (фактор А)	Фон удобренности (фактор В)	Год/ГТК (фактор С)			
		2021/0,7	2022/1,0	2023/1,5	среднее
Горох+овес	0	520	670	595	595
	N	530	650	810	663
	среднее	525	660	702	629
Лен	0	420	650	650	573
	N	460	910	710	693
	среднее	440	780	680	633
Рапс	0	192	740	655	529
	N	220	810	730	587
	среднее	206	775	692	643
Люпин	0	580	510	587	559
	N	950	570	750	757
	среднее	765	540	668	658
Соя	0	420	620	635	558
	N	400	590	585	525
	среднее	410	605	610	542
Пшеница (бессменно)	0	660	790	630	693
	N	880	660	600	713
	среднее	770	725	615	703
Среднее	0	465	663	625	584
	N	573	698	698	656
	среднее	519	681	661	620
НСР ₀₅ для факторов	A	279	240	189	116
	B	161	138	109	67
	C			82	
Коэффициент вариации V, %		44	16	11	24

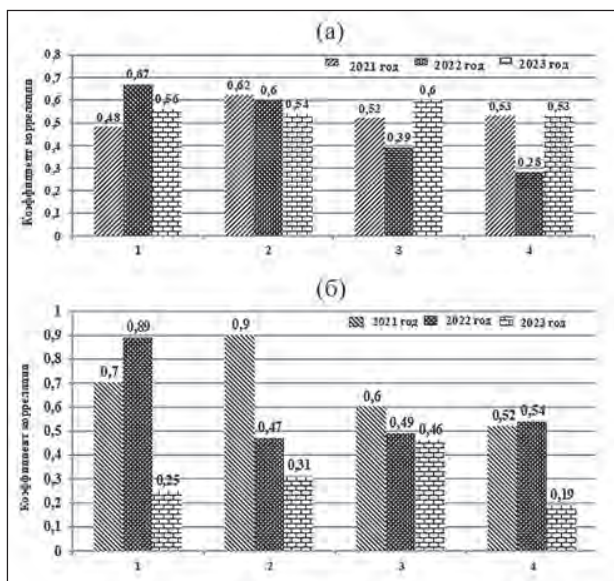
Табл. 4. Удельная масса сорняков в посевах яровой пшеницы в зависимости от предшественников и азотных удобрений, %

Предшественник (фактор А)	Фон удобренности (фактор В)	Год/ГТК (фактор С)			
		2021/0,7	2022/1,0	2023/1,5	среднее
Горох+овес	0	20	5	30	18
	N	29	2	10	14
	среднее	25	4	20	16
Лен	0	11	10	20	14
	N	15	1	13	10
	среднее	13	6	16	12
Рапс	0	33	7	15	18
	N	16	3	10	10
	среднее	24	5	12	14
Люпин	0	8	17	6	10
	N	11	8	11	10
	среднее	9	12	8	10
Соя	0	13	10	14	12
	N	12	21	13	15
	среднее	12	15	14	13
Пшеница (бессменно)	0	4	9	10	8
	N	3	5	19	9
	среднее	4	7	14	9
Среднее	0	15	10	16	14
	N	14	7	13	11
	среднее	15	8	14	12
НСР ₀₅ для факторов	A	16	13	18	7
	B	9	8	11	4
	C			6	
Коэффициент вариации V, %		61	73	44	59

ный период 189 мм при высоком коэффициенте вариации изменения биомассы по предшественникам яровой пшеницы достигали 5642 г/м². После люпина и бессменной пшеницы она были выше, чем по рапсу и сое, в связи с более благоприятными условиями роста и развития. В 2022 г. наибольшую биомассу яровой пшеницы отличали после льна и рапса – на 18 % выше, чем по зерносмеси гороха с овсом. В 2023 г. изменчивость величины этого показателя была незначительной – в среднем по предшественникам 162 г/м², или 27 %. Азотные удобрения оказывали существенное влияние на биомассу яровой пшеницы – в среднем 12 %. Наибольшие ее изменения были обусловлены метеоусловиями – в среднем по предшественникам до 31 %. Это указывает на острую реакцию яровой пшеницы на условия произрастания.

По удельной массе сорняков в агрофитоценозе можно судить о степени их влияния на культуру (табл. 4). В 2022 г. в среднем по вариантам предшественников доля сорняков в посевах яровой пшеницы не превышала 10 %. Существенным фактором, влияющим на долю сорняков в посевах яровой пшеницы, были условия года, причем как засушливость, так и избыточное увлажнение. Реакция яровой пшеницы на засоренность по предшественникам в среднем за 2021–2023 гг. была незначительной, как и при внесении азотных удобрений. В 2021 г. особенно чистыми оказались посевы бессменной яровой пшеницы независимо от фона удобренности. Сильную засоренность отмечали после предшественников горох + овес и рапс, в среднем по фонам удобренности она достигала 33 %, вследствие низкой конкурентоспособности культуры в условиях засухи и большей требовательности к условиям увлажнения в период вегетации.

В условиях вегетационного периода 2022 г. при достаточной обеспеченности яровой пшеницы влагой биомасса культуры в среднем по вариантам предшественников подавляла рост сорняков, независимо от фона удобренности. Доля малолетних сорняков в среднем по предшественникам изменялась на 7 %.



Корреляционные зависимости влияния параметров засоренности на продуктивность яровой пшеницы, 2021–2023 гг.: а) без удобрений; б) с внесением азотных удобрений; 1 – масса культуры, 2 г/м², 2 – численность малолетних сорняков, шт./м², 3 – масса малолетних сорняков, 2 г/м², 4 – доля сорняков в общей биомассе, %.

Метеоусловия 2023 г. характеризовались обильными осадками, почти в 2 раза превышающими среднепогодные значения, но более низкой суммой положительных температур, по сравнению с 2021 г. Изменения удельной массы сорняков в посевах яровой пшеницы благодаря внесению азотных удобрений в среднем составляли 3 %. Отмечена более высокая доля сорняков в посевах яровой пшеницы по предшественникам горох + овес и лен без удобрений, по сравнению с 2021 г., на 50 и 81 % соответственно, а на удобренном фоне при бессменном посеве яровой пшеницы – в 6,3 раза. Наибольшая вариабельность удельной массы сорняков в посевах яровой пшеницы установлена в 2022 г., она был на 29 % выше, чем в 2023 г.

Влияние засоренности посевов на урожайность яровой пшеницы можно оценить методом корреляционного анализа. В целом за 2021–2023 гг. по удельной массе сорняков в посевах яровой пшеницы доля влияния фактора удобренности была одинаковой 20...21 %, при коэффициенте корреляции $r = 0,42...0,45$ (см. рисунок). В частности, в засушливом 2021 г. доля влияния численности малолетних сорняков на урожайность яровой пшеницы достигала 82 %, при коэффициенте корреляции $r = 0,9$, относительной массы сорняков – 27 %, на удобренном фоне при коэффициенте корреляции $r = 0,52$, массы малолетних сорняков – 36 % при коэффициенте корреляции $r = 0,60$. Без удобрений доля влияния численности малолетних сорняков на урожайность яровой пшеницы снижалась с 38 до 29 % при коэффициентах корреляции $r = 0,62$ и $r = 0,54$ соответственно, относительной массы сорняков – с 28 до 8 % при коэффициентах корреляции $r = 0,53$ и $r = 0,28$. Установлена высокая доля влияния биомассы культуры на продуктивность яровой пшеницы в 2022 г. до 80 % на удобренном фоне. Влияние остальных показателей варьировало от 4 до 48 %.

Яровая пшеница с большой биомассой характеризовалась высокой конкурентоспособностью к малолетним сорнякам, что привело к снижению их доли в агро-

фитоценозе без удобрений. Азотные удобрения способствовали нарастанию как биомассы культуры, так и сорного компонента. Во влагообеспеченном 2023 г. доля влияния сорного компонента на формирование биомассы яровой пшеницы была невысокой, особенно на фоне азотных удобрений – от 4 до 21 %, без удобрений величина этого показателя достигала от 26 до 36 %.

На фоне с азотными удобрениями установлена сильная зависимость ($r = 0,90$) между продуктивностью яровой пшеницы и численностью малолетних сорняков в засушливом 2021 г., без их использования корреляция была средней. В переувлажненном 2023 г. на фоне азотных удобрений зависимость продуктивности культуры от ее биомассы снижалась до 6 %, при коэффициенте корреляции $r = 0,25$, от численности, массы и доли малолетних сорняков – соответственно до 10 % ($r = 0,31$), 21 % ($r = 0,46$) и 4 % ($r = 0,19$).

Выводы. Засоренность яровой пшеницы в севооборотах и при бессменном возделывании в основном определяли метеоусловия. Формирование наземной массы сорных растений усиливалось как в засушливых, так и в избыточно увлажненных условиях. Лучшими предшественниками для формирования биомассы яровой пшеницы были люпин и горох + овес, в среднем различия по годам достигали 1622 г/м². Внесение азотных удобрений увеличивало биомассу яровой пшеницы в среднем на 722 г/м². Рапс и бессменный посев наиболее устойчиво снижающие засоренность. Влажные условия 2023 г. способствовали резкому увеличению численности сорняков на 75 %. В засушливые годы доля влияния численности малолетних сорняков и биомассы культуры на продуктивность яровой пшеницы на удобренном фоне достигала 80...82 %. На фоне удобрений в переувлажненный год корреляционная зависимость продуктивности культуры от изучаемых факторов снижалась на 15...74 %.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена за счет средств бюджета Челябинского научно-исследовательского института сельского хозяйства в рамках Государственного задания Минобрнауки РФ. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Чевычелова Н. В., Жаркова С. В., Шевчук Н. И. Приемы агротехнологии на посевах яровой пшеницы и их влияние на рост и развитие растений // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2024. № 4(234). С. 38–44.
2. Продуктивность и рентабельность льна масличного в зависимости от погодных условий и технологии выращивания в условиях засушливого земледелия / К. А. Акшалов, М. Б. Кужинов, О. Н. Баймуканова и др. // Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина. 2023. № 1–1(116). С. 196–211.
3. Фисунов Н. В., Шулепова О. В., Фоминцев А. В. Засоренность и урожайность яровой пшеницы в условиях лесостепной зоны Зауралья // Вестник

- Мичуринского государственного аграрного университета. 2021. № 4 (67). С. 54–58.
4. Скороходов В. Ю., Зоров А. А. Особенности влияния парового поля на формирование агроценоза и продуктивность яровой пшеницы в полевых севооборотах региона с неустойчивым увлажнением // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 5. С. 3–8.
 5. Горянин О. И., Щербинина Е. В. Совершенствование технологии возделывания яровой пшеницы в Поволжье // Аграрный научный журнал. 2020. № 6. С. 11–14.
 6. Малышкин Н. Г. Оценка видового состава растений рудеральных и сегетальных местообитаний Аромашевского района Тюменской области // Вестник КрасГАУ. 2022. № 2(179). С. 29–34.
 7. Шаталина Л. П., Анисимов Ю. Б., Калюжина Е. Л. Ассоциации сорных растений в агрофитоценозах яровой пшеницы // Российская сельскохозяйственная наука. 2020. № 2. С. 25–29.

Поступила в редакцию 21.02.2025

После доработки 13.03.2025

Принята к публикации 08.04.2025

Растениеводство, защита и биотехнология растений

УДК 633.14:630.165.41

DOI 10.31857/S2500262725020039 EDN DDZOBD

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА АДАПТИВНОГО ПОТЕНЦИАЛА СОРТОВ ОЗИМОЙ РЖИ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ КАЧЕСТВА ЗЕРНА

© 2025 г. А. А. Гончаренко, доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, А. В. Макаров, доктор сельскохозяйственных наук, Н. В. Цыганкова, В. Н. Точилин, Н. А. Ключко, М. С. Гончаренко, А. К. Костин, кандидаты сельскохозяйственных наук, П. А. Плотников

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

Исследования проводили с целью оценки параметров адаптивности основных технологических признаков (число падения (ЧП), высота амилограммы (ВА), вязкость водного экстракта (ВВЭ) и температура пика клейстеризации (ТПК)), определяющих хлебопекарные качества зерна озимой ржи, для возможного улучшения их методами селекции. Рассчитывали экологическое варьирование (CV), фенотипическую стабильность (SF) и экологическую пластичность (b_i) 10 сортов озимой ржи, выращенных в широком диапазоне погодных условий, сложившихся в 2015–2024 гг., по величинам этих показателей. Испытания проводили на делянках 12 м² в трехкратной повторности при норме высева 500 семян на 1 м². Наиболее высоким качеством зерна характеризовалась популяция ГК-494вв, которая предварительно была отселектирована на высокую вязкость водного экстракта зернового шрота. По признаку ЧП она выделялась относительно низким коэффициентом экологического варьирования (CV=27,7 %), имела более высокую фенотипическую стабильность (SF=2,5) и слабо реагировала на условия выращивания ($b_i=0,81$). Признаки ЧП и ВА сильно варьировали по годам, а потому оказались фенотипически нестабильными и низко наследуемыми ($H^2=0,20$ и $H^2=0,34$). Экологически более устойчивым был признак ВВЭ, который хорошо наследуется ($H^2=0,64$) и может служить надежным ориентиром в селекции на улучшение качества зерна. Установлена отрицательная корреляция между признаками качества и параметрами адаптивности CV и SF. Наиболее сильной она была между ЧП и CV ($r=-0,84 \pm 0,10$). Целенаправленная селекция на высокое число падения будет коррелятивно повышать экологическую устойчивость и фенотипическую стабильность признаков качества зерна.

INTEGRAL ASSESSMENT OF THE ADAPTIVE POTENTIAL OF WINTER RYE VARIETIES BASED ON TECHNOLOGICAL TRAITS OF GRAIN QUALITY

A. A. Goncharenko, A. V. Makarov, N. V. Tsygankova, V. N. Tochilin,
N. A. Klochko, M. S. Goncharenko, A. K. Kostin, P. A. Plotnikov

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

The results of a comparative study of 10 varieties of winter rye grown in a wide range of weather conditions in 2015–2024 are presented. The aim of the study was to study the ecological variation (CV), phenotypic stability (PS), and ecological plasticity (BI) of four technological traits: falling number (FN), amylogram height (AH), aqueous extract viscosity (AEV), and gelatinization peak temperature (GPT). A comparative test was carried out on plots of 12 m² in a triple repetition with a seeding rate of 500 grains per 1 m². The highest grain quality was found in the GC-494hv population, which was previously screened for the high viscosity of the aqueous extract of the grain meal. On the trait FN this population was distinguished by a relatively low coefficient of ecological variation (CV=27.7 %), had higher phenotypic stability (PS=2.5) and was characterized by increased buffering to various weather conditions ($b_i=0.81$). It was shown that the traits of FN and AH varied greatly over the years, and therefore turned out to be phenotypically unstable and low-heritable ($H^2=0.20$ and $H^2=0.34$). The trait AEV turned out to be more environmentally stable, which is well inherited ($H^2=0.64$) and can serve as a reliable guideline for grain quality improvement. A negative correlation has been established between the quality characteristics and the adaptability parameters CV and PS. This correlation was most strongly manifested between FN and CV ($r=-0.84 \pm 0.10$). It is concluded that targeted selection for a high falling number will correlatively increase environmental sustainability and phenotypic stability of grain quality characteristics.

Ключевые слова: озимая рожь, сорт, признак, варьирование, фенотипическая стабильность, экологическая пластичность, качество зерна.

Keywords: winter rye, variety, trait, variation, phenotypic stability, ecological plasticity, quality of grain.

Озимая рожь отличается от пшеницы более слабым селекционным прогрессом в улучшении многих технологических признаков качества зерна. Наиболее важными из них считают число падения, высоту амилограммы, вязкость водного экстракта зернового шрота, температуру пика клейстеризации крахмала [1]. Объясняют это тем, что рожь характеризуется относительно непродолжительным периодом покоя в фазе созревания зерна (12...15 дней) и во влажные годы

склонна к прорастанию зерна в колосе [2]. По этой причине многие признаки качества зерна сильно варьируют [3, 4], что находит свое отражение на рынке, где продукцию ржи из-за худшего качества реализуют по более низкой цене. По международному стандарту зерно этой культуры считают качественным, если максимальное число падения составляет не менее 200 с, а пик вязкости по амилографу – 400 е. а. [5]. Рожь с такими показателями может служить улучшителем для зерна более низкого

качества. В России согласно ГОСТ 16990-2017 зерно культуры подразделяют на 4 класса: 1-й класс – число падения более 200 с, 2-й класс – 141...200 с, 3-й класс – 80...140 с, 4-й класс – менее 80 с [6]. Зерно 4-го класса считают непригодным для хлебопечения. Во многих регионах РФ, особенно в Нечерноземной зоне, вырастить зерно ржи с высоким числом падения (на уровне 160...180 с) очень трудно из-за неблагоприятных погодных условий в период уборки [7, 8, 9], что вызывает необходимость селекционного улучшения сортов ржи по этому признаку.

По современным представлениям хлебопекарные качества зерна озимой ржи зависят от состояния углеводно-амилазного комплекса зерна [10]. Поэтому главная задача при селекции культуры состоит в оптимизации его основных параметров, с тем чтобы не допустить не только видимого, но и латентного прорастания зерна в колосе в период созревания [11]. Это достигается путем создания сортов с высоким числом падения. Первые исследования в селекции ржи на устойчивость к прорастанию зерна в колосе были начаты в Швеции в 1958 г. [12]. Они завершились созданием устойчивого к прорастанию сорта Отелло, у которого число падения достигало 200 с и было на 30 с выше, чем у исходного сорта. Этот сорт оказался более высокорослым и менее устойчивым к полеганию. Однако из-за высокой устойчивости к прорастанию зерна в колосе его стали выращивать в северо-западной части Швеции, где рожь из-за сильного прорастания раньше не возделывали.

В РФ целенаправленную селекцию озимой ржи на высокое число падения ведут с 1973 г. в Федеральном исследовательском центре «Немчиновка» [1]. Сначала проводили отбор по методу резервов на уровне отдельных растений (1973–1985 гг.), затем на уровне семей (1986–1996 гг.). В результате был создан сорт Альфа, у которого число падения в среднем за 2001–2010 гг. составило 241 с, что было выше стандартного сорта Восход 2 на 75 с. Кроме того, новый сорт отличался более высокой температурой пика клейстеризации крахмала (на 6,5 °C), характеризовался лучшей формоустойчивостью теста и качеством хлебного мякиша. Однако по урожайности он не имел существенных преимуществ и причиной тому была мелкозерность.

Крахмал, белки и пентозаны – основные биохимические компоненты зерна ржи, от которых зависит его качество [13]. Эти вещества обладают свойством набухания при смешивании с водой, что делает ржаную муку пригодной для производства хлеба. Зерно ржи, в сравнении с пшеничным, содержит меньше белка, но многократно превосходит его по содержанию пентозанов [14], которые играют важную роль в приготовлении ржаного теста [15]. Для оценки их количественного содержания были разработаны косвенные методы, основанные на измерении относительной вязкости водного экстракта (ВВЭ) зернового шрота с использованием высокоточных вискозиметров [16], а также обнаружена высокая корреляция величины этого показателя с максимальным набуханием теста ($r=0,94$), температурой пика клейстеризации ($r=0,72$) и числом падения ($r=0,82$) [17]. Изучение различных сортов ржи показало, что мелкозерная фракция зерна содержит значительно больше пентозанов, чем крупнозерная [18]. Имеются сведения о том [19], что при селекции озимой ржи на высокую ВВЭ можно коррелятивно увеличить другие признаки качества. В итоге было показано [20], что признак ВВЭ, наряду с числом падения и высотой амилограммы, – важный критерий при оценке хлебопекарных качеств ржаной муки и его

необходимо использовать в селекции на целевое использование.

К важной проблеме в селекции относят то, что все перечисленные технологические признаки сильно варьируют под влиянием погодных факторов в период созревания зерна [21]. Считают [22], что преодолеть их отрицательные последствия можно путем создания экологически адаптивных сортов и гибридов. Поэтому важно учитывать не только степень фенотипической выраженности признаков у создаваемых сортов, но и характер их адаптивных реакций при выращивании в различных экологических условиях [23].

Цель исследований – оценка параметров адаптивности основных технологических признаков (число падения, высота амилограммы, вязкость водного экстракта и температура пика клейстеризации), определяющих хлебопекарные качества зерна озимой ржи, для возможного улучшения их методами селекции.

Методика. Исходным материалом для исследований служили 10 сортообразцов озимой ржи, в том числе 4 районированных сорта (Татьяна, Московская 12, Московская 15, Московская 18) и 6 перспективных популяций (ЖЗ-760, ГК-2701, ГК-796, ГК-785, ГК-644 и ГК-494вв). Их сравнительное испытание проводили в 2015–2024 гг. на опытном поле Федерального исследовательского центра «Немчиновка» (Московская обл.) на делянках площадью 12 м² в трехкратной повторности при норме высева 500 семян на 1 м². Почва опытного участка – дерново-подзолистая, суглинистая. Содержание гумуса (по Тюрину) составляет 2,1 %, pH солевой вытяжки в слое почвы 0...20 см – 6,6 ед., содержание подвижных форм P₂O₅ и K₂O (по Кирсанову) находилось в диапазонах 101...150 мг/кг и 81...120 мг/кг соответственно.

Качество зерна оценивали по 4 технологическим признакам – число падения (ЧП), пик высоты амилограммы (ВА), относительная вязкость водного экстракта (ВВЭ) зернового шрота и температурный пик клейстеризации (ТПК).

Число падения определяли на приборе Хагберга-Пертена, пик высоты амилограммы и температуру пика клейстеризации – на амилографе Брабендера. Относительную вязкость водного экстракта зернового шрота измеряли в сантиПуазах (сП) на вискозиметре VT5L (Германия) по ранее разработанной методике [1].

Компоненты дисперсий генотипической и экологической изменчивости, а также коэффициенты наследуемости H^2 рассчитывали по руководству А. В. Смиряева и др. [24]. Для оценки экологической устойчивости признака по годам использовали коэффициент экологической вариации CV , выраженный в процентах. Чем ниже величина этого показателя, тем выше экологическая устойчивость признака. Способность генотипа создавать узкий (или широкий) диапазон фенотипов в меняющихся условиях среды оценивали по «фактору стабильности» (SF), предложенному D. Lewis [25]. Экологическую пластичность сортов оценивали по S. A. Eberhart и W. A. Russell [26], рассчитывая коэффициент линейной регрессии b_i , в качестве меры отзывчивости генотипа на изменяющиеся метеоусловия года и стабильность признака использовали вариансу S^2d_i , которая характеризует степень отклонения фактической величины признака от теоретически рассчитанной.

Существенное влияние на размах признаков качества зерна оказывали метеоусловия, которые в годы исследований значительно различались. Наиболее неблагоприятные условия для формирования зерна высокого качества сложились в 2019 г., когда из-за обильных

осадков (85,8 мм) и прохладной погоды в июле посевы рано полегли (14 июля) и в таком состоянии находились до самой уборки (30 июля). Сходные условия отмечали в 2018, 2020 и 2023 гг., когда дождливая погода в июле и частичное полегание стали причиной сильного варьирования изучаемых признаков у всех испытываемых сортов.

Наиболее благоприятные условия для формирования высококачественного зерна сложились в 2021, 2022 и 2024 гг., когда в июле осадков выпало меньше многолетней нормы (соответственно 44,0 %, 73,5 % и 69,6 %), посевы не полегли до самой уборки, а налив и созревание зерна проходили преимущественно в теплую и сухую погоду.

В остальные годы (2015, 2016, 2017 гг.) сумма осадков в июне и июле находилась на уровне многолетней нормы (соответственно 75 мм и 85 мм), поэтому устойчивость растений к полеганию была сравнительно высокой (от 4 до 8 баллов), что положительно сказалось на качестве зерна (число падения не опускалось ниже 150 с).

Результаты и обсуждение. Наиболее неблагоприятные погодные условия для формирования зерна высокого качества сложились в 2019 г. Величины показателей признаков качества в этом году были самыми низкими и в среднем по сортам по числу падения составляли 79 с, по высоте амилограммы – 137 е.а., по вязкости водного экстракта – 4,8 сП, по температуре клейстеризации – 56,1 °С (табл. 1). Наоборот, в 2021, 2022 и 2024 гг. метеоусловия в период налива зерна способствовали формированию относительно крупного зерна с наибольшей высотой амилограммой (405...565 е.а.), вязкостью водного экстракта (5,3...6,2 сП), числом падения (237...288 с) и температурой пика клейстеризации (64,3...74,5 °С).

Табл. 1. Влияние погодных условий года на технологические признаки качества зерна (среднее по 10 сортам)

Показатель	Год									
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Число падения, с	205	180	269	145	79	169	288	237	96	252
Высота амилограммы, е.а.	232	333	379	229	137	279	460	405	278	565
Вязкость водного экстракта, сП	5,5	4,9	4,6	4,6	4,8	4,4	6,2	5,4	5,2	5,3
Температура пика клейстеризации, °С	64,1	62,3	63,4	57,1	56,1	58,9	64,3	70,0	64,2	74,5

По каждому признаку число лет с благоприятными (положительные индексы условий среды) и неблагоприятными (отрицательные индексы условий среды)

Табл. 2. Индексы погодных условий года (I_j) при формировании признаков качества зерна озимой ржи (n = 10 сортов)

Показатель	Год									
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Число падения, с	13,4	-12,2	76,9	-47,4	-112,5	-23,4	96,4	45,4	-96,5	59,8
Высота амилограммы, е.а.	-98,0	3,2	49,6	-100,9	-192,4	-50,4	130,6	75	-52,3	235,6
Вязкость водного экстракта, сП	0,36	-0,22	-0,54	-0,54	-0,23	-0,70	1,19	0,34	0,12	0,18
Температура пика клейстеризации, °С	0,63	-1,22	-0,17	-6,42	-7,46	-4,65	0,76	6,49	0,63	11,46

условиями для формирования качества зерна было одинаковым и составило 5 из 10 (табл. 2). Можно предположить, что вероятность неблагоприятной погоды для формирования качественного зерна в период уборки озимой ржи в Московской области составляет 50 %.

В целом следует отметить, что разница между сортами по отдельным признакам была незначительной, основной причиной их варьирования служили не генотипические различия между сортами, а метеоусловия года выращивания. В то же время размах фенотипической изменчивости изучаемых признаков под влиянием экологических факторов был неоднозначным. Наиболее сильное варьирование по годам наблюдали по высоте амилограммы (в среднем в 4,1 раза) и числу падения (в 3,7 раза), тогда как по вязкости водного экстракта и температуре пика клейстеризации оно было заметно ниже (соответственно в 1,7 и 1,3 раза).

Хотя изучаемые сорта значительно различались между собой по отдельным признакам качества, наиболее высокую их выраженность отмечали у популяции ГК-494вв. В среднем за годы исследований число падения у нее составило 227 с, высота амилограммы – 411 е.а., вязкость водного экстракта – 10,7 сП, температура пика клейстеризации – 64,6 °С (табл. 3). Это указывает на высокие реологические свойства теста из муки этой популяции, по сравнению с другими сортами ржи. Ни одна другая популяция в исследуемом наборе таким сильным проявлением изучаемых признаков не обладала. Самые низкие показатели качества зафиксированы у сорта Татьяна (ЧП – 169 с, ВА – 276 е.а., ТПК – 62,1 °С). Сходную с этим сортом характеристику можно дать популяции ГК-785, которая на фоне других выделялась низкой вязкостью водного экстракта зернового шрота (3,7 сП).

Высокие показатели качества зерна популяции ГК-494вв связаны с ее происхождением. Она получена в результате ассортативного скрещивания двух сортов-бразцов ржи, предварительно прошедших интенсивный и многократный (10 циклов) целенаправленный отбор генотипов с высокой вязкостью водного экстракта зернового шрота [27]. В результате она унаследовала от своих родителей высокий потенциал ВВЭ, который за годы исследований в среднем был равен 10,7 сП, что в 2...3 раза выше, в сравнении с другими сортами. В процессе селекции коррелятивно улучшились и другие признаки качества этой популяции, по которым отбор изначально не проводили. Наибольший селекционный сдвиг произошел по числу падения, высоте амилограммы, а также температуре пика клейстеризации. Коррелятивное улучшение признака ТПК методами селекции особенно важно, так как его считают лучшим критерием активности фермента альфа-амилазы и устойчивости крахмальных зерен к «амилазной атаке» [2]. Благодаря этому высоковязкая популяция ГК-494вв по числу падения устойчиво лидировала над другими сортами во все годы испытаний. Исключение составили лишь 2020 и 2024 гг., когда из-за полегания она незначительно уступила свое лидерство более устойчивому сорту Московская 12 (соответственно на 10 с и 33 с). Остальные популяции, не подвергавшиеся целенаправленной селекции на высокую ВВЭ, продемонстрировали сравнительно слабую межсортовую дифференциацию по изучаемым признакам.

На основании полученных данных можно утверждать, что высокий потенциал ВВЭ – важный селекционный признак, с помощью которого можно коррелятивно улучшать другие технологические свойства зерна ржи. Обусловлено это тем, что величина ВВЭ тесно коррелирует ($r=0,97$) с содержанием водорастворимых пен-

Табл. 3. Размах варьирования признаков под влиянием погодных условий (2015–2024 гг.)

Сорт	min	max	Среднее
Число падения, с			
Татьяна	70	257	169 ± 23
Московская 12	70	281	207 ± 22
Московская 15	72	289	179 ± 23
Московская 18	72	285	188 ± 24
ГК-2701	79	302	191 ± 25
ГК-796	72	324	198 ± 25
ЖЗ-760	98	284	193 ± 22
ГК-785	72	302	185 ± 27
ГК-644	68	287	182 ± 25
ГК-494вв	118	301	227 ± 20
Высота амилограммы, е.а.			
Татьяна	70	575	276 ± 47
Московская 12	130	547	342 ± 40
Московская 15	110	511	314 ± 39
Московская 18	120	643	321 ± 45
ГК-2701	140	537	325 ± 36
ГК-796	135	460	337 ± 44
ЖЗ-760	190	577	345 ± 39
ГК-785	150	672	329 ± 49
ГК-644	140	520	299 ± 36
ГК-494вв	190	613	411 ± 47
Вязкость ВЭ, сП			
Татьяна	4,1	6,4	5,1 ± 0,28
Московская 12	4,3	6,3	5,1 ± 0,24
Московская 15	3,7	6	4,4 ± 0,20
Московская 18	3,7	7,1	4,7 ± 0,32
ГК-2701	3	5,5	4,3 ± 0,27
ГК-796	3,4	5,5	4,4 ± 0,26
ЖЗ-760	3,2	4,8	4,0 ± 0,14
ГК-785	3,2	4,5	3,7 ± 0,12
ГК-644	3,7	5,6	4,5 ± 0,20
ГК-494вв	7,4	14,2	10,7 ± 0,66
Температура пика клейстеризации, °С			
Татьяна	55,8	70,3	62,1 ± 1,7
Московская 12	55,8	75,9	63,8 ± 2,0
Московская 15	55	74,1	63,1 ± 1,7
Московская 18	55,8	74,3	63,1 ± 1,7
ГК-2701	57,3	76,1	64,3 ± 2,0
ГК-796	55,8	74,1	63,9 ± 1,7
ЖЗ-760	56,5	74,3	63,6 ± 1,7
ГК-785	57,3	74,6	63,6 ± 1,7
ГК-644	54,3	74	62,9 ± 1,7
ГК-494вв	56,7	74,8	64,6 ± 1,8

тозанов [16], которые связывают воду при замесе теста и делают его более формоустойчивым [14].

С селекционной точки зрения большой интерес представляет разложение общей фенотипической изменчивости изучаемых признаков на экологически и генотипически обусловленные компоненты. Если признак характеризуется сильной экологической зависимостью, то для него свойственно высокое фенотипическое варьирование и отзывчивость генотипа на изменение метеоусловий года. Об этом можно судить по величине коэффициента наследуемости H^2 , косвенно отражающего уровень адаптивной способности генотипа. На высокую достоверность H^2 указывает значительное превышение $F_{\text{факт.}}$ над $F_{\text{табл.}}$ по всем изучаемым призна-

Табл. 4. Компоненты дисперсии и коэффициенты наследуемости различных признаков качества зерна

Признак	Компонент дисперсии			H^2	$F_{\text{факт.}}$
	общая фенотипическая (σPh ²)	средовая (σe ²)	генотипическая (σg ²)		
Температура пика клейстеризации	120,4	32,4	8,8	0,21	3,72*
Число падения	2767,5	721,9	205,4	0,22	3,83*
Высота амилограммы	11188	1835	935	0,34	6,10*
Вязкость водного экстракта	36,8	1,99	3,59	0,64	18,40*

*коэффициенты наследуемости H^2 достоверны при 5 %-ном уровне значимости.

кам ($F_{\text{факт.}} = 3,72 \dots 18,4$ при $F_{\text{табл.}} = 2,15$), однако между ними имелись значительные различия. Наибольшая доля генотипической дисперсии в общей фенотипической (табл. 4) отмечена по признаку ВВЭ ($H^2 = 0,64$). Менее высокой она была по высоте амилограммы ($H^2 = 0,34$), числу падения ($H^2 = 0,22$) и температуре пика клейстеризации ($H^2 = 0,21$), что и следовало ожидать, учитывая их высокую средовую дисперсию. Известно [28], что отбор по высоко наследуемым и экологически устойчивым признакам более эффективен, чем по низко наследуемым. Следовательно, селекция на высокую экспрессию признака ВВЭ будет более результативной, чем отбор по признакам ЧП, ВА и ТПК.

Большой интерес представляет оценка экологической устойчивости сортов ржи по признакам качества зерна. Прежде всего важно знать размах и направленность адаптивных реакций сорта при возделывании его в различных экологических условиях [28]. Оценка изучаемых сортов ржи проводили по четырем параметрам адаптивности (CV , SF , b_i и S^2d_i), которые характеризуют разные грани их экологической буферности. Чем меньше параметры CV и SF , тем выше экологическая устойчивость и фенотипическая стабильность признака и тем ниже его отзывчивость на изменяющиеся погодные условия года, которую оценивают по параметрам пластичности b_i и дисперсии стабильности S^2d_i .

Наибольший размах экологического варьирования наблюдали по высоте амилограммы ($CV = 35,4 \% \dots 53,8 \%$) и числу падения ($CV = 27,7 \% \dots 45,5 \%$) (табл. 5). Наоборот, фенотипически более стабильными по годам были признаки ВВЭ ($CV = 10,4 \% \dots 21,8 \%$) и ТПК ($CV = 8,3 \% \dots 10,0 \%$). Сходным образом изучаемые показатели различались по фактору стабильности SF : по признакам ЧП и ВА величина этого показателя варьировала на уровне соответственно 2,5...4,5 и 3,0...5,5, а по признакам ВВЭ и ТПК – 1,4...1,9 и 1,3...1,4. Из этого следует, что при селекции ржи на качество отбор предпочтительно проводить по признакам ВВЭ и ТПК, так как они экологически более устойчивы и фенотипически более стабильны.

Среди изучаемых сортов наиболее контрастно параметры адаптивности просматривались у высоко-вязкой популяции ГК-494вв, которая по признаку ЧП выделялась относительно низким коэффициентом экологического варьирования ($CV = 27,7 \%$), имела более высокую фенотипическую стабильность ($SF = 2,5$) и отличалась повышенной буферностью признака при испытании в различных экологических условиях ($b_i = 0,81$). Сходную характеристику этой популяции можно дать и по высоте амилограммы. По этому признаку она отличалась относительно низкой вариацией по годам ($CV = 35,4 \%$) и была лучше других сортов по фактору стабильности ($SF = 3,1$). По норме реакции на изменяющиеся метеоусловия года она находилась на уровне других сортов ($b_i = 1,04$).

Следует отметить, что величины ЧП и ВА отрицательно коррелировали с параметрами адаптивности CV и SF . Наиболее сильно эта связь проявлялась между признаками ЧП и CV ($r = -0,84 \pm 0,10$). В контексте обсуждаемой проблемы это значит, что целенаправленная селекция на высокое число падения будет способствовать созданию экологически устойчивых и фенотипически стабильных сортов ржи. Если бы такая корреляция была положительной, то генотипы демонстрировали бы повышенную отзывчивость на перепад средовых факторов, что в селекционном отношении нежелательно, так как высокая пластичность будет снижать фенотипическую стабильность признаков. Этот тезис вполне

Табл. 5. Основные параметры экологической изменчивости и пластичности различных сортов озимой ржи

Показатель	Татьяна	Московская 12	Московская 15	Московская 18	ГК-2701	ГК-796	ЖЗ-760	ГК-785	ГК-644	ГК-494вв
Число падения										
CV	42,2	33,1	40,7	39,9	41	40,2	35,8	45,5	43,8	27,7
SF	4,1	4	4	3,9	3,8	4,5	3,2	4,2	4,2	2,5
b_i	0,94	0,91	0,98	1,03	1,06	1,1	0,95	1,13	1,1	0,81
S^2_{di}	633	608	414	270	478	223	167	531	236	619
Высота амилограммы										
CV	53,8	37,6	39,4	44,3	36,4	41,6	36,1	47,5	37,9	35,4
SF	5	4,2	4,6	5,3	3,8	4,2	3	4,5	3,7	3,1
b_i	1,11	0,93	0,92	1,08	0,86	0,99	0,96	1,2	0,9	1,04
S^2_{di}	2917	3241	1995	2000	1547	3725	2551	1740	1463	4705
Вязкость водного экстракта										
CV	17,6	15,1	14,8	21,8	20	21,9	11,5	10,4	14,2	19,5
SF	1,6	1,5	1,6	1,9	1,8	1,6	1,4	1,4	1,5	1,4
b_i	1,13	1,04	0,96	1,22	1,26	0,97	0,74	0,88	0,83	1,19
S^2_{di}	0,3	0,35	0,14	0,63	0,25	0,28	0,17	0,16	0,21	2,81
Температура пика клейстеризации										
CV	8,3	10	8,5	8,6	9,8	8,7	8,7	8,4	8,7	9,2
SF	1,3	1,4	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,3	1,4	1,3
b_i	0,92	1,1	1,08	0,95	1,09	0,96	0,94	0,93	0,97	1,01
S^2_{di}	0,71	1,24	0,6	1,03	1,02	1,05	0,61	0,65	0,72	1,79

соответствует заключению А. А. Жученко [23] о том, что широкая норма реакции в адаптивном потенциале сорта не должна доминировать над его экологической устойчивостью. Такие «прямолинейные» генотипы могут представлять интерес только в случае селекции адаптивных сортов применительно к конкретным, сугубо специфическим условиям.

Выводы. Основная причина фенотипического варьирования технологических признаков качества зерна озимой ржи – не генетические различия между испытываемыми сортами, а неблагоприятные метеоусловия в период созревания зерна, которые складывались в 50 % лет. Самый широкий размах варьирования отмечен по признакам ВА (в 4,1 раза) и ЧП (в 3,7 раза), тогда как по ВВЭ и ТПК он был значительно ниже (соответственно в 1,7 и 1,3 раза).

Среди изученных генотипов лучшей по качеству зерна была популяция ГК-494вв, отселектированная на высокую вязкость водного экстракта зернового шрота. Она стабильно выделялась высоким качеством зерна в различные по метеоусловиям годы. Признак ЧП у этой популяции варьировал меньше, чем у других ($CV=27,7\%$), имел более высокую фенотипическую стабильность ($SF=2,5$) и отличался повышенной буферностью при испытании в различных экологических условиях ($b_i=0,81$). Признаки ЧП и ВА были фенотипически нестабильными и низко наследуемыми ($H^2=0,20$ и $H^2=0,34$). Наоборот, признак ВВЭ экологически более устойчив и хорошо наследуется ($H^2=0,64$), что позволяет рассчитывать на эффективный сдвиг в процессе селекции. Установлена отрицательная корреляция технологических признаков качества с параметрами адаптивности CV и SF . В селекционном аспекте это значит, что целенаправленная селекция на высокую выраженность признака ЧП будет способствовать повышению экологической устойчивости и фенотипической стабильности создаваемых сортов по качеству зерна.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального исследовательского центра «Немчиновка». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

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

Литература.

1. Гончаренко А. А. Актуальные вопросы селекции озимой ржи. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. 372 с.
2. Wehmann F., Geiger H. H., Lock A. Quantitative-genetic basis of sprouting resistance in rye // *Plant Breeding*. 1991. No. 106. P. 196–203.
3. Korzun V., Ponomareva M. L., Sorrells M. E. Economic and Academic Importance of Rye // *The Rye Genome* / eds. M. T. Rabanus-Wallace, N. Stein. *Compendium of Plant Genomes*. Springer: Cham, 2021. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-83383-1_1 (дата обращения: 20.12.2024). doi: 10.1007/978-3-030-83383-1_1
4. Breeding cereal rye (*Secale cereale*) for quality traits / L. J. Brzozowski, E. Szuleta, T. D. Phillips, et al. // *Crop Science*. 2023. Vol. 63(4). P. 1964–1987. doi: 10.1002/csc2.21022.
5. Древис Э., Зайбель В. Хлебопечение и другое использование ржи в мире // В кн. Рожь: производство, химия, технология. М.: Колос, 1980. С. 173–239.
6. ГОСТ-16990-2017. Рожь. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.
7. Сысеев В. А., Кедрова Л. И., Уткина Е. И. Значение озимой ржи для сохранения природного агроэкологического баланса и здоровья человека (обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 1. С. 14–20.
8. Селекция озимой ржи на качество зерна в условиях Красноярского края / В. Д. Кобылянский, О. В. Солодухина, М. А. Тимина и др. // *Вестник КрасГАУ*. 2017. № 5. С. 8–14.
9. Перспективные образцы озимой ржи для селекции кормовой ржи в условиях юго-западного Предуралья / А. Х. Шакирзянов, Н. И. Лещенко, И. М. Никонорова и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2019. Т. 33. № 8. С. 38–42.
10. Brummer J. M. Rye Flour // *Future of Flour – a Compendium of Flour Improvement*. Lüneburg: Verlagrimedia, 2006. 480 p.
11. Исмаилов Р. Р., Гайсина Л. Ф. Хлебопекарные качества зерна гибридов F1 озимой ржи // *Достижения науки и техники АПК*. 2015. Т. 29. № 1. С. 24–26.

12. Persson E. O. A result of amylase selection for sprouting resistance // *Cereal Commun.* 1976. Vol. 4. No. 2. P. 101–106.
13. Drews E. Results of multiyear research on the quality of rye used for bread production in the German Federal Republic // *Hodowla roslin, aklimatizacja i nasiennictwo.* 1975. T. 19. № 5–6. P. 633–639.
14. Weipert D. Pentosans as selection traits in rye breeding // *Vortr. Pflanzenzuchtung.* 1996. No. 35. P. 109–119.
15. Исмагилов Р. Р. Изменчивость содержания водорастворимых пентозанов в зерне озимой ржи // *Достижение науки и техники АПК.* 2012. № 6. С. 35–36.
16. Extract viscosity as an Indirect Assay for water-soluble Pentosan Content in Rye / D. Boros, R. R. Marquardt, B. A. Slominski, et al. // *Cereal Chem.* 1993. Vol. 70(5). P. 575–580.
17. Структурно-функциональная характеристика пентозанов муки и теста сортов озимой ржи / М. Л. Пономарева, С. Н. Пономарев, Г. С. Маннанова и др. // *Достижения науки и техники АПК.* 2019. Т. 33. № 8. С. 33–37. doi: 10.24411/0235-2451-2019-10807.
18. Показатели качества и фракционный состав зерна сортов озимой ржи по крупности в условиях Нижнего Поволжья / Н. Н. Нуржидина, Д. А. Жиганов, Т. Я. Ермолаева и др. // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции.* 2023. № 184 (4). С. 153–162. doi: 10.30901/2227-8834-2023-4-153-162.
19. Гончаренко А. А. Новые направления в селекции озимой ржи на целевое использование // *Зернобобовые и крупяные культуры.* 2016. № 2 (18). С. 25–32.
20. Фенотипическая оценка содержания пентозанов в ржаном шроте методом определения вязкости водного экстракта / М. Л. Пономарева, С. Н. Пономарев, Л. Ф. Гильмуллина и др. // *Достижения науки и техники АПК.* 2015. Т. 29. № 11. С. 32–35.
21. Информативность параметров качества зерна для селекции озимой ржи / И. В. Лыскова, Е. М. Лисицын, Т. В. Лыскова и др. // *Таврический вестник аграрной науки.* 2023. № 3.(35). С. 145–157. doi: 10.5281/zenodo.10141453.
22. Тороп А. А., Чайкин В. В., Тороп Е. А. Селекция озимой ржи в Центрально-Черноземном регионе России на повышение урожайности и адаптивности. Воронеж: Истоки, 2023. 440 с.
23. Жученко А. А. Эколого-генетические проблемы селекции растений // *Сельскохозяйственная биология.* 1990. № 3. С. 3–23.
24. Смирнов А. В., Мартынов С. П., Кильчевский А. В. Биометрия в генетике и селекции растений. М.: Издательство МСХА, 1992. 268 с.
25. Lewis D. Gene-environment interaction: A relationship between dominance, heterosis, phenotypic stability and variability // *Heredity.* 1954. No. 8. P. 333–356.
26. Eberhart S. A., Russell W. A. Stability parameters for comparing varieties // *Crop Sci.* 1966. No. 6. P. 36–40.
27. Многопараметрическая оценка качества зерна популяций озимой ржи с различной вязкостью водного экстракта / А. А. Гончаренко, В. Я. Черных, А. В. Макаров и др. // *Российская сельскохозяйственная наука.* 2022. № 1. С. 31–37.
28. Пономарева М. Л., Пономарев С. Н. Оптимизация параметров качества зерна для селекции озимой ржи // *Вавиловский журнал генетики и селекции.* 2019. Т. 23. № 3. С. 320–327.

Поступила в редакцию 24.02.2025
После доработки 12.03.2025
Принята к публикации 06.04.2025

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ АДАПТИВНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛИНИЙ ЯРОВОГО ОВСА ПО ПРИЗНАКУ «МАССА 1000 ЗЕРЕН» В КИРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2025 г. Н. В. Емелева, кандидат сельскохозяйственных наук,
Г. А. Баталова, доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН

Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого,
610007, Киров, ул. Ленина, 166а
E-mail: Natasort@yandex.ru

Исследования проводили с целью сравнительной оценки экологической пластичности и стабильности линий ярового овса по показателю «масса 1000 зерен» для выделения адаптивных к условиям Волго-Вятского региона. Эксперименты осуществляли в 2022–2024 гг. в Кировской области на 8 линиях ярового пленчатого овса в конкурсном сортоиспытании в четырехкратной повторности. Почва участка – окультуренная дерново-подзолистая среднесуглинистая. В 2022 г. наблюдали избыточное увлажнение ($GTK = 2,00$); в 2023 г. сложились оптимальные условия для роста и развития растений ($GTK = 1,64$); в 2024 г. – отмечали дефицит влаги ($GTK = 1,10$). Показатели экологической адаптивности вычисляли по методикам С. А. Eberhart и В. А. Russell (b , σ^2), Р. А. Удачину (И, У), А. А. Грязнову (ИЭП); Э. Д. Неттевичу и др. (ПУСС, L). По результатам двухфакторного дисперсионного анализа на массу 1000 зерен достоверно повлияли погодные условия (58,9 %), генотип-средовые взаимодействия (28,1 %) и генотип изучаемых линий (13,0 %). Благоприятные условия для формирования высокой массы 1000 зерен сложились в 2024 г. (индекс условий среды – 1,77) при максимальной в опыте величине этого показателя 47,1 г у линии 41h18. По коэффициенту вариации массы 1000 зерен изучаемые линии отнесены к слабоизменчивым ($CV < 10$ %), кроме 40h20 ($C_v = 12,74$ %) и 41h18 ($C_v = 10,46$ %). Первое место по трем изучаемым показателям экологической адаптивности ($b_i = 2,06$; $I = 26,4$ %; $ИЭП = 1,04$) занимала линия 40h20, однако по параметрам, характеризующим стабильность генотипа, она себя не проявила ($Y = 48,5$; $L = 3,35$; $ПУСС = 143,3$). Наиболее высокий уровень адаптивности к условиям Кировской области по показателю «масса 1000 зерен» имела перспективная линия 91h18 (сумма рангов 22).

ASSESSMENT OF INDICATORS OF ECOLOGICAL PLASTICITY AND STABILITY OF PROMISING SPRING OAT LINES BASED ON THE «1,000 GRAIN WEIGHT» IN THE KIROV REGION

N. V. Emeleva, G. A. Batalova

Rudnitsky Federal Agrarian Scientific Center of the North-East,
610007, Kirov, ul. Lenina, 166a
E-mail: Natasort@yandex.ru

The research was conducted in order to compare the ecological plasticity and stability of spring oat varieties according to the «1,000 grain weight» indicator in order to identify those that are adaptive to the conditions of the Volga-Vyatka region. The experiments were conducted in 2022–2024 in the Kirov region with 8 varieties of spring film oats in a competitive variety testing with four repetitions. The soil at the site was cultivated sod-podzol medium loam. In 2022, there was excessive moisture ($GTK = 2.00$), in 2023 optimal conditions were created for plant growth and development ($GTK = 1.64$), and in 2024 there was a lack of moisture ($GTK = 1.10$). The indicators of ecological adaptability were calculated using methods developed by S. A. Eberhart, B. A. Russell (b , σ^2), R. A. Udachin (I, U), A. A. Gryaznov (IEP), and E. D. Nettevich et al. (PUSS, L). According to the results of the two-factor analysis of variance, the weight of 1,000 grains was significantly affected by weather conditions (58.9 %) and genotype $\times$ environmental interactions (28.1 %). The genotype of the studied lines had a slight effect (13.0 %). Favorable conditions for the formation of a high mass of 1,000 grains developed in 2024, with an index of environmental conditions of 1.77 and a maximum experimental value of 47.1 grams at the 41h18 line. The studied lines were classified as slightly variable based on the coefficient of variation for the mass of 1000 grains ($CV < 10$ %). However, the 40h20 and 41h18 lines had higher coefficients of variation ($CV = 12.74$ % and $CV = 10.46$ %, respectively). The 40h20 line ranked first in terms of three indicators of ecological adaptability ($b_i = 2.06$, $I = 26.4$ %, $IEP = 1.04$). However, in terms of stability indicators, it did not perform well ($Y = 48.5$, $L = 3.35$, $PUSS = 143.3$). Therefore, the 91h18 line, which is the sum of 22 rankings, had the highest level of adaptability to the conditions of the Kirov region when considering the «mass of 1,000 grains» indicator.

Ключевые слова: овес, масса 1000 зерен, пластичность, стабильность, индекс условий среды.

Keywords: oats, 1,000 grain weight, plasticity, stability, index of environment conditions

Яровой овес – одна из главных зернофуражных культур Волго-Вятского региона. Зерно культуры характеризуется высоким содержанием белка (10...15 %), жира (5...6 %) и крахмала (40...45 %), содержит полезные микроэлементы и аминокислоты [1, 2], поэтому его часто используют для производства продуктов диетического, детского и профилактического питания [3, 4].

В последние десятилетия происходит глобальное изменение климата – зимы становятся теплее, повышается температура воздуха, нередко летние засухи. Это увеличивает риски производителей сельскохозяйственной продукции, поэтому актуальны вопросы селекции со-

поров, устойчивых к абиотическим и биотическим стрессам, которые характеризуются высокой пластичностью и стабильностью хозяйственно ценных признаков [5, 6].

Масса 1000 зерен – один из важнейших структурных элементов продуктивности [7], однако работ по экологической адаптивности сортов в разрезе этого показателя очень мало, а в Волго-Вятском регионе нет вовсе. В реестр селекционных достижений по региону внесен 51 сорт ярового овса, однако не все они адаптивны к изменяющимся погодным условиям региона возделывания. Поэтому исследования по выявлению перспек-

тивных линий и сортов, адаптированных к конкретному месту возделывания (региональная селекция) актуальны.

Крупное, хорошо выполненное зерно имеет большой запас питательных веществ, как следствие, всхожесть и жизнеспособность таких семян выше, чем мелких [8]. Этот признак напрямую влияет на урожайность сорта [9], поэтому отбор линий, имеющих повышенную массу 1000 зерен, очень актуален.

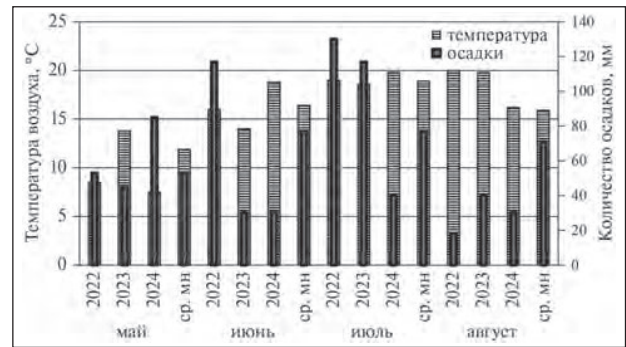
Цель исследования – сравнительная оценка экологической пластичности и стабильности линий ярового овса по показателю «масса 1000 зерен» для выделения адаптивных к условиям Волго-Вятского региона.

Методика. Эксперименты проводили в 2022–2024 гг. на опытном поле ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (г. Киров, Кировская область). Объектом исследований были 8 перспективных линий ярового пленчатого овса. Их изучали в питомнике конкурсного сортоиспытания. Учетная площадь делянки – 10 м², повторность четырехкратная. Предшественник – чистый пар. Посев проводили при достижении почвой физической спелости сеялкой СКС-6-10 рядовым способом нормой высева 5 млн всхожих семян на 1 га, глубина заделки семян – 3...4 см. Почва участка – окультуренная дерново-подзолистая среднесуглинистая. Содержание подвижного фосфора и калия (по ГОСТ Р 54650-2011) – 350...395 мг/кг и 200...240 мг/кг почвы соответственно, рН солевой вытяжки (по ГОСТ 26483-85) – 5,7...6,1 ед., содержание органического вещества (по ГОСТ 26213-91) – 2,43 %.

Массу 1000 зерен определяли согласно ГОСТ 12042-80. Опыт – двухфакторный: фактор А – генотип, фактор Б – год исследования. Кроме того, рассчитывали коэффициент вариации признака (Cv) по Б. А. Доспехову для каждого образца по годам и компенсаторную способность генотипа ((min+max)/2) по А. А. Гончаренко [10]. Показатели экологической адаптивности (пластичность – b , и стабильность – σd^2) линий вычисляли по методике S. A. Eberhart и B. A. Russell [11], коэффициент интенсивности (I) и показатель устойчивости индекса стабильности (У) – по Р. А. Удачину [12]. Индекс экологической пластичности (ИЭП) определяли по методике, предложенной А. А. Грязновым [13]. Показатель уровня стабильности сорта (ПУСС) и индекс стабильности (L) рассчитывали по Э. Д. Неттевичу и др. [14].

Для оценки адаптивного потенциала исследуемых линий использовали комплексный подход, который базировался на определении показателей экологической адаптивности и последующем ранжировании линий. В качестве основных параметров были выбраны b , σd^2 , I, У, ИЭП, L, ПУСС. Ранжирование линий осуществляли по каждому показателю в порядке возрастания значений (ранг 1...8), где ранг 1 соответствовал наиболее желаемому значению показателя (наиболее ценная линия), а ранг 8 – наименее желаемому (наименее ценная линия). Адаптивный потенциал каждой линии оценивали на основе суммы присвоенных рангов по всем показателям. Линии с меньшей суммой рангов интерпретировали как обладающие более высоким адаптивным потенциалом.

В 2022 г. посев осуществляли 8 мая. Холодная погода не способствовала дружным всходам. Средняя температура мая была на 3 °C ниже нормы (см. рисунок). В этот период отмечали недостаточное увлажнение почвы и нестабильный температурный фон. ГТК составил 0,61. Период формирования зерна характеризовался теплой погодой с достаточным, иногда избыточным увлажнением почвы. Сумма осадков в июне составила 117 мм, или 150 % от нормы. В июле количество выпавших



Характеристика метеорологических условий вегетационного периода овса в годы исследований.

осадков также превысило средние многолетние данные на 70 %. ГТК «всходы – колошение» составил 3,04, что соответствует переувлажнению. В целом вегетационный период 2022 г. характеризовался низкими температурами в начале роста растений овса и избыточным увлажнением почвы во время их развития (ГТК – 2,00).

В 2023 г. проводили самый ранний посев за три года исследований – 18 апреля, так как температура воздуха в середине апреля превысила +15 °C. При этом из-за сухой погоды всходы появились только через месяц. ГТК за период «посев – всходы» составил 0,64. В июне погода была неустойчивой – от очень теплой до холодной, преимущественно сухой или с небольшими осадками. За месяц выпало 30 мм осадков (38 % от нормы). Температурный режим июля 2023 г. находился на уровне средних многолетних данных (+18...+19 °C). Из-за частых сильных дождей сумма осадков превысила норму на 127 % (117 мм). В среднем условия, сложившиеся в 2023 г., были достаточно благоприятны для роста и развития овса и находились на уровне средних многолетних. ГТК за период вегетации составил 1,64.

Последний год исследований (2024 г.) отличался холодной погодой в период от посева до кущения с большим количеством осадков. Температура во время посева опускалась до +2 °C, что на 7 °C меньше средних многолетних значений, а ГТК «посев – всходы» достигал рекордных значений 7,36. В остальной период вегетации наблюдали неустойчивую погоду, от жаркой до умеренной теплой, с недостаточным увлажнением. Средняя температура воздуха июня – июля составляла +18...+20 °C (отклонение от нормы на 1...2 °C). Гидротермический коэффициент периодов «всходы – выметывание» и «выметывание – полная спелость» был равен 0,81 и 0,76 соответственно. В среднем за период вегетации величина ГТК составляла 1,10. В целом различия климатических условий за три года исследований позволили сделать объективную оценку перспективных линий ярового пленчатого овса по показателям пластичности и стабильности.

Результаты и обсуждения. Статистически значимое влияние на формирование показателя «масса 1000 зерен» оказывали метеорологические условия года исследования (58,9 %) и, в меньшей степени, генотип изучаемых линий (13,0 %). Совместное воздействие факторов «генотип × год» также было существенным и объясняло 28,1 % изменчивости (табл. 1).

За годы исследований наименьшая масса 1000 зерен отмечена в 2022 г. с варьированием от 36,2 г у линии 41h20 до 39,5 г у 91h18, при индексе условий среды $I_j = -3,1$ (табл. 2). В 2023 г. этот размах составлял от 39,9 г у образца 3h19 до 44,6 г у 40h20. Наибольшие различия наблюдали в самом благоприятном 2024 г. ($I_j = 1,8$)

Табл. 1. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа ярового овса по показателю «масса 1000 зерен» (2022–2024 гг.)

Источник варьирования	Сумма квадратов (SS)	Степени свободы (df)	Среднее квадратическое (MS)	F		Доля влияния фактора, %
				F _{факт}	F _{теор}	
Фактор А (генотип)	26,1	7	3,72	0,9	2,76	13,0
Фактор Б (год)	118,4	2	59,2	14,7	3,74	58,9
Взаимодействие факторов А и Б	57,0	14	211,9	6,69	1,81	28,1
Остаток (ошибка)	2,3	72	0,03	–	–	–
Общее	203,8	95	–	–	–	–

с варьированием от 39,9 г у линии 41h20 (как и в 2022 г.) до 47,1 г у 41h18.

В среднем за три года изучения по 8 линиям ярового овса масса 1000 зерен составила 41,0 г. Линия 41h18 характеризуется максимальным в опыте показателем массы 1000 зерен как по средним многолетним данным (42,5 г), так и по величине компенсаторной способности $((\min + \max)/2) - 42,6$ г. Наилучшая компенсаторная способность по массе 1000 зерен отмечена у линий 3h19, 40h20, 41h18–41,0...42,6 г.

Согласно рекомендованной классификации, при коэффициенте вариации $C_v < 10$ % линии можно отнести к слабоизменчивым [15]. В изученном наборе линий только две 41h18 и 40h20 превысили этот порог – $C_v = 10,5$ и 12,7 % соответственно. Сходные результаты отмечены в работе Л. П. Байкаловой, Ю. И. Серебренникова [16]. На основании анализа изменчивости массы 1000 зерен по годам линия 91h18 ($C_v = 3,4$ %) характеризуется низкой реакцией на улучшение условий выращивания и высокой стабильностью, что указывает на ее способность формировать устойчивый урожай независимо от агроклиматических условий. В отличие от нее, линия 40h20 ($C_v = 12,74$ %) демонстрирует высокую отзывчивость на улучшение условий внешней среды, максимально используя их для формирования крупного зерна.

В ходе исследований у генотипов 40h20 и 41h18 были

Табл. 2. Масса 1000 зерен, коэффициент вариации и компенсаторная способность линий ярового овса (2022–2024 гг.)

Линия	2022 г.	2023 г.	2024 г.	Средняя по генотипам (Y)	Компенсаторная способность $((\min + \max)/2)$	Коэффициент вариации (C_v), %
27h20	37,9	43,1	41,7	40,9	39,8	6,58
3h19	39,2	39,9	42,8	40,6	41,0	4,70
40h20	36,6	44,6	47,0	42,7	41,8	12,74
41h20	36,2	43,3	39,9	39,8	38,1	8,92
42h20	37,5	40,6	40,4	39,5	39,0	4,39
50h18	37,6	43,4	40,8	40,6	39,2	7,16
91h18	39,5	41,4	42,2	41,0	40,9	3,38
41h18	38,2	42,4	47,1	42,5	42,6	10,46
Средняя по годам (Y)	37,8	42,3	42,7	41,0	40,3	
НСР ₀₅	1,71	2,01	2,71			
Индекс условий среды (I)	–3,13	1,37	1,77			

выявлены высокие коэффициенты регрессии ($b_i > 1$), что свидетельствует об их способности формировать крупное зерно (47,0 и 47,1 г соответственно) в годы с благоприятными погодными условиями (табл. 3). Линии

27h20, 41h20 и 50h18 ($b_i = 0,92...1,01$) продемонстрировали соответствие изменения признака изменению условий среды, что указывает на их умеренную пластичность. Генотипы 3h19, 91h18 и 42h20, характеризующиеся низкими значениями пластичности ($b_i = 0,49...0,63$), отнесены к экстенсивной группе.

В соответствии с рекомендациями В. И. Полонского и соавторов [17], линии с высокой стабильностью и крупным зерном перспективны для использования в селекции новых сортов овса. В нашем исследовании низкая стабильность выявлена у генотипов 41h18 и 41h20 ($\sigma d^2 = 8,53$ и 7,28 соответственно), в то время как линии 42h20 и 91h18 характеризовались высокой величиной этого показателя ($\sigma d^2 = 0,10...0,18$). Наиболее ценной с точки зрения сочетания пластичности и стабильности была линия 40h20 ($b_i = 2,06$; $\sigma d^2 = 1,25$).

В соответствии с методикой, предложенной

Табл. 3. Показатели пластичности, стабильности линий ярового овса в исследуемый период (2022–2024 гг.)

Линия	b_i	σd^2	I_i , %	Y_i , %	$ИЭП$	L	$ПУСС$
27h20	0,93	1,58	12,7	74,9	1,00	6,22	254,3
3h19	0,49	3,67	8,8	82,3	0,99	8,65	351,5
40h20	2,06	1,25	26,4	48,5	1,04	3,35	143,3
41h20	1,01	7,28	16,4	67,3	0,97	4,46	177,5
42h20	0,63	0,10	7,8	85,0	0,96	8,99	355,2
50h18	0,92	4,43	14,2	71,8	0,99	5,67	230,4
91h18	0,50	0,18	6,6	86,9	1,00	12,14	498,2
41h18	1,45	8,53	21,7	56,5	1,04	4,07	173,2

Р. А. Удачным и А. П. Головоченко, к интенсивному типу были отнесены линии 40h20 и 41h18, что согласуется с результатами, полученными при использовании методики С. А. Eberhart и В. А. Russell. Эти линии характеризовались высокими показателями пластичности ($I_i = 26,4$ % и 21,7 % соответственно). Линии 3h19, 42h20 и 91h18 продемонстрировали слабую реакцию на улучшение условий среды ($I_i = 6,6...8,8$ %). Еще три образца – 27h20 ($I_i = 12,7$ %), 41h20 ($I_i = 16,4$ %) и 50h18 ($I_i = 14,2$ %) – были классифицированы как линии полунтенсивного типа (см. табл. 3). Линии, отнесенные к интенсивному типу (40h20 и 41h18), имели наименьшие показатели устойчивости индекса стабильности (Y_i) – 48,5 % и 56,5 % соответственно. В то же время экстенсивные линии (3h19, 42h20 и 91h18) характеризовались наибольшими его величинами – от 82,3 до 86,9 %.

По индексу экологической пластичности (ИЭП) особых различий между исследуемыми линиями не установлено. Самый высокий ИЭП зафиксирован для линий 40h20 и 41h18, в обоих случаях он был равен 1,04. Наименьшую величину этого показателя (0,96) наблюдали у линии 42h20.

На основании анализа индекса стабильности (L) наиболее стабильным формированием показателя масса 1000 зерен характеризовались линии 3h19, 42h20 и 91h18 ($L = 8,65...12,14$). Они продемонстрировали способность формировать относительно высокую массу 1000 зерен в различных климатических условиях, о чем свидетельствуют средние значения за годы исследований (3h19–40,6 г; 91h18–41,0 г). Исключение – линия 42h20, у которой средняя величина этого показателя составляла 39,5 г.

Линия 91h18 характеризовалась максимальным в опыте показателем уровня стабильности сорта ($ПУСС = 498,2$), что подтверждает ее стабильность по признаку «масса 1000 зерен» в течение всего периода исследований. Высокие значения $ПУСС$ также были зафиксированы для линий 3h19 и 42h20 (соответственно 351,5 и 355,2).

Табл. 4. Ранжирование линий ярового овса по показателям адаптивности

Линия	Ранг							Сумма рангов
	b_i	σb^2	$I_i, \%$	$Y, \%$	$ИЭП$	L	$ПУСС$	
27h20	4	4	5	4	2	4	4	27
3h19	8	5	6	3	3	3	3	31
40h20	1	3	1	8	1	8	8	30
41h20	3	7	3	6	4	6	6	35
42h20	6	1	7	2	5	2	2	25
50h18	5	6	4	5	3	5	5	33
91h18	7	2	8	1	2	1	1	22
41h18	2	8	2	7	1	7	7	34

Согласно оценке суммы рангов, рассчитанной с использованием показателей экологической адаптивности, наиболее высоким уровнем адаптивности по признаку «масса 1000 зерен» обладает перспективная линия 91h18 (сумма рангов 22). В то же время линии 50h18, 41h18 и 41h20, характеризующиеся суммой рангов в диапазоне 33...35, продемонстрировали слабую отзывчивость на улучшение условий выращивания. Это подтверждают их низкие ранги (5...8 место), что свидетельствует о меньшей способности адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды (табл. 4).

Выводы. На формирование массы 1000 зерен в исследуемой совокупности линий значительное влияние оказывали метеорологические условия года (58,9 %) и взаимодействие генотипа со средой (28,1 %), в то время как прямое влияние генотипа выражено в меньшей степени (13,0 %). Оценка адаптивности изучаемых линий по признаку «масса 1000 зерен» выявила следующие закономерности:

- линии 3h19, 40h20 и 41h18 обладают наилучшей компенсаторной способностью, характеризующейся значениями в диапазоне 41,0...42,6 г;

- большинство исследованных линий демонстрируют низкую изменчивость признака «масса 1000 зерен» ($C_v < 10 \%$), за исключением линий 40h20 ($C_v = 12,74 \%$) и 41h18 ($C_v = 10,46 \%$);

- линия 40h20 характеризуется высокой пластичностью ($b_i = 2,06$ и $I_i = 26,4 \%$);

- линия 91h18, отнесенная к экстенсивному типу, демонстрирует самый высокий показатель устойчивости индекса стабильности ($Y = 86,9 \%$);

- максимальные в опыте значения индекса экологической пластичности ($ИЭП = 1,04$) наблюдали у линий 40h20 и 41h18;

- линии 3h19, 42h20 и 91h18 характеризуются наиболее стабильными показателями массы 1000 зерен ($L = 8,65...12,14$) и высокими величинами показателя уровня стабильности сорта ($ПУСС = 351,5...498,2$).

Наивысшим уровнем экологической адаптивности по признаку «масса 1000 зерен» характеризуется перспективная линия 91h18, что подтверждается результатами анализа суммы рангов (22), рассчитанной на основе показателей экологической адаптивности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

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

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы заявляют, что в работе отсутствует конфликт интересов.

Литература.

1. Василевский В. Д. Адаптивный потенциал зерновой продуктивности сортов овса в Южной лесостепи Западной Сибири в зависимости от предшественника // Вопросы степеведения. 2024. № 1. С. 114–125.
2. Экологическое сортоизучение овса ярового (*Avena sativa* L.) в северной лесостепи Челябинской области / Д. А. Пырников, Н. В. Глаз, Л. А. Пуалаккайнан и др. // Вестник Омского Государственного аграрного университета. 2023. № 1 (49). С. 57–65. doi: 10.48136/2222-0364_2023_1_57.
3. Изучение биологической ценности белка зерна овса голозерного / Е. Н. Шаболкина, С. Н. Шевченко, Г. А. Баталова и др. // Зернобобовые и крупяные культуры. 2020. № 2 (34). С. 78–83. doi: 10.24411/2309-348X-2020-11173.
4. Марьин В. А., Верещагин А. Л. Фракционный состав по крупности зерна овса // Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых с международным участием. Бийск: Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета, 2024. С. 361–366.
5. Loskutov I. G., Khlestkina E. K. Wheat, barley, and oat breeding for health benefit components in grain // Plants. 2021. Vol. 10. No. 1. Article 86. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/1/86> (дата обращения: 17.03.2025). doi: 10.3390/plants10010086.
6. Особенности формирования масличности у сортов ярового овса в резко-континентальных климатических условиях / О. А. Юсова, П. Н. Николаев, В. С. Васюкевич и др. // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. 2020. № 3(56). С. 86–93 doi: 10.31677/2072-6724-2020-56-3-86-93.
7. Зобнина И. В., Корелина В. А., Батакова О. Б. Оценка стабильности и пластичности голозерных форм овса ярового по урожайности и массе 1000 зерен в условиях Северного региона // Вестник РУДН. Серия: Агрономия и животноводство. 2024. Т. 19. № 1. С. 76–89. doi: 10.22363/2312-797X-2024-19-1-76-89.
8. Тулякова М. В., Баталова Г. А., Пермякова С. В. Адаптивный потенциал генофонда овса пленчатого по массе 1000 зерен // Зерновое хозяйство России. 2021. № 5(77). С. 3–8. doi: 10.31367/2079-8725-2021-77-5-3-8.
9. Применение критериев экологической стабильности для оценки сортов ярового овса в контрастных условиях Омского региона по массе 1000 зерен / П. Н. Николаев, О. А. Юсова, И. В. Сафонова и др. // Аграрная наука. 2021. № 11. С. 3–8. doi: 10.30906/1999-5636-2021-11-3-8.
10. Гончаренко А. А. Об адаптивности и экологической устойчивости сортов зерновых культур // Вестник РАСХН. 2005. № 6. С. 49–53.
11. Eberhart S. A., Russel W. A. Stability parameters for comparing varieties // Crop Sci. 1966. Vol. 6. No. 1. P. 36–40.
12. Удачин Р. А., Головаченко А. П. Методика оценки экологической пластичности сортов пшеницы // Селекция и семеноводство. 1990. № 5. С. 2–6.
13. Грязнов А. А. Селекция ячменя в Северном Казахстане // Селекция и семеноводство. 2000. № 4. С. 2–8.
14. Нептеевич Э. Д., Моргунов А. И., Максименко М. И. Повышение эффективности отбора яровой пшеницы на стабильность урожайности и качества

- зерна // Вестник сельскохозяйственной науки. 1985. № 1. С. 66–73.
15. Филиппов Е. Г., Брагин Р. Н., Донцов Д. П. Анализ показателей адаптивности сортов и линий ярового ячменя в экологическом сортоиспытании // Таврический вестник аграрной науки. 2022. № 4(32). С. 221–230.
16. Байкалова Л. П., Серебренников Ю. И. Пластичность и стабильность ярового овса по урожайности и массе 1000 зерен // Вестник КрасГАУ. 2020. № 4(157). С. 37–44. doi: 10.36718/1819-4036-2020-4-37-44.
17. Повышенная стабильность образцов овса, ячменя и пшеницы по массе 1000 зерен не связана с меньшей крупностью зерна / В. И. Полонский, А. В. Сумина, С. А. Герасимов и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2023. 2(184). С. 52–65. doi: 10.30901/2227-8834-2023-2-52-65.

Поступила в редакцию 04.02.2025

После доработки 19.03.2025

Принята к публикации 08.04.2025

СОЗДАНИЕ УДВОЕННЫХ ГАПЛОИДОВ *ORYZA SATIVA* L. С ГЕНОМ УСТОЙЧИВОСТИ РИСА К ПИРИКУЛЯРИОЗУ *Pi-b* НА РОССИЙСКОМ ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ

© 2025 г. М. В. Илюшко, кандидат биологических наук, С. С. Гученко

Федеральный научный центр агrobiотехнологий Дальнего Востока им. А. К. Чайки,
692539, Приморский край, пос. Тимирязевский, ул. Воложенина, 30
E-mail: ilyushkoiris@mail.ru

Исследование проводили с целью получения удвоенных гаплоидов с геном *Pi-b* для селекции риса. В результате гибридизации между дальневосточными сортами и образцом *Oxy* 2x (носитель гена *Pi-b*) создано 13 гибридов F_1 в шести гибридных комбинациях: Садко×*Oxy* 2x, Луговой×*Oxy* 2x, Дарий 23×*Oxy* 2x, Алмаз×*Oxy* 2x, удвоенный гаплоид (Дон 4237×Долинный)×*Oxy* 2x, Ханкайский 429×*Oxy* 2x. Для перевода в константное гомозиготное состояние исходных растений доноров F_1 применяли технологию андрогенеза *in vitro*. Предварительно отобраны 35 гибридных растений, несущих аллель устойчивости гена *Pi-b*. В культуру *in vitro* ввели 10246 пыльников риса. Каллусообразование наблюдали у 25 из 35 гибридов F_1 . Самое высокое калусообразование отмечали у гибридных растений Луговой×*Oxy* 2x – 9,33 % и Ханкайский 429×*Oxy* 2x – 27,50 %, в среднем по всей выборке оно было низким – 2,45 %, что нехарактерно для дальневосточных генотипов. Регенерацию наблюдали на каллусах 7 гибридов риса 4 гибридных комбинаций: Дарий 23×*Oxy* 2x, Садко×*Oxy* 2x, Ханкайский 429×*Oxy* 2x и Луговой×*Oxy* 2x. По результатам ПЦР-анализа из 63 удвоенных гаплоидов отобрано 33 растения с аллелем устойчивости гена *Pi-b*. На вегетационной площадке посеяли 44 линии удвоенных гаплоидов, из которых 3 не взошли. Коллекционный образец *Oxy* 2x, обладающий прочным креплением зерновки на оси метелки, вступающая во взаимодействие с локусами других сортов, ответственных за этот признак, дает осыпавшийся в разной степени фенотип в гомозиготном состоянии у удвоенных гаплоидов: 11 линий со средней степенью осыпаваемости и 30 сильноосыпавшихся линий. В целом общий выход исходного селекционного материала для последующих отборов в полевых условиях весьма ограничен и бесперспективен из-за осыпаваемости зерновки.

CREATION OF *ORYZA SATIVA* L. DOUBLED HAPLOYDS WITH THE *Pi-b* GENE OF RICE BLAST RESISTANCE IN THE RUSSIAN FAR EAST

M. V. Ilyushko, S. S. Guchenko

Chaika Federal Scientific Center for Agrobiotechnology of the Far East,
692539, Primorskiy krai, pos. Timiryazevskiy, ul. Volozhenina, 30
E-mail: ilyushkoiris@mail.ru

The study was conducted with the aim of obtaining doubled haploids with the *Pi-b* gene for rice *Oryza sativa* L. breeding. As a result of hybridization between Far Eastern varieties and the *Oxy* 2x sample (carrier of the *Pi-b* gene), 13 F_1 hybrids of six hybrid combinations were created: Sadko×*Oxy* 2x, Lugovoy×*Oxy* 2x, Darius 23×*Oxy* 2x, Almaz×*Oxy* 2x, doubled haploid (Don 4237×Dolinsky)×*Oxy* 2x, Khankaisky 429×*Oxy* 2x. In vitro androgenesis technology was used to transfer the original F_1 donor plants to a constant homozygous state. 35 hybrid plants carrying the resistance allele of the *Pi-b* gene were preliminarily selected. 10246 rice anthers were introduced into the in vitro culture. Callus formation was observed in 25 of 35 F_1 hybrids. The highest callus formation values were noted in the hybrid plants Lugovoy×*Oxy* 2x – 9.33 % and Khankaisky 429×*Oxy* 2x – 27.50 %, and on average for the entire sample it was low – 2.45 %, which is not typical for Far Eastern genotypes. Regeneration was observed on calli of seven rice hybrids of four hybrid combinations: Darius 23×*Oxy* 2x, Sadko×*Oxy* 2x, Khankaisky 429×*Oxy* 2x and Lugovoy×*Oxy* 2x. Based on the results of PCR analysis, 33 plants with the resistance allele of the *Pi-b* gene were selected from 63 rice doubled haploids. 44 lines of doubled haploids were sown on the vegetation plot, three of which did not sprout. The collection sample *Oxy* 2x, being itself with a strong attachment of the grain to the panicle axis, interacting with the loci of other varieties responsible for the strength of the grain attachment, produces a phenotypes that fall off to varying degrees in the homozygous state in doubled haploids: 11 lines with an average degree of shedding, 30 lines with strong shedding. Thus, the total yield of the initial breeding material for subsequent selections in field conditions is very limited and unpromising due to the falling of the grain.

Ключевые слова: *Oryza sativa* L., *Oxy* 2x, андрогенез *in vitro*, пирикулярриоз, *Pi-b*, удвоенные гаплоиды.

Keywords: *Oryza sativa* L., *Oxy* 2x, androgenesis *in vitro*, *Pyricularia oryzae* Cav., *Pi-b*, doubled haploids.

Дальневосточная зона рисосеяния характеризуется значительной фитопатологической напряженностью вследствие влажного муссонного климата, способствующего распространению возбудителей заболеваний *Oryza sativa* L. [1]. *Pyricularia oryzae* Cav. относят к числу наиболее вредоносных патогенов риса во всем мире [2, 3]. На Дальнем Востоке России отмечают обширный расовый состав пирикуляррии [1, 4]. Этому способствовала исторически сложившаяся ситуация: первые сорта риса на территорию Приморского края завезли из Кореи и Японии, на них впервые болезнь была выявлена в 1926 г. Позднее она распространилась и на другие

сорта. Закрепившиеся расы патогена на современном этапе рисосеяния стали пополняться из несортных китайских посевов культуры [5], нарушая сложившийся на территории региона состав *P. oryzae*.

Последние сорта риса дальневосточной селекции, внесенные в государственный реестр селекционных достижений, обладают средней и высокой степенью устойчивости к пирикулярриозу. В их генотипе идентифицированы гены *Pi-ta2* и *Pi-z*, ответственные за резистентность к пирикулярриозу, в моногенном состоянии [6]. На сегодняшний день в регионе наблюдают снижение устойчивости сортов *O. sativa* к патогену. Селекция риса

не успевает за постоянно расширяющимся расовым составом *P. oryzae* [1]. Таким образом, необходимы новые высокоустойчивые к пирикулярриозу сорта культуры.

В мире известно более ста генов устойчивости к *P. oryzae* [3, 7, 8]. К наиболее эффективным генам для дальневосточной зоны рисосеяния относят *Pi-b* [9]. Он также актуален для селекции в сопредельных провинциях Китая [10, 11], откуда поступают семена для несоответствующих посевов культуры. Кроме того, пирамидирование генов устойчивости с участием *Pi-b* позволяет создавать иммунные селекционные линии и сорта в разных странах [12, 13, 14]. Интрогрессия *Pi-b* в дальневосточные сорта может повысить устойчивость риса и способствовать ее длительному сохранению.

На Дальнем Востоке России *O. sativa* культивируют в пределах ареала с минимально допустимой суммой эффективных температур. Для выращивания риса на этой территории необходимы скороспелые сорта с периодом вегетации до 110 дней. Однако большинство образцов, используемых в качестве доноров различных генов устойчивости, позднеспелые [12, 14, 15]. Это затрудняет как гибридизацию, так и отбор форм для селекции. Все растения коллекционного образца Оху 2х (США) несут аллель устойчивости гена *Pi-b* [16]. Кроме того, он полиморфен по гену *Pi-ta*. По результатам 6 лет изучения этот образец слабо поражают дальневосточные расы пирикуляррии [9]. На Дальнем Востоке при использовании рассадной технологии выращивания растений в защищенном грунте с последующей пересадкой в условия вегетационной площадки он созревает за 120...125 дней, а также уступает районированным сортам по продуктивности растения (1,0 г) и массе 1000 зерен (21,3 г). Оху 2х представляется перспективным для использования в селекции на устойчивость к пирикулярриозу.

Андрогенез *in vitro* широко применяют в селекции *O. sativa* с шестидесятих годов прошлого столетия. Это позволяет в течение одного поколения перевести гетерозиготные гибридные растения в гомозиготные удвоенные гаплоиды (DH), что упрощает отбор по фенотипу лучших растений без риска расщепления в последующих поколениях [17, 18, 19]. Маркер-ориентированная селекция растений (MAS) способствовала усилению работ в андрогенезе *in vitro*, так как отбор удвоенных гаплоидов проводят по целевым генам интереса с использованием молекулярных маркеров [17, 20, 21].

Цель исследования – создать удвоенные гаплоиды риса *O. sativa* с геном *Pi-b* из гибридов с участием образца Оху 2х.

Методика. В результате гибридизации между дальневосточными сортами и образцом Оху 2х создано 13 гибридов шести гибридных комбинаций: четыре растения Садко×Оху 2х – С×О(1), С×О(2), С×О(3), С×О(4); шесть растений Луговой×Оху 2х – Л×О(1), Л×О(2), Л×О(3), Л×О(4), Л×О(5), Л×О(6); по одному растению комбинаций Дарий 23×Оху 2х – Д23×О; Алмаз×Оху 2х – А×О; удвоенный гаплоид (Дон 4237×Долинный)×Оху 2х – DH×О; Ханкайский 429×Оху 2х – Х429×О. Андрогенетические ответы *in vitro* гибридов F₁ отсутствовали [9], поэтому была предпринята попытка получить удвоенные гаплоиды из гибридов F₂.

Для проведения исследований по 3...5 семян каждого гибрида F₁ в 2023 г. выращивали в климатической камере при температуре 21 °С, влажности – 60 %, режиме освещения – до 15000 лкс, продолжительности дня – 16 ч. В фазе 3...4 листьев гибридных растений была проведена идентификация генов устойчивости *Pi-b* и *Pi-ta* методом ПЦР анализа. ДНК выделяли из свежих листьев методом высаливания [22], ПЦР анализ и визуализацию

результатов осуществляли по действующей методике [12].

Для культивирования *in vitro* отбирали гибриды с аллелем устойчивости *Pi-b* (гетерозиготы и гомозиготы). Кроме того, в десяти растениях трех гибридных комбинаций (С×О, Л×О и DH×О) было подтверждено наличие аллелей устойчивости гена *Pi-ta* (гетерозиготы и гомозиготы). Каждому растению присвоен двузначный номер (табл. 1). Всего для инокуляции пыльников *in vitro* отобрали 35 гибридных растений F₂. Их пыльники, каллусы и регенеранты культивировали по методике, опубликованной ранее [16]. Все полученные растения-регенеранты разделили по морфологическим признакам на четыре группы: гаплоиды – Н (стерильные растения с очень мелкими цветками); удвоенные гаплоиды – DH (растения с семенами); растения без семян – Ae (сформировали цветки нормального или большего размера, но не образовывали семена на двух и более метелках); растения, погибшие на ранних этапах роста и развития – d. Под линией понимали все растения, полученные с каллусов одного пыльника.

Удвоенные гаплоиды DH, созревшие в культуральной комнате, в количестве 44 линий высевали в 2024 г. на вегетационной площадке в пластиковые сосуды объемом 460 л (199×78×39 см), наполненные почвой. Использовали почву, характерную для рисовых полей, – лугово-бурюю тяжелого механического состава с содержанием органического вещества 2,7 % (ГОСТ 26213-92), подвижных форм фосфора и калия – соответственно 35,0 мг/кг и 116,0 мг/кг почвы (ГОСТ Р 54650-2011), легкогидролизуемого азота – 60,0 мг/кг (ГОСТ 26483-85), рН солевой вытяжки – 6,0.

Посев проводили с междурядьями 15 см в типичные для региона сроки – 28 мая, режим орошения – укороченное затопление. Температура воздуха вегетационного периода соответствовала биологическим требованиям культуры, превышая среднемноголетние показатели на 0,2...1,8 °С. Отклонения по сумме осадков от нормы в мае–июне составляло +31,7...62,9 мм, в августе–сентябре – 14,6...54,3 мм.

Математическую обработку данных (среднее значение признака – М, стандартное отклонение – SD, коэффициент корреляции – r, вычленение максимального значения – max) проводили в программе Statistica V 10.

Результаты и обсуждение. В культуру *in vitro* ввели 10246 пыльников риса, от 96 до 640 шт. на гибридное растение (см. табл. 1). Каллусообразование наблюдали у 25 из 35 гибридов. Каллус сформировался на пыльниках всех гибридных комбинаций. Наибольшее каллусообразование отмечали на гибридных растениях F₂ Л×О(3) 13–2 – 9,33 % и Х429×О 3–3 – 27,50 %. Тем не менее, в среднем по всем растениям всех комбинаций оно было низким – 2,45 %, что нехарактерно для дальневосточных генотипов. Обычно величина этого показателя превышает 5...10 %, достигая для отдельных генотипов 55 % [23]. При проведении первоначальной работы на гибридах F₁. Среднее каллусообразование не превышало 1 %, а максимальные величины наблюдали также на растениях Л×О(3) – 3,08 % и Х429×О – 3,36 % [9].

Регенерацию наблюдали на каллусах семи гибридов риса F₂ четырех гибридных комбинаций: Д23×О, С×О, Х429×О и Л×О (см. табл. 1). При этом на гибридах F₁ она полностью отсутствовала [9]. Для культуры пыльников *in vitro* чаще используют гибриды F₁, так как это позволяет фиксировать продукты рекомбинации родительских геномов на самом раннем этапе. Однако андрогенетические ответы *in vitro* выше у гибридов F₂ [17]. В нашем эксперименте регенерацию удалось

Табл. 1. Андрогагенетические ответы *in vitro* гибридов F₂ *Oryza sativa* L., полученных с участием образца Оху 2х

Гибридная комбинация, номер растения	Число пыльников, шт.	Каллусообразование, %	Число регенерантов, шт.			Число регенерантов разных групп, шт.*			
			общее	на пыльник	на каллус	H	DH	Ae	d
Д23×О 2-1	418	0,24	0	—	—	—	—	—	—
Д23×О 2-2	96	0	—	—	—	—	—	—	—
Д23×О 2-3	414	5,56	59	0,14	2,57	16	1	30	12
С×О(1) 10-1	166	0	—	—	—	—	—	—	—
С×О(1) 10-2	640	2,81	75	0,12	4,17	25	17	6	27
С×О(1) 10-3	266	1,50	0	—	—	—	—	—	—
С×О(2) 1-1	616	0	—	—	—	—	—	—	—
С×О(2) 1-3	178	3,93	0	—	—	—	—	—	—
С×О(3) 4-1	320	0	—	—	—	—	—	—	—
С×О(3) 4-2	346	2,60	23	0,07	2,56	18	3	2	0
С×О(3) 4-3	414	4,11	0	—	—	—	—	—	—
С×О(4) 7-3	314	0	—	—	—	—	—	—	—
А×О 8-1	312	2,24	0	—	—	—	—	—	—
А×О 8-2	340	0,88	0	—	—	—	—	—	—
ДН×О 5-1	126	0	—	—	—	—	—	—	—
ДН×О 5-2	254	1,58	0	—	—	—	—	—	—
ДН×О 5-3	202	1,49	0	—	—	—	—	—	—
Х429×О 3-1	280	2,86	0	—	—	—	—	—	—
Х429×О 3-3	160	27,5	168	1,05	3,82	114	31	0	23
Л×О(1) 9-2	158	0,63	0	—	—	—	—	—	—
Л×О(1) 9-3	240	3,33	45	0,19	5,63	36	5	0	4
Л×О(2) 6-1	286	0,35	0	—	—	—	—	—	—
Л×О(2) 6-2	190	0	—	—	—	—	—	—	—
Л×О(3) 13-1	200	3,50	79	0,40	11,29	72	6	0	1
Л×О(3) 13-2	150	9,33	0	—	—	—	—	—	—
Л×О(3) 13-3	138	0	—	—	—	—	—	—	—
Л×О(4) 14-1	514	0,20	0	—	—	—	—	—	—
Л×О(4) 14-2	524	1,72	5	0,95	0,56	2	0	0	3
Л×О(4) 14-3	148	3,38	0	—	—	—	—	—	—
Л×О(5) 11-1	488	0,82	0	—	—	—	—	—	—
Л×О(5) 11-2	206	2,91	0	—	—	—	—	—	—
Л×О(5) 11-3	294	1,36	0	—	—	—	—	—	—
Л×О(6) 12-1	320	0,94	0	—	—	—	—	—	—
Л×О(6) 12-2	250	0	—	—	—	—	—	—	—
Л×О(6) 12-3	278	0	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	10246	—	—	—	—	283	63	38	70
Максимальное значение	640	27,50	168	1,05	11,29	114	31	30	27
Среднее значение	292,74	2,45	12,97	0,08	0,87	8,09	1,80	1,09	2,00
Стандартное отклонение	139,02	4,80	34,41	0,24	2,29	23,26	5,96	5,14	6,16

*H – гаплоиды, DH – удвоенные гаплоиды, Ae – растения без семян (сформировали цветки нормального или большего размера, но не образовывали семена на двух и более метелках), d – растения, погибшие на ранних этапах роста и развития.

получить только на F₂ – всего 454 регенеранта. По морфологическим признакам из них 62,3 % были гаплоидами и только 13,9 % удвоенными гаплоидами. Таким образом, выход удвоенных гаплоидов на пыльник был равен 0,006, на каллус – 0,30. В других экспериментах на дальневосточных гибридах величины этих показателей могли достигать 0,06 и 3,67 соответственно [23]. Основным ограничивающим фактором остается интенсивность каллусообразования. Высокая каллусирующая способность пыльников *O. sativa* необходима не просто для увеличения доли удвоенных гаплоидов, но и для повышения их генетического разнообразия. При высоком полиморфизме DH возрастает вероятность отбора селекционно значимых образцов [16].

Интенсивность каллусообразования не считают абсолютным предиктором регенерационной способности риса, то есть во многих случаях каллус остается неморфогенным. Например, гибридное растение Л×О(3) 13–2 было вторым из всей выборки по величине каллусообразования (9,33 %), но регенерация отсутствовала. И все-таки вероятность морфогенеза у гибридов риса возрастает по мере повышения интенсивности каллусообразования: корреляционная зависимость между величиной показателя каллусообразования и числом регенерантов составляла $r=0,80$ ($n=25$ гибридных растений, образовавших каллус, $p=0,05$).

Андрогагенетические ответы *in vitro* вида *O. sativa* в значительной степени зависят от генотипа растений доноров [18, 19, 24]. Это один из лидирующих

факторов, ограничивающих успех культивирования пыльников *in vitro*, при создании удвоенных гаплоидов для селекционных целей. Проявляется он на разных этапах культивирования – отсутствие каллусообразования, морфогенеза, гибель регенерантов (альбинизм и/или нежизнеспособность зеленых растений), низкое спонтанное удвоение хромосом. Слабые андрогагенетические ответы *in vitro* связаны с высокой стерильностью колосков гибридных растений доноров [9]. Причинами стерильности гибридов *O. sativa* считают определенные комбинации аллелей генов широкой совместимости и такие генетические события, как вставки, делеции, замены нуклеотидов [25]. Эти же факторы могут служить ограничителями в культуре пыльников *in vitro*. Известны попытки усовершенствования методики удвоения хромосом гаплоидов *ex vitro* путем использования анти-тубулиновых химических препаратов для увеличения числа удвоенных гаплоидов [26]. Однако они не привели к существенному увеличению числа DH. Видимо, дело не в протоколах испытаний, а в генотипической predisположенности к нормальному прохождению этапов формирования микроспор, что в конечном счете сказывается на завязываемости зерновок гибридных растений, андрогагенетических ответах *in vitro* и интенсивности спонтанного удвоения хромосом.

По результатам ПЦР анализа в нашем исследовании 33 из 63 удвоенных гаплоидов риса обладали аллелем устойчивости гена *Pi-b*, но ни в одном из них аллеля устойчивости *Pi-ta* не обнаружено.

Табл. 2. Осыпаемость удвоенных гаплоидов *Oryza sativa* L., полученных из гибридов F₂ с участием образца Оху 2х

Гибрид	Каллусная линия	Число удвоенных гаплоидов	Фенотип
Д23×О 2-3	6.2.1	1	сильно осыпающиеся
Х429×О 3-3	102.1.1	1	сильно осыпающиеся
	220.2.1	13	сильно осыпающиеся
С×О(1) 10-2	76.1.1	9	сильно осыпающиеся
	219.1.1	5	3 не взошли, 2 сильно осыпающиеся
С×О(3) 4-2	108.2.1	1	сильно осыпающиеся
	141.1.1	3	сильно осыпающиеся
Л×О(1) 9-3	94.1.1	5	среднеосыпающиеся
Л×О(3) 13-1	116.1.1	6	среднеосыпающиеся

Удвоенные гаплоиды, выращенные на вегетационной площадке, оказались непригодными для селекционных отборов: часть из них не взошла, остальные оказались в сильной или средней степени осыпающимися (табл. 2). В прежние годы мы предпринимали попытки интрогрессии гена *Pi-b* в дальневосточные сорта риса. Во всех случаях отмечали отсутствие каллусообразования в культуре пыльников *in vitro* или его низкое значение. Исключение составил один из трех гибридов F₂ Рассвет×Оху 2х, было получено 390 осыпающихся удвоенных гаплоидов риса. Семена 13 растений гибрида F₂ Рассвет×Оху 2х оказались сильно осыпающимися, 16 растений – осыпающимися в средней степени [16].

Среди селекционеров долгое время бытовало мнение, что вести селекцию по признаку осыпаемости риса легко. Считали, что его контролирует один ген *Th*: доминантный аллель отвечает за осыпаемость, рецессивный – за трудное обмолачивание [27]. Однако тот факт, что методы объективной оценки сортовой разнородности осыпаемости *O. sativa* [27] до сих пор не разработаны, свидетельствует о множестве переходных форм, то есть об отсутствии дискретности признака. В исследованиях последних лет показано, что за прочность крепления зерновки риса подвида *japonica* отвечает ряд локусов количественных признаков (*qSH1*, *qSH3*, *sh4*, *qCSS3*, *qCSS9*) [28, 29], в первую очередь *qSH1* и *sh4*. Однонуклеотидная замена в локусе *qSH1* и рецессивное состояние локуса *sh4* обеспечивают отсутствие осыпаемости. Различные комбинации других локусов регулируют этот признак на сторону осыпаемости. Все это свидетельствует о сложной природе наследуемости признака. Сам коллекционный образец Оху 2х характеризуется прочным креплением зерновки на оси метелки, однако, вступая во взаимодействие с локусами других сортов, ответственных за этот признак, дает осыпающийся в разной степени фенотип в гомозиготном состоянии у ДН. Таким образом, образец *O. sativa* Оху 2х представляет слабый интерес для селекционной работы в дальневосточных условиях. Возможно, беккроссирование или использование сложных гибридов будет способствовать улучшению признака прочности крепления зерновки с одновременной передачей аллеля устойчивости гена *Pi-b*. Кроме того, встречаются коллекционные образцы и линии удвоенных гаплоидов с трудно обмолачиваемой зерновкой. Скрещивание с таким рисом может дать оптимальное проявление прочности крепления зерновки.

Кроме того, Оху 2х перспективен для изучения природы признака осыпаемости, его генетической основы. Современные исследования в качестве осыпающихся материнских форм предусматривают привлечение природных видов риса, например, *Oryza rufipogon* Griff или *Oryza nivara* Sharma et Shastry, сорта *O. sativa* subsp. *indica* Kato. Рис подвида *indica* более склонен к осыпанию, чем *O. sativa* subsp. *japonica* Kato [28, 29]. Оху 2х фенотипически относится к подвиду риса *japonica*.

Его использование в качестве материнской формы в целевых скрещиваниях по выявлению особенностей наследуемости прочности крепления зерновки поможет расширить представление о локусах, ответственных за признак осыпаемости у вида *O. sativa*. Возможно геномное редактирование участков ДНК для снижения осыпаемости, что, в конечном счете, позволяет повысить урожайность риса [29].

Выводы. Использование в андрогенезе *in vitro* в качестве растений доноров гибридов F₂ между дальневосточными сортами *O. sativa* и коллекционным образцом Оху 2х позволяет получить весьма ограниченное количество удвоенных гаплоидов из-за низкого каллусообразования и регенерации: из 10246 пыльников образовалось 63 удвоенных гаплоида; только в 33 подтверждено наличие аллеля устойчивости гена *Pi-b*. Полученные удвоенные гаплоиды характеризуются средней и сильной степенью осыпаемости зерновки. Таким образом, общий выход исходного селекционного материала для последующих отборов в полевых условиях весьма ограничен и бесперспективен из-за осыпаемости зерновки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Получить высокопродуктивные гибриды и сорта сельскохозяйственных культур устойчивые в био- и абиострессорам Дальневосточного региона», рег. № НИОКТР 125020701697-8.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют отсутствие конфликта интересов.

Литература.

1. Ковалевская В. А., Лелявская В. Н., Ковалева А. А. Устойчивость риса к пикуляриозу в Приморском крае // Защита и карантин растений. 2013. № 5. С. 24–26.
2. Molecular breeding strategy and challenges towards improvement of blast disease resistance in rice crop / S. Ashkani, M. Y. Rafii, M. Shabanmofrad, et al. // Frontiers in Plant Science. 2015. Vol. 5. Article 886. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2015.00886/full> (дата обращения: 18.12.2021). doi: 10.3389/fpls.2015.00886.
3. Current status of conventional and molecular interventions for blast resistance in rice / D. Srivastava, M. Shamim, M. Kumar, et al. // Rice Science. 2017. Vol. 24. No. 6. P. 299–321. doi: 10.1016/j.rsci.2017.08.001.
4. Ecology of rice viruses in the south of the Russian Far East / Y. G. Volkov, N. N. Kakareka, V. F. Tolkach, et al. // Rice Research. 2024. Vol. 12. Article 409. URL: <https://www.omicsonline.org/open-access/ecology-of-rice-viruses-in-the-south-of-the-russian-far-east.pdf> (дата обращения: 19.02.2025). doi: 10.4172/2375-4338.1000409.
5. Клименкова Т. Г., Михайлик Т. А., Лелявская В. Н. Оценка сортообразцов и сортов риса на устойчивость к пикуляриозу // Дальневосточный аграрный вестник. 2018. № 4(48). С. 67–74. doi: 10.24411/1999-6837-2018-14082.
6. Устойчивость образцов конкурсного сортоиспытания и сортов риса *Oryza sativa* L. дальневосточной селекции к пикуляриозу / М. В. Илюшко, С. С. Гученко, В. Н. Лелявская, и др. // Российская сельскохозяй-

- ственная наука. 2022. № 1. С. 19–22. doi: 10.31857/S2500262722010045.
7. Comprehensive evaluation of resistance effects of pyramiding lines with different broad-spectrum resistance genes against *Magnaporthe oryzae* in rice (*Oryza sativa* L.) / Y. Wu, N. Xiao, Y. Chen, et al. // *Rice*. 2019. Vol. 12. Article 11. URL: <https://thericejournal.springeropen.com/articles/10.1186/s12284-019-0264-3> (дата обращения: 15.04.2020). doi: 10.1186/s12284-019-0264-3.
8. Molecular screening of blast resistance genes in rice germplasms resistant to *Magnaporthe oryzae* / Y. Loang, B. Yan, Y. Peng, et al. // *Rice Science*. 2017. Vol. 24. No. 1. P. 41–47. doi: 10.1016/j.rsci.2016.07.004.
9. Влияние фертильности пыльцы гибридных растений доноров на андрогенез *in vitro* риса *Oryza sativa* L. / М. В. Илюшко, С. С. Гученко, В. Н. Леявская и др. // *Рисоводство*. 2023. № 2(59). С. 6–12. doi: 10.33775/1684-2464-2023-59-2-6-12.
10. Comparison of pathogenicity of *Pyricularia oryzae* under different genetic backgrounds / J. Ma, G. Zhang, A. Xin, et al. // *Acta Agronomica Sinica*. 2015. Vol. 41. No. 12. P. 1791–1801. doi: 10.3724/SP.J.1006.2015.01791.
11. Distribution research of blast resistance genes *Pita*, *Pib*, *Pi9* and *Pikm* in blast-resistance rice resources / X. Dai, Y. Yan, L. Zhou, et al. // *Life Science Research*. 2012. Vol. 16. No. 4. P. 340–356. doi: 10.16605/j.cnki.1007-7847.2012.04.009.
12. Идентификация генов устойчивости к пирикулярриозу риса *Pi-1*, *Pi-2*, *Pi-33*, *Pi-40*, *Pi-ta*, *Pi-b* / О. В. Шумская, Н. Н. Возжжова, О. С. Жозалева, и др. // *Зерновое хозяйство России*. 2023. Т. 15. № 5. С. 30–38. doi: 10.31367/2079-8725-2023-88-5-30-38.
13. Identification of rice blast resistance genes using international monogenic differentials / J. C. Wang, Y. Jia, J. W. Wen, et al. // *Crop Protection*. 2013. Vol. 45. P. 109–116. doi: 10.1016/j.cropro.2012.11.020.
14. Blast resistance *R* genes pyramiding in temperate japonica rice / G. Orasen, R. Greco, E. Puja, et al. // *Euphytica*. 2020. Vol. 214. Article 40. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10681-020-2575-2> (дата обращения: 22.01.2021). doi: 10.1007/s10681-020-2575-2.
15. Genetic improvement for blast resistance in high-yielding cold-tolerant rice (*Oryza sativa* L.) cultivar Himalaya 741 by marker-assisted backcross breeding / R. Rathour, R. Kumar, K. Thakur, et al. // *3 Biotech*. 2022. Vol. 12. Article 165. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13205-022-03244-w> (дата обращения: 25.05.2023). doi: 10.1007/s13205-022-03244-w.
16. Илюшко М. В., Ромашова М. В., Гученко С. С. Оценка частоты внутрикалусной изменчивости андрогенных удвоенных гаплоидов риса (*Oryza sativa* L.) по генам устойчивости к пирикулярриозу // *Сельскохозяйственная биология*. 2023. Т. 58. № 3. С. 554–566. doi: 10.15389/agrobiology.2023.3.554rus.
17. Sarao N. K., Gosal S. S. *In vitro* androgenesis accelerated breeding in rice // *Biotechnology of crop improvement*. Switzerland: Springer, Cham. Springer International Publishing AG, 2018. Vol. 1. P. 407–435. doi: 10.1007/978-3-319-78283-6.
18. Strategies and prospects of haploid induction in rice (*Oryza sativa*) / M. Kyum, H. Kaur, A. Kamboj, et al. // *Plant Breeding*. 2021. Vol. 141(2). URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/pbr.12971> (дата обращения: 11.12.2021). doi: 10.1111/pbr.12971.
19. Exploring factors affecting anther culture in rice (*Oryza sativa* L.) / S. K. Tripathy, D. Swain, P. M. Mohapatra, et al. // *Journal of Applied Biology and Biotechnology*. 2019. Vol. 7 (02). P. 87–92. doi: 10.7324/JABB.2019.70216.
20. Creation of rice doubled haploids resistant to prolonged flooding using anther culture / P. Kostylev, N. Kalinina, N. Vozhzhova, et al. // *Plants*. 2023. Vol. 3681. Article 3681. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/21/3681> (дата обращения: 13.10.2024). doi: 10.3390/plants12213681.
21. Получение дигаплоидных линий для селекции глютинозного риса / И. А. Сартбаева, Б. Н. Усенбеков, А. Б. Рысбекова и др. // *Биотехнология*. 2018. Т. 34. № 2. С. 26–36. doi: 10.21519/0234-2758-2018-34-2-26-36.
22. Aljanabi S. M., Martinez I. Universal and rapid salt-extraction of high quality genomic DNA for PCR-based techniques // *Nucleic Acid Research*. 1997. Vol. 25. No. 22. P. 4692–4693. doi: 10.1093/nar/25.22.4692.
23. Ilyushko M. V. Effect of growing conditions of rice donor plants on anther culture *in vitro* // *Journal of Agricultural Science and Technology A*. 2015. Vol. 5. P. 686–694. doi: 10.17265/2161-6256/2015.08.007.
24. Improvement of anther culture to integrate doubled haploid technology in temperate rice (*Oryza sativa* L.) breeding / C. Lantos, M. Jancso, A. Szekeley, et al. // *Plants*. 2022. Vol. 11. Article 3446. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/24/3446> (дата обращения: 02.02.2023). doi: 10.3390/plants11243446.
25. Харитонов Е. М., Гончарова Ю. К. Стерильность при межподвидовой гибридизации риса *Oryza sativa* L. в связи с поиском генов широкой совместимости и отнесением образцов к под видам *indica* и *japonica* // *Сельскохозяйственная биология*. 2013. № 5. С. 61–68. doi: 10.15389/agrobiology.2013.5.61rus.
26. D'Hooghvorst I., Ferreres I., Nogues S. Anther culture and chromosome doubling in Mediterranean japonica rice // Jose M. Segui-Simarro (ed.). *Doubled haploid technology. Volume 1: General topics, Alliaceae, Cereals, Methods in molecular biology*, 2287. Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature. 2021. P. 333–341. doi: 10.1007/978-1-0716-1315-3_19.
27. Ляховкин А. Г. Рис. Мировое производство и генофонд. СПб: Профи-Информ, 2005. 288 с.
28. Detection of a novel locus involved in non-seed-shattering behavior of Japonica rice cultivar, *Oryza sativa* «Nipponbare» / Y. Tsujimura, S. Sugiyama, K. Otsuka, et al. // *Theoretical and Applied Genetics*. 2019. Vol. 132. P. 2615–2623. doi: 10.1007/s00122-019-03376-3.
29. Wu H., He Q., Wang Q. Advances in rice seed shattering // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24. Article 8889. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/10/8889> (дата обращения: 02.02.2025). doi: 10.3390/ijms24108889.

Поступила в редакцию 03.03.2025
После доработки 28.03.2025
Принята к публикации 15.04.2025

ОСЕННЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГЕРБИЦИДА БАЛЛИСТА, МД НА ПОСЕВАХ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В СТЕПНОЙ ЗОНЕ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

© 2025 г. **А. П. Савва**, кандидат биологических наук, **Г. В. Волкова**, член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, **С. С. Ковалев**, кандидат сельскохозяйственных наук, **В. А. Суворова**, аспирант, **А. К. Меряхин**, аспирант

Федеральный научный центр биологической защиты растений,
350039, Краснодар, ул. им. Калинина, 62
E-mail: savap53@mail.ru

Исследования проводили с целью биологической и хозяйственной оценки эффективности осеннего применения нового гербицида Баллиста, МД (30 г/л мезосульфурон-метила + 17 г/л флуметсулама + 12 г/л флорасулама + 90 г/л мефенпир-диэтила). Работу выполняли в 2022–2024 гг. в Краснодарском крае на посевах озимой пшеницы сорта Безостая 100 согласно методическим указаниям по регистрационным испытаниям гербицидов в сельском хозяйстве. Почва опытного участка – чернозем выщелоченный. Опытные делянки площадью 25 м² при четырехкратной повторности обрабатывали рабочими растворами гербицидов из расчета 200 л/га ручным опрыскивателем. Схема полевых экспериментов включала следующие варианты: гербицид Баллиста, МД в нормах 0,3 и 0,5 л/га, эталон – Вердикт, ВДГ + БиоПауэр, ВРК в нормах 0,3 кг/га + 0,5 л/га и 0,5 кг/га + 0,5 л/га, контроль – без гербицидов. Биологическую эффективность препаратов определяли по снижению числа и массы сорных растений, в сравнении с контролем. Применение гербицида Баллиста, МД (0,3 и 0,5 л/га) в осенний период на озимой пшенице обеспечивало высокую биологическую эффективность (92...100 %) против злаковых (*Alopecurus myosuroides* Huds.) и двудольных (*Galium aparine* L., *Papaver rhoeas* L., *Cerastium arvense* L.) сорных растений. По гербицидной активности новый препарат не уступал эталонному варианту Вердикт, ВДГ + БиоПауэр, ВРК. Фитотоксического действия на растения культуры не отмечено. Использование нового препарата обеспечило получение статистически достоверной величины сохраненного урожая (109,1...109,5 %) по отношению к контролю (без применения гербицида).

AUTUMN APPLICATION OF THE HERBICIDE BALLISTA, MD ON WINTER WHEAT CROPS IN THE STEPPE ZONE OF THE KRASNODAR TERRITORY

A. P. Savva, G. V. Volkova, S. S. Kovalev, V. A. Suvorova, A. K. Meryakhin

Federal Scientific Center for Biological Plant Protection,
350039, Krasnodar, ul. im. Kalinina, 62
E-mail: savap53@mail.ru

The research was conducted to biologically and economically evaluate the effectiveness of the autumn application of the new herbicide Ballista, OD (30 g/l mesosulfuron-methyl + 17 g/l flumetsulam + 12 g/l florasulam + 90 g/l mefenpyr-diethyl). The work was carried out in 2022–2024 in the Krasnodar Territory on crops of winter wheat of the Bezostaya 100 variety according to the methodological guidelines for registration tests of herbicides in agriculture. The soil of the experimental site is leached chernozem. Experimental plots with an area of 25 m² were treated four times with working solutions of herbicides at the rate of 200 l/ha with a manual PULVEREX sprayer. The scheme of field experiments included: herbicide Ballista, OD at the rates of 0.3 and 0.5 l/ha, etalon Verdict, VDG + BioPower, VSC (0.3 kg/ha + 0.5 l/ha and 0.5 kg/ha + 0.5 l/ha), herbicide-free version (control). The biological effectiveness of the drugs was determined by reducing the number and weight of weeds in comparison with the control. The use of the herbicide Ballista, OD (0.3 and 0.5 l/ha) in the autumn period on winter wheat provided high biological efficacy (92...100 %) against cereals (*Alopecurus myosuroides* Huds.) and dicotyledonous (*Galium aparine* L., *Papaver rhoeas* L., *Cerastium arvense* L.) weeds. In terms of herbicidal activity, the new herbicide was not inferior to the reference drug Verdict, VDG + BioPower, VSC. There was no phytotoxic effect on the crop plants and a statistically significant value of the preserved crop (109.1...109.5 %) was obtained in relation to the control (without the use of herbicide).

Ключевые слова: озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.), сорное растение, гербицид, эффективность, фитотоксичность, урожайность.

Keywords: winter wheat (*Triticum aestivum* L.), weed plant, herbicide, efficiency, phytotoxicity, yield.

Краснодарский край по посевным площадям и валовому сбору зерна озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) занимает ведущее место в Российской Федерации [1]. Формирование высоких урожаев культуры невозможно без проведения защитных мероприятий, направленных на подавление или уничтожение сорняков, постоянно присутствующих в агрофитоценозах [2]. Между культурными и сорными растениями в течение периода вегетации происходит постоянная борьба за факторы роста и развития, что в конечном итоге приводит к снижению урожая и ухудшению его качественных характеристик [3]. Степень вредоносности сорных рас-

тений в посевах сельскохозяйственных культур в первую очередь зависит от их численности и особенно биомассы [4]. Чем выше величины этих показателей, тем меньше надземная масса культурных растений и, как следствие, урожайность, снижение которой может достигать 20 % [5]. Поэтому устранение конкуренции между культурными растениями и сорняками выступает обязательным мероприятием при возделывании сельскохозяйственных культур [6].

Среди существующих методов борьбы с сорной растительностью наиболее эффективным и быстро окупаемым на сегодняшний день считают химический

с использованием гербицидных препаратов, содержащих в своем составе, как правило, несколько действующих веществ с различным механизмом действия, характером проникновения в растения и эффективностью против сорняков различных ботанических классов. Условно их разделяют на противодвудольные, противозлаковые и одновременно подавляющие и те, и другие виды сорных растений [7]. Гербициды, оказывающие влияние на смешанный тип засорения, как правило, содержат в своем составе два и более действующих вещества, а также антидот [8, 9].

На озимых зерновых культурах гербицидные препараты используют осенью и весной. В Краснодарском крае преобладает их весеннее применение, которое в основном проводят в период кущения культуры и, в меньшей степени, в фазе формирования второго междоузлия [10].

Крупные сельскохозяйственные предприятия, которые выращивают озимую пшеницу на больших площадях, по тем или иным причинам не всегда успевают использовать гербициды весной в оптимальные сроки. В связи с этим химическую прополку посевов приходится переносить на более позднее время. В этот период происходит перерастание озимых и зимующих сорных видов, что требует увеличения нормы применения гербицидов. В результате нарушается регламент их использования и увеличивается пестицидная нагрузка на окружающую среду [11].

В ходе многолетних исследований доказана равноценная биологическая и хозяйственная эффективность осеннего и весеннего использования гербицидов на посевах озимой пшеницы и правомерность рекомендаций по их применению в сельскохозяйственном производстве в эти сроки [12]. При осеннем использовании гербицидов увеличивается технологическое окно для их внесения в сравнении с весенним применением. В это время устанавливается теплая погода с положительными дневными и ночными температурами. Сорные растения находятся в фазе семядолей – 1-й пары настоящих листьев. Этот период наиболее благоприятен для реализации полного гербицидного потенциала используемых препаратов. В связи с изложенным осеннее применение гербицидов в посевах озимой пшеницы – актуальный, своевременный и эффективный прием в технологии выращивания этой культуры.

В 2024 г. на рынке средств защиты растений появился новый гербицид Баллиста, МД производства АО «Щелково Агрохим», предназначенный для применения на посевах озимой пшеницы в осенний и весенний периоды. Новый препарат по комбинации действующих веществ (30 г/л мезосульфурон-метила + 17 г/л флуметсулама + 12 г/л флорасулама + 90 г/л мефенпир-диэтила) на сегодня не имеет аналогов и предназначен для борьбы с широким спектром злаковых и двудольных сорных растений. Однако экспериментальные результаты по биологической и хозяйственной эффективности осеннего применения гербицида Баллиста, МД на озимой пшенице в степной зоне Краснодарского края отсутствуют.

Цель исследований – оценка биологической и хозяйственной эффективности осеннего применения нового гербицида Баллиста, МД на посевах озимой пшеницы в степной зоне Краснодарского края.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи: оценить гербицидное действие препарата Баллиста, МД на общую численность сорных растений и их биомассу; определить чувствительность злаковых и двудольных сорняков, а также степень устойчивости растений озимой пшеницы к испытываемому герби-

циду; установить размеры сохраняемого урожая зерна культуры.

Методика. Работу выполняли в 2022–2023 и 2023–2024 гг. на опытном поле Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр биологической защиты растений» (г. Краснодар) в посевах озимой пшеницы Безостая 100. Почвенный покров экспериментального участка был представлен черноземом выщелоченным с содержанием гумуса в пахотном слое 3,39 % и реакцией почвенного раствора, близкой к нейтральной (6,9 ед.).

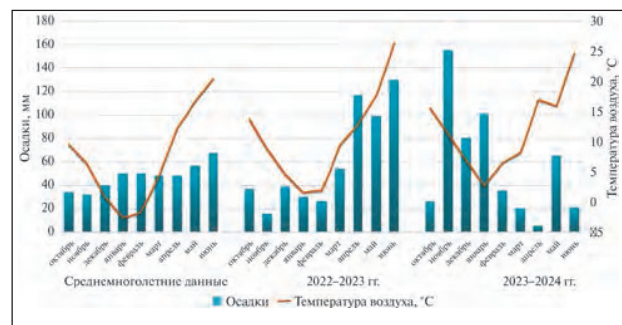
Агроклиматические условия в период проведения опытов были неодинаковыми. Среднесуточная температура воздуха в период с октября 2022 г. по июль 2023 г. была на 2,3...5,9 °C выше среднеемноголетних значений, за исключением апреля и мая, когда она находилась практически на уровне нормы (см. рисунок). Сумма атмосферных осадков с ноября 2022 г. по февраль 2023 г. была ниже среднеемноголетней, а в апреле – июне 2023 г. на 42...69 мм превышала норму.

В период с октября 2023 г. по июнь 2024 г. средняя температура воздуха на 4,0...8,3 °C превышала норму, за исключением мая 2024 г., когда она находилась на уровне многолетней. Сумма осадков с ноября 2023 г. по январь 2024 г. значительно превышала норму на 53...124 мм, в феврале – апреле, июне 2024 г. находилась на 14...45 мм ниже, а в октябре 2023 г. и мае 2024 г. была на близком к среднеемноголетним значениям уровне.

Технология выращивания озимой пшеницы сорта Безостая 100 включала следующие элементы: после уборки предшественника (озимая пшеница) проводили лущение стерни, вспашку на глубину 18...22 см и предпосевную культивацию, посев осуществляли во II декаде октября (5 млн всхожих семян на 1 га). Уборку урожая зерна на опытных делянках проводили сплошным методом с использованием малогабаритного комбайна ХЕГЕ 125. Хозяйственную эффективность оценивали по величине сохраненного урожая, в сравнении с контрольным вариантом, где внесение гербицидов не проводили. Полученные данные подвергали статистической обработке методом дисперсионного анализа (Microsoft Office Excel) с определением НСР₀₅.

Схема опыта предусматривала следующие варианты: гербицид Баллиста, МД (30 г/л мезосульфурон-метила + 17 г/л флуметсулама + 12 г/л флорасулама + 90 г/л мефенпир-диэтила) в нормах применения 0,3 и 0,5 л/га; эталон Вердикт, ВДГ – 0,3 и 0,5 кг/га в смеси с 0,5 л/га адьюванта БиоПауэр, ВРК; без внесения гербицидов – контроль.

Закладку и проведение опытов осуществляли согласно методическим указаниям по регистрационным испытаниям гербицидов в сельском хозяйстве [13].



Метеорологические условия периода проведения исследований.

Обработку гербицидами проводили во II декаде ноября ручным опрыскивателем марки PULVEREX при норме расхода рабочей жидкости 200 л/га. Площадь опытной делянки – 25 м², повторность – четырехкратная, расположение делянок – рендомизированное.

Сорная растительность опытных участков озимой пшеницы в период применения гербицидов была представлена однолетними злаковыми в фазе 1...2 листьев (лисохвост мышехвостниковидный (*Alopecurus myosuroides* Huds.)) и двудольными в период семядолей – 1...2 пары листьев (подмаренник цепкий (*Galium aparine* L.), мак самосейка (*Papaver rhoeas* L.) и ясколка полевая (*Cerastium arvense* L.)) видами. Учеты сорной растительности проводили в три срока (через 30 дней после обработки, весной при возобновлении вегетации культурных и сорных растений, перед уборкой урожая). На основании полученных данных рассчитывали биологическую эффективность гербицидов по разнице численности и массы сорняков, в сравнении с контролем.

Результаты и обсуждение. Применение гербицида Баллиста, МД в норме 0,3 л/га в фазе 2...3 листьев озимой пшеницы и ранних стадий роста сорняков по результатам учета через 30 дней после обработки приводило к сублетальному гербицидному эффекту (табл. 1). Снижение засоренности посевов в среднем по годам составило 95,1 %, по сравнению с вариантом без применения гербицидов, в котором общее среднее количество сорных растений составляло 82,5 экз./м². Наряду со значительным уменьшением количества сорняков, отмечали их сильное подавление, которое у злаковых составляло 97,4 %, а у двудольных – 98,7 %.

Весной, после возобновления вегетации культурных и сорных растений, при проведении количественно-вещного учета биологическая эффективность испытываемого препарата оставалась на уровне предыдущего (осеннего) учета. Снижение засоренности составляло 93,6 %, уменьшение массы злаковых и двудольных сорных растений – соответственно 94,8 и 96,4 %. Такая высокая гербицидная активность препарата Баллиста, МД сохранялась до уборки урожая (92,1 %).

Табл. 1. Биологическая эффективность осеннего применения гербицида Баллиста, МД в посевах озимой пшеницы (среднее за 2022–2023 и 2023–2024 гг.)

Вариант	Срок учета	Количество сорных растений		Масса сорных растений			
		экз./м ²	снижение, % к контролю	г/м ²		снижение, % к контролю	
				злаки	двудольные	злаки	двудольные
Баллиста, МД – 0,3 л/га	1	4,0	95,1	0,4	0,3	97,1	98,7
	2	5,1	93,6	18,0	17,6	94,8	96,4
	3	6,0	92,1	–	–	–	–
Баллиста, МД – 0,5 л/га	1	0	100	0	0	100	100
	2	0	100	0	0	100	100
	3	0	100	–	–	–	–
Вердикт, ВДГ + БиоПауэр, ВРК (эталон) – 0,3 кг/га + 0,5 л/га	1	9,1	89,0	0,6	1,9	95,7	91,5
	2	10,2	87,1	22,9	52,1	93,4	89,3
	3	11,1	85,4	–	–	–	–
Вердикт, ВДГ + БиоПауэр, ВРК (эталон) – 0,5 кг/га + 0,5 л/га	1	0	100	0	0	100	100
	2	0	100	0	0	100	100
	3	0	100	–	–	–	–
Без гербицидов (контроль)	1	82,5	–	13,8	22,3	–	–
	2	79,3	–	346,1	487,8	–	–
	3	76,0	–	–	–	–	–
НСР ₀₅	1	5,1	–	1,2	1,4	–	–
	2	5,6	–	14,2	18,0	–	–
	3	6,2	–	–	–	–	–

Табл. 2. Чувствительность видов сорных растений к осеннему использованию гербицида Баллиста, МД на посевах озимой пшеницы (среднее за 2022–2023 и 2023–2024 гг.)

Вариант	Срок учета	Снижение численности сорных растений, % к контролю			
		<i>Alopecurus myosuroides</i>	<i>Galium aparine</i>	<i>Papaver rhoeas</i>	<i>Cerastium arvense</i>
Баллиста, МД – 0,3 л/га	1	94,9	93,1	97,5	98,5
	2	92,6	92,0	94,0	97,6
	3	91,2	90,1	92,7	95,9
Баллиста, МД – 0,5 л/га	1	100	100	100	100
	2	100	100	100	100
	3	100	100	100	100
Вердикт, ВДГ + БиоПауэр, ВРК (эталон) – 0,3 кг/га + 0,5 л/га	1	93,7	82,0	84,6	97,7
	2	91,4	80,6	82,5	96,8
	3	90,3	77,5	81,0	95,1
Вердикт, ВДГ + БиоПауэр, ВРК (эталон) – 0,5 кг/га + 0,5 л/га	1	100	100	100	100
	2	100	100	100	100
	3	100	100	100	100
Баз гербицидов (контроль)*	1	27,2	23,4	18,8	13,1
	2	25,7	22,7	18,3	12,6
	3	24,9	20,9	17,9	12,3

*численность сорняков, экз./м².

Биологическая эффективность эталонного гербицида Вердикт, ВДГ с адъювантом БиоПауэр, ВРК в норме применения 0,3 кг/га + 0,5 л/га была несколько ниже, чем у испытываемого препарата, что связано с некоторой устойчивостью подмаренника цепкого и мака самосейки в этом варианте (табл. 2). Увеличение нормы применения препарата Баллиста, МД до 0,5 л/га, а также эталона Вердикт, ВДГ + БиоПауэр, ВРК (0,5 кг/га + 0,5 л/га) обеспечивало 100 %-ный гербицидный эффект в отношении таких видов двудольных и однодольных сорняков, как мак самосейка, ясколка полевая, подмаренник цепкий, лисохвост мышехвостниковидный.

Первые видимые признаки проявления гербицидной активности препарата Баллиста, МД на чувствительные к нему виды сорных растений отмечали через 2...3 дня. Это выражалось в прекращении их роста, листья приобретали хлоротичный вид, точка роста отмирала. Полная гибель сорняков наступала через 2...3 недели после применения испытываемого гербицида и зависела от их возраста и погодных условий после применения препарата.

При визуальной оценке состояния посевов озимой пшеницы после использования гербицида Баллиста, МД в нормах 0,3 и 0,5 л/га признаков негативного действия нового препарата на культурные растения не наблюдали до конца вегетации. По всей видимости, это связано с наличием в составе гербицида антидота мефенпирдиэтила, который способствует быстрому разложению действующих веществ препарата в растениях культуры.

Данные, полученные в ходе уборки урожая озимой пшеницы, свидетельствуют о высокой хозяйствен-

Табл. 3. Хозяйственная эффективность осеннего применения гербицида Баллиста, МД на посевах озимой пшеницы сорта Безостая 100 (среднее за 2023 и 2024 гг.)

Варианты опыта	Урожайность, т/га		Средняя урожайность	
	2023 г.	2024 г.	т/га	% к контролю
Баллиста, МД – 0,3 л/га	4,66	4,49	4,58	109,1
Баллиста, МД – 0,5 л/га	4,68	4,52	4,60	109,5
Вердикт, ВДГ + БиоПауэр, ВРК (эталон) – 0,3 кг/га + 0,5 л/га	4,62	4,47	4,55	108,3
Вердикт, ВДГ + БиоПауэр, ВРК (эталон) – 0,5 кг/га + 0,5 л/га	4,70	4,51	4,61	109,8
Без гербицидов (контроль)	4,19	4,20	4,20	100
НСР ₀₅	0,14	0,13	–	–

ной эффективности осеннего применения гербицида Баллиста, МД (табл. 3). Внесение его в нормах 0,3 и 0,5 л/га обеспечило статистически достоверную величину сохраненного урожая культуры, в сравнении с вариантом без применения гербицида, которая составила 9,1 и 9,5 %. Статистически достоверной разницы в урожайности зерна озимой пшеницы между вариантами опыта с использованием испытываемого гербицида и эталона не выявлено.

Результаты осеннего применения гербицида Баллиста, МД свидетельствуют о том, что различия в биологической и хозяйственной эффективности, в сравнении с весенним его использованием, практически отсутствуют [14].

Выводы. В степной зоне Краснодарского края за годы проведения экспериментов гербицид Баллиста, МД, примененный осенью в посевах озимой пшеницы, высокоэффективно подавлял однолетние одно- и двудольные сорные растения (мак самосейка, ясколка полевая, подмаренник цепкий, лисохвост мышехвостниковидный). Использование его в нормах 0,3 и 0,5 л/га обеспечило высокую биологическую эффективность (92...100 %) без признаков фитотоксичности для культуры. Уровень хозяйственной эффективности в вариантах с использованием 0,3 и 0,5 л/га испытываемого гербицида, по отношению к контролю, составил 9,1 и 9,5 %.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального научного центра биологической защиты растений в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по теме НИР № FGRN-2025-0004. 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. Управление Федеральной службы государственной статистики по Краснодарскому краю и Республике Адыгея. 2024. URL: https://23.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/posev_23.pdf (дата обращения: 20.01.2025).
2. Кошкин Е. И. К проблеме конкуренции культурных и сорных растений в агрофитоценозе // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2016. № 4. С. 53–68.
3. Colbach N., Gardarin A., Moreau D. The response of weed and crop species to shading: Which parameters explain weed impacts on crop production? // Field Crops Research. 2019. Vol. 238. P. 45–55. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.008> (дата обращения: 22.01.2025).
4. Weed-induced crop yield loss: a new paradigm and new challenges / D. P. Horvath, S. A. Clay, C. J. Swanton, et al. // Trends in Plant Science. 2023. Vol. 28. No. 5. P. 567–582. URL: [https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385\(22\)00337-5](https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385(22)00337-5) (дата обращения: 22.01.2025).
5. Potential wheat yield loss due to weeds in the United States and Canada / M. L. Flessner, Ia. C. Burke, J. A. Dille, et al. // Weed Technology. 2021. Vol. 35. No. 6. P. 916–923. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/weed-technology> (дата обращения: 22.01.2025).
6. Junaid M. D., Gokce A. F. Global agricultural losses and their causes // Bulletin of Biological and Allied Sciences Research. 2024. Vol. 2024. No. 1. P. 66. URL: <https://bbasr.org/index.php/home/article/view/66> (дата обращения: 22.01.2025).
7. Dayan F. E. Current status and future prospects in herbicide discovery // Plants. 2019. Vol. 8. No. 9. P. 341. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/8/9/341> (дата обращения: 20.01.2025).
8. Отечественный трехкомпонентный гербицид Ликсель, МД для защиты посевов озимого ячменя в Краснодарском крае / А. П. Савва, Т. Н. Тележенко, В. А. Суворова и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 3. С. 19–23. doi: 10.31857/S2500262722030048.
9. Отечественный трехкомпонентный гербицид Аризон для защиты посевов кукурузы центральной зоны Краснодарского края / А. П. Савва, В. Д. Надыкта, Т. Н. Тележенко и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2023. № 3. С. 44–48. doi: 10.31857/S2500262723030080.
10. Биологическое обоснование возможности применения гербицидов в разные фазы развития зерновых культур / А. С. Голубев, Т. А. Маханькова, В. И. Долженко и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2020. № 1. С. 20–24. doi: 10.31857/S2500-2627-2020-1-20-24.
11. Черкашин В. Н., Кривоносова О. Н. Осеннее применение гербицидов в посевах озимой пшеницы юга России // Достижения науки и техники АПК. 2012. № 7. С. 61–64.
12. О преимуществах осеннего применения гербицидов на посевах озимой пшеницы / Ю. Я. Спиридонов, Н. В. Никитин, В. Г. Шестаков и др. // Защита и карантин растений. 2010. № 9. С. 28–32.
13. Методические указания по регистрационным испытаниям гербицидов в сельском хозяйстве (под редакцией В. И. Долженко). СПб.: МСХ, РАСХН, ВИСР, 2013. 280 с.
14. Эффективность применения гербицида Баллиста, МД при возделывании озимой пшеницы в Краснодарском крае / А. П. Савва, Т. Н. Тележенко, С. С. Ковалев и др. // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38, № 7. С. 73–78. doi: 10.53859/02352451_2024_38_7_73.

Поступила в редакцию 21.02.2025

После доработки 15.03.2025

Принята к публикации 08.04.2025

ЗАСОРЕННОСТЬ ПОСЕВОВ И ПРОДУКТИВНОСТЬ МАКА МАСЛИЧНОГО В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕРБИЦИДНОЙ ЗАЩИТЫ

© 2025 г. Т. Я. Прахова, доктор сельскохозяйственных наук,
И. И. Плужникова, кандидат сельскохозяйственных наук

Федеральный научный центр лубяных культур,
170041, Тверь, Комсомольский просп., 17/56
E-mail: prakhova.tanya@yandex.ru

Исследования проводили с целью изучения эффективности применения гербицида на основе мезотриона, 480 г/л (Эгида, КЭ) посредством оценки его влияния на засоренность посевов и показатели продуктивности растений мака. Работу выполняли в 2023–2024 гг. в условиях лесостепи Среднего Поволжья. Объектом исследований служил сорт мака масличного Иссера. Схема опыта включала следующие варианты: контроль (без обработки); ручная прополка; гербицидная защита (Эгида, КЭ в норме расхода 0,25 л/га.). Обработку проводили в фазе 6...8 настоящих листьев растений мака. Метеоусловия в годы исследований соответствовали недостаточному увлажнению (ГТК 0,55 и 0,83). В посевах мака сорняки были представлены яровыми поздними (64,8 %), яровыми ранними (23,7 %), зимующими (7,2 %) и многолетними (4,3 %) видами. В варианте с ручной прополкой общая сырая масса сорняков снижалась через 20 дней, по отношению к контролю, на 96,3 %, с применением препарата – на 80,5 %, перед уборкой – на 91,5 и 88,7 % соответственно. Защитный эффект от препарата сохранялся до конца вегетации мака. При этом эффективность подавления отдельных сорных компонентов (ромашка, осот) достигала 91,6...100 %. На фоне гербицидной защиты урожайность семян повышалась, по сравнению с контролем (0,98 т/га), практически, как и при ручной прополке, – соответственно на 0,33 и 0,38 т/га. Продуктивность мака возрастала благодаря увеличению показателей структуры урожая – количества коробочек, семенной продуктивности растения, массы 1000 семян. При использовании ручной прополки и гербицида отмечена положительная тенденция повышения масличности семян мака. Прибавка к контролю составила соответственно 0,50 и 0,31 %.

WEED INFESTATION AND PRODUCTIVITY OF OIL POPPY DEPENDING ON THE USE OF HERBICIDE PROTECTION

T. Ya. Prakhova, I. I. Pluzhnikova

Federal Scientific Center of Bast-Fiber Crops Breeding,
170041, Tver', Komsomol'skii prosp., 17/56
E-mail: prakhova.tanya@yandex.ru

The studies were conducted to study the effectiveness of using a mesotrione-based herbicide, 480 g/l (Egida, EC) by assessing its impact on crop infestation and the productivity of poppy plants in the forest-steppe conditions of the Middle Volga region. The work was carried out in 2023–2024 on the experimental field of the Federal Research Center for Bast Fiber Crops in the Penza Region. The object of the research was the Issera oil poppy variety. The herbicide used was Egida, EC (480 g/l mesotrione) with a consumption rate of 0.25 l/ha. The experimental design included the following options: control (no treatment); manual weeding; herbicide protection. The treatment was carried out in the phase of 6–8 true leaves of poppy plants. Weather conditions during the research years corresponded to insufficient moisture (GTC 0.55 and 0.83). In poppy crops, weeds were represented by late spring weeds (64.8 %), early spring weeds (23.7 %), winter weeds (7.2 %) and perennial weeds (4.3 %). In the variant with manual weeding, the total wet weight of weeds decreased after 20 days, in relation to the control, by 96.3 %, with the use of the preparation – by 80.5 %, before harvesting – by 91.5 and 88.7 %, respectively. The protective effect of the drug lasted until the end of the poppy growing season. Moreover, the efficiency of suppression of weed components (chamomile, sow thistle) was 91.6–100 %. Against the background of herbicide protection, the seed yield increased almost to the level of manual weeding by 0.33 and 0.38 t/ha compared to the control (0.98 t/ha). The productivity of poppy increased due to an increase in the elements of the crop structure: the number of capsules, the seed productivity of the plant, and the weight of 1000 seeds. When using manual weeding and herbicide, a positive trend towards increasing the oil content of poppy seeds was noted. The increase was 0.50 and 0.31 %, respectively, relative to the control.

Ключевые слова: мак масличный (*Papaver somniferum* L.), гербицид, засоренность, урожайность, структура урожая, масличность семян.

Keywords: oil poppy (*Papaver somniferum* L.), herbicide, weed infestation, yield, crop structure, seed oil content.

Мак масличный – одна из форм вида *Papaver somniferum* L. (мак снотворный), относящегося к семейству *Papaveraceae* (маковые). Это однолетнее травянистое растение. Вид *Papaver somniferum* L. подразделяется на 5 подвидов: евразийский, тьяншанский, тарбагатайский, джунгарский и китайский. Масличный мак относится к евразийскому подвиду [1, 2].

Мак масличный возделывают для получения семян и растительного материала – коробочек, используемых в качестве источника лекарственного сырья (опия). Из семян мака можно извлечь большое количество

(до 45...55 %) ценного масла, которое используют в пищевой промышленности для приготовления салатов и соусов. Кроме того, сами семена применяют в качестве приправы в кондитерские и хлебные изделия [3, 4].

Алкалоиды, содержащиеся в различных генеративных органах мака, относятся к изохинолиновому классу, к основным из которых относятся морфин, кодеин, тебаин, папаверин, наркотин, общее их количество – более 50 [5, 6]. Наибольшим содержанием алкалоидов (до 2,5 %) характеризуются маковые коробочки. Концентрация их зависит от сорта и условий выращивания

ния. Наиболее распространенный алкалоид – морфин, содержание которого варьирует в пределах 0,04...1,48 %, концентрация других (например, кодеина, наркотина, тебаина) значительно меньше – 0,003...0,30 % [7, 8].

Мак масличный, как мелкосемянная культура, довольно требователен к условиям возделывания и предпочитает чистые, хорошо обработанные почвы, так как его всходы растут очень медленно, и в фазе 4...6 листьев растения могут сильно угнетаться сорняками. Поэтому лучший предшественник для мака масличного – чистый пар [1, 9, 10].

Контроль засоренности посевов на сегодня остается одним из важных элементов технологии возделывания сельскохозяйственных культур [11, 12]. При этом наиболее действенный метод решения проблемы – химический [13, 14]. В связи с изложенным представляется актуальным изучение действия гербицидов на растения мака масличного в условиях Среднего Поволжья и возможности подавления сорного ценоза в посевах культуры.

Цель исследований – изучение эффективности применения гербицида на основе мезотриона посредством оценки его влияния на засоренность посевов и показатели продуктивности растений мака в условиях лесостепи Среднего Поволжья.

Методика. Работу выполняли на полях обособленного подразделения Пензенский научно-исследовательский институт сельского хозяйства Федерального научного центра лубяных культур (Лунино, Пензенская область) в 2023–2024 гг. Материалом для исследований служил сорт мака масличного Иссера. В качестве гербицидной защиты использовали препарат Эгида, КЭ (480 г/л мезотриона) с нормой расхода 0,25 л/га, которая была выбрана на основе ранее изученной и рекомендованной дозы внесения, зарегистрированного за рубежом на маке масличном препарата Каллисто, СК с аналогичным действующим веществом. Обработку проводили в фазе 6...8 настоящих листьев растений мака с нормой расхода рабочей жидкости 200 л/га. Гербицид вносили вручную ранцевым опрыскивателем.

Кроме того, в схему опыта был включен вариант с ручной прополкой, обеспечивающей устранение отрицательного воздействия на культурные растения сорняков и гербицида. Ее проводили однократно одновременно с обработкой гербицидом. Так как ручная прополка, в отличие от химического препарата, не обладает пролонгированным действием, в этом варианте отмечали вторую волну всходов сорных растений. В качестве контроля использовали вариант без применения гербицида и ручной прополки.

Предшественник – чистый пар. Посев мака проводили в 3 декаде апреля сеялкой СН-13, широкорядным способом (ширина междурядий – 45 см), норма высева составляла 2,5 млн всхожих семян на 1 га. Размер опытной делянки – 10 м², повторность 4-кратная. Варианты в опыте располагали последовательно. Уборку мака осуществляли в фазе полной спелости культуры вручную. Урожайность приводили к 100 %-ной чистоте и к 10 %-ной влажности согласно ГОСТ Р 52325-2005 путем ручной сортировки через калиброванные сита.

Почва опытного участка – тяжелосуглинистый среднесиловый выщелоченный чернозем с pH_{col} 5,1. Содержание гумуса в пахотном слое почвы составляло 5,9 % (по Тюрину), легкогидролизуемого азота (по Тюрину и Кононовой) – 136,0 мг/кг, подвижного фосфора и калия (по Чирикову) – соответственно 172,0 мг/кг и 206,7 мг/кг.

Эгида, КЭ – послевсходовый системный гербицид для борьбы с однолетними и некоторыми многолетними

двудольными сорняками, а также отдельными видами однолетних злаковых сорняков. В его состав входит одно действующее вещество – мезотрион, который проникает через листья и корни, передвигаясь акропетально и базипетально. Ингибируя биосинтез каротиноидов, препарат эффективно контролирует сорные растения на начальных стадиях их роста. Вызывает прекращение роста чувствительных видов в течение одного-двух дней после обработки [15, 16].

Закладку опыта, учеты и наблюдения выполняли на основании методических указаний по проведению полевых и агротехнических опытов с масличными культурами [17]. Испытание гербицида проводили в соответствии с методическим руководством Ю. Я. Спиридонова с соавторами [18], виды сорняков определяли по К. С. Артохину [19]. Учет засоренности посевов мака выполняли перед проведением защитных мероприятий, через 20 дней после применения гербицида и перед уборкой культуры. Статистическую обработку результатов исследований осуществляли методом дисперсионного анализа с использованием программы MS Excel и Statistika.

Метеоусловия вегетационных периодов 2023–2024 гг. были не вполне благоприятными для мака масличного. Величина гидротермического коэффициента (ГТК) в 2023 г. соответствовала недостаточному увлажнению (0,55), в 2024 г. условия роста растений характеризовались как более благоприятные (ГТК – 0,83), однако оставались недостаточно увлажненными.

Гидротермический режим на разных этапах развития мака значительно различался. В межфазный период посев-всходы, длительность которого составляла 17 суток, в 2023 г. выпало мало осадков (11,1 мм) при среднесуточных температурах 11,3 °С, ГТК находился на уровне 0,65 единиц. В 2024 г. появление всходов отмечали на четырнадцатые сутки при оптимальном увлажнении для роста растений (ГТК – 1,06), среднесуточные температуры составили 11,7 °С.

В межфазный период всходы-цветение в 2023 г. рост растений протекал при оптимальном увлажнении (ГТК – 1,22), в 2024 г., наоборот, увлажнение было недостаточным (ГТК – 0,73). Гербицидную обработку (6...8 настоящих листьев мака) проводили при достаточной обеспеченности растений влагой. В межфазный период цветение – спелость посевы мака находились в условиях слабого увлажнения (ГТК в 2023 г. был равен 0,49, в 2024 г. – 0,44).

Результаты и обсуждение. В посевах мака в годы исследований сорный ценоз в фазе образования 3...4 настоящих листьев культуры был представлен яровыми поздними (64,8 %), яровыми ранними (23,7 %), зимующими (7,2 %) и многолетними (4,3 %) видами (рис. 1).

На опытных делянках в большем, чем остальные виды, количестве присутствовали щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus*) – 44,7 %; щетинник сизый (*Setaria glauca*) и куриное просо (*Echinochloa crus-galli*) – в сумме 20,4 %; дымянкa лекарственная (*Fumaria officinalis*) – 7,2 %; марь белая (*Chenopodium album*) – 7,7 %; ярутка полевая (*Thlaspi arvense*) – 3,8 %; ромашка непахучая (*Matricaria inodora*) – 3,4 % (табл. 1).

Гербицид Эгида обеспечивал эффективное сдерживание роста надземной массы сорняков и контроль их численности. Кроме того, отмечено его достаточно высокое угнетающее действие на рост и развитие щетинника сизого, в результате которого снижалась надземная сырая масса сорняков этого вида.

Через 20 суток после опрыскивания препаратом наблюдали уменьшение общей сырой массы сорняков,



Рис. 1. Доля агробиологических групп сорняков в агроценозе мака масличного (2023–2024 гг.), %.

по сравнению с контролем, в вариантах с ручной прополкой на 96,3 %, с гербицидом – на 80,5 %, перед уборкой урожая семян – на 91,5 и 88,7 % соответственно (табл. 2). Количество сорняков в варианте с ручной прополкой через 20 суток после обработки уменьшилось на 92,8 %; при гербицидном опрыскивании – только на 18,6 %, перед уборкой – на 87,1 и 74,1 % соответственно.

Табл. 1. Видовой состав сорняков в агроценозе мака масличного (2023–2024 гг.)

Название	Число, шт./м ²	Доля сорного растения, %
Марь белая (<i>Chenopodium album</i>)	18	7,7
Дымянка лекарственная (<i>Fumaria officinalis</i>)	17	7,2
Чистец однолетний (<i>Stachys annua</i>)	9	3,8
Горец развесистый (<i>Polygonum lapathifolium</i>)	5	2,1
Горец вьюнковый (<i>Polygonum convolvulus</i>)	7	3,0
Щетинник сизый (<i>Setaria glauca</i>)	48	20,4
Куриное просо (<i>Echinochloa crusgall</i>)	105	44,7
Щирица (<i>Amaranthus retroflexus</i>)	9	3,8
Ярутка полевая (<i>Thlaspi arvense</i>)	8	3,4
Ромашка непахучая (<i>Matricaria inodora</i>)	4	1,7
Осот розовый (<i>Cirsium arvense</i>)	5	2,1
Вьюнок полевой (<i>Convolvulus arvensis</i>)	235	100

Учет через 20 суток после применения гербицида продемонстрировал эффективный контроль численности и массы сорняков, за исключением вьюнка полевого, осота желтого, ромашки непахучей и злакового компонента. Гербицидное действие на уровне ручной прополки и выше было достигнуто по отношению к таким видам, как горец вьюнковый (*Polygonum convolvulus*) и ярутка полевая (*Thlaspi arvense*). Снижение массы растений к контролю этих видов составило 96,2 и 99,1 %. В остальных случаях активность препарата составляла от 74,6 до 86,3 %.

К концу вегетации мака при гербицидной защите отмечали значительное снижение надземной массы вьюнка полевого относительно контроля на 82,7 %, осота желтого – на 100 %, ромашки непахучей – на 91,6 %, злаковых сорняков – на 96,4 %, что было эффективней, по сравнению с ручной прополкой. Зафиксировано полное отсутствие на опытных делянках видов осота и ярутки полевой. Следует также отметить, что эффективность гербицида в отношении горца почечуйного к концу вегетации растений повысилась с 74,6 % (через 20 суток после обработки) до 100 %.

Ослабление конкуренции между культурными и сорными растениями на фоне применения гербицида оказывало положительное влияние на показатели

Табл. 2. Снижение засоренности в посевах мака масличного (2023–2024 гг.)

Вид	Перед проведением защитных мероприятий	Через 20 дней после защитных мероприятий			Перед уборкой урожая семян		
		кон-троль (без обработок)	ручная прополка	Эгида КЭ	кон-троль (без обработок)	ручная прополка	Эгида КЭ
Вьюнок полевой	1	4	75	0,5	3	66,7	66,7
Осот розовый	1,1	17,0	85,9	44,1	63,7	66,7	82,7
Осот желтый	1	3	100	66,7	2	100	100
Куриное просо	0,3	26,1	85,8	24,6	2	100	100
Щирица запрокинутая	1	3	100	66,7	2	100	100
Марь белая	0,2	2,3	60,9	14,4	2	100	100
Просвирник приземистый	53,7	48	89,6	81	29	93,1	89,7
Дымянка лекарственная	23,6	55,6	96,4	50,4	453,6	89,4	91,6
Чистец однолетний	111	105	96,2	38,1	13	92,3	6
Горец вьюнковый	6,4	229,7	99,2	86,6	123,8	78,8	70,8
Горец почечуйный	19	16	93,8	25	8	87,5	37,5
Ромашка непахучая	1,9	25,6	97,7	86,3	146,6	98,5	89,8
Ярутка полевая	2	4	50	0	3	66,7	66,7
Общее**	1,0	33,2	95,5	78,9	228,5	99,2	88,1
Вьюнок полевой	12	17	100	70,6	3	100	0,2
Осот розовый	2,4	34,7	86,2	92,4	2	100	71,0
Осот желтый	13	9	88,9	44,4	3	66,7	66,7
Куриное просо	0,7	3,7	89,2	78,4	39,0	95,6	95,4
Щирица	5	7	85,7	85,7	4	50	100
Горец вьюнковый	1,0	7,9	95,8	96,2	26,8	75,4	75,4
Горец почечуйный	4	3	100	33,3	4	75	100
Ромашка непахучая	1,2	7,1	74,6	107,2	95,1	95,1	95,1
Ярутка полевая	12	8	87,5	0	10	90	90
Общее**	0,7	11,2	92,9	64,3	60,8	91,1	96,4
Вьюнок полевой	3	9	66,7	88,9	1	100	100
Осот розовый	0,8	32,9	78,4	99,1	9,9	9,9	9,9
Осот желтый	72,1	23,6	92,8	18,6	85	87,1	74,1
Общее**	41,3	487,0	96,3	80,5	1391,3	91,5	88,7

*в контроле в числителе количество сорняков, шт./м²; в знаменателе – надземная масса, г/м²; в остальных вариантах – соответственно эффективность снижения числа и массы сорняков, %;

**значения НСР приведены для общей массы сорняков: через 20 дней после защитных мероприятий – 6,3 г/м², перед уборкой урожая семян – 5,3 г/м².

структуры урожая и способствовало формированию дополнительного урожая семян (табл. 3). При обработке препаратом Эгида длина главного стебля увеличивалась по отношению к контролю на 13,7 %, высота растения – на 17,8 %, к ручной прополке – на 13,1 и 16,6 % соответственно. Количество коробочек на растении при ручной прополке было больше, чем в контроле, на 66,7 %; при гербицидной обработке – на 33,3 %.

Под влиянием защиты от сорняков выявлено увеличение размеров главной и боковой коробочек мака. Эффективность воздействия гербицида на величину этого показателя практически не уступала влиянию ручной прополки. Применение препарата Эгида обеспечивало повышение массы семян с одной коробочки к контролю на 33,0 %, но не превышало величины этого показателя при ручной прополке.

Контроль над сорной растительностью с использованием гербицида и ручной прополки оказывал существенное действие и на семенную продуктивность. В целом масса семян с одного растения возрасла соответственно в 1,8 и 3,2 раза, масса 1000 семян – на 10,4 и 16,7 %.

Без защиты от сорной растительности в контрольном варианте урожайность семян мака составляла 0,98 т/га. При проведении ручной прополки она существенно возрасла до 1,36 т/га, гербицидной обработки посевов – до 1,31 т/га (рис. 2). Величина сохраненного урожая при этом находилась на уровне соответственно 0,33 и 0,38 т/га (33,7 и 38,8 %).

Табл. 3. Воздействие защиты от сорняков на структуру урожая мака масличного (2023–2024 гг.)

Вариант	Длина главного стебля, см	Высота растения, см	Среднее число коробочек на растении, шт.	Высота/ширина коробочки, мм	Масса семян, г		Масса 1000 семян, г
					с 1 коробочки	с 1 растения	
Контроль	78,7 ± 8,8	91,9 ± 9,5	2,1 ± 0,7	34,8 ± 2,9 22,5 ± 2,6	1,88 ± 0,49	2,45 ± 0,60	0,48 ± 0,06
Ручная прополка	79,1 ± 6,5	92,9 ± 5,9	3,5 ± 0,9	35,3 ± 0,2 32,2 ± 0,3	3,64 ± 0,77	7,84 ± 0,69	0,56 ± 0,02
Эгида, КЭ	89,5 ± 14,9	108,3 ± 9,3	2,8 ± 0,8	37,4 ± 13,0 24,7 ± 3,1	3,50 ± 0,69	4,4 ± 0,65	0,53 ± 0,06
НСР ₀₅	2,9	5,7	0,58	1,3 2,6	0,2	0,9	0,02



Рис. 2. Урожайность семян мака масличного в зависимости от методов защиты посевов от сорняков (2023–2024 гг.), т/га.

Более благоприятные условия выращивания культуры способствовали формированию положительной тенденции накопления масла в семенах мака. При ручной подкормке достоверная прибавка к контролю составила 0,50 %, в варианте с гербицидом – 0,31 % относительно контроля (рис. 3). Следует отметить, что при выращивании мака масличного в промышленных масштабах провести ручную прополку невозможно, поэтому эффективность гербицидной защиты не вызывает сомнения, несмотря на несколько меньшую масличность семян.

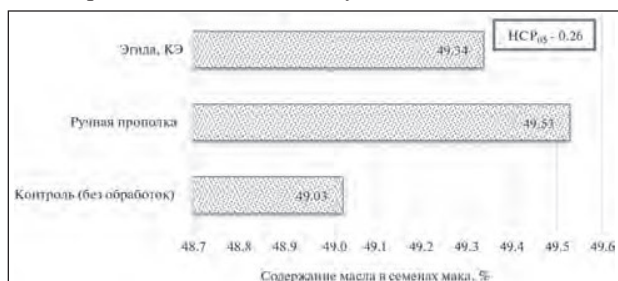


Рис. 3. Воздействие защиты от сорняков на синтез масла в семенах мака (2023–2024 гг.), %.

Выводы. Эффективность отечественного гербицида на основе мезотриона (Эгида, КЭ) при наземном опрыскивании посевов мака масличного против однолетних и многолетних сорняков в условиях Среднего Поволжья составила 80,5...88,7 %. При благоприятных для гербицидной обработки гидротермических условиях защитный эффект препарата сохранялся до конца вегетации мака. Снижение надземной массы злаковых сорняков, ромашки непахучей, чистеца однолетнего, видов осотов и горцев составляло 91,6...100 %. На фоне гербицидной защиты повышалась продуктивность мака масличного. При этом сохраненный урожай семян в этом варианте практически находился на уровне ручной прополки – 0,33 и 0,38 т/га (33,7 и 38,8 %) соответственно.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ

«Федеральный научный центр лубяных культур» (тема № FGSS-2022-0008). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Прахова Т. Я., Кабунина И. В. Мак масличный (*Papaver Somniferum*) – значение и перспективы возделывания в России // Технические культуры. Научный сельскохозяйственный журнал. 2023. № 1(7). С. 3–12. doi: 10.54016/SVITOK.2023.63.62.001.
2. Labanca F., Ovesna J., Milella L. *Papaver somniferum* L. taxonomy, uses and new insight in poppy alkaloid pathways // Phytochemistry reviews. 2018. No. 17(4). P. 853–871. doi: 10.1007/s11101-018-9563-3.
3. Studies on sensory and phytochemical characteristics of poppy (*Papaver Somniferum* L.) varieties for their oil utilization / K. Gupcsó, Z. Kókai, M. Bálint, et al. // Foods. 2023. No. 17. P. 3165. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37685099/> (дата обращения: 10.02.2024). doi: 10.3390/foods12173165.
4. Biochemistry, Genetics, and Genomics of Opium Poppy (*Papaver somniferum*) for Crop Improvement / T. Muluneh, D. Shirmila, A. Gendall, et al. // Annual Plant Reviews online. 2019. P. 1177–1219. doi: 10.1002/9781119312994.apr0711.
5. Подольная Л. П., Дубовская А. Г., Бидаш Ю. И. Изменчивость хозяйственных признаков мака (*Papaver Somniferum* L.) масличного использования // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2011. Т. 167. С. 101–111.
6. Aykanat S., Türktas M. Divergent proteomic profiles of opium poppy cultivars // Turkish Journal of Biology. 2024. No. 1(48). P. 80–90. doi: 10.55730/1300-0152.2684.
7. Opium and its major alkaloidal constituents: a review article / R. Devi, B. Khan, M. Bala, et al. // Ymer. 2022. No. 7. P. 263–279. doi: 10.37896/ymer21.07/20.
8. Májer P., Németh É. Z. Alkaloid accumulation and distribution within the capsules of two opium poppy (*Papaver Somniferum* L.) varieties // Plants. 2024. Vol. 13. No. 12. C. 1640. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/12/1640> (дата обращения: 10.02.2024). doi: 10.3390/plants13121640.
9. Смирнов А. А., Барашкина Е. В. Продуктивность мака масличного в лесостепи Поволжья // Достижение науки и техники АПК. 2006. № 9. С. 17–18.
10. Evaluation of agronomic and oil characteristics of selected turkish poppy genotypes under Ankara's climate conditions / Y. A. Kahraman-Yanardağ, S. Day, N. Bayraktar, et al. // Agronomy. 2024. No. 5. P. 957.

- URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/5/957> (дата обращения: 10.02.2024). doi: 10.3390/agronomy14050957.
11. Гуцина В. А., Лыкова А. С., Королев А. С. Засоренность агроценоза горчицы белой в зависимости от агротехнических приемов в условиях лесостепи Среднего Поволжья // *Аграрный научный журнал*. 2023. № 6. С. 12–17. doi: 10.28983/asj.y2023i6pp12-17.
 12. Влияние технологий возделывания на засоренность посевов и продуктивность гороха посевного / А. Н. Морозов, Д. В. Дубовик, Е. В. Дубовик и др. // *Зерновое хозяйство России*. 2024. № 2. С. 98–105. doi: 10.31367/2079-8725-2024-91-2-98-105.
 13. Кузина Е. В. Засоренность посевов горчицы в условиях Западной Сибири // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2022. № 2 (386). С. 209–212. doi: 10.55186/25876740_2022_65_2_209.
 14. Use of mesotrione and tembotrione herbicides for post-emergence weed control in alkaloid poppy (*Papaver somniferum*) / P. Gyula, T. Kálmán, K. J. Attila, et al. // *International Journal of Pest Management*. 2014. No. 3(60). P. 187–195. doi: 10.1080/09670874.2014.953622.
 15. Кузнецова С. В., Багринцева В. Н. Отечественные гербициды для защиты кукурузы от сорняков // *Земледелие*. 2021. № 4. С. 44–48. doi: 10.24411/0044-3913-2021-10411.
 16. Веневцев В. З., Захарова М. Н., Рожкова Л. В. Эффективность применения гербицидов после всходов посевов кукурузы на зерно // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2018. № 4. С. 55–58. doi: 10.30850/vrsn/2018/4/55-58.
 17. Методика проведения полевых и агротехнических опытов с масличными культурами / В. М. Лукомец, Н. М. Тишков, В. Ф. Баранов и др. Краснодар: ВНИИМК, 2007. 113 с.
 18. Спиридонов Ю. Я., Ларина Г. Е., Шестаков В. Г. Методическое руководство по изучению гербицидов, применяемых в растениеводстве / РАСХН, ВНИИФ. М.: Печатный город, 2009. 247 с.
 19. Артохин К. С. Сорные растения. М.: Печатный город, 2010. 263 с.

Поступила в редакцию 14.02.2025
После доработки 02.03.2025
Принята к публикации 25.03.2025

Зоотехния и ветеринария

УДК 579.64

DOI 10.31857/S2500262725020082 EDN DEQLIU

АНТИБИОТИКОУСТОЙЧИВОСТЬ И ЗООНОЗНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ШТАММОВ *ESCHERICHIA COLI*, ВЫДЕЛЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ПТИЦЕВОДЧЕСКОГО АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

© 2025 г. М. В. Кузнецова, доктор медицинских наук, Ю. С. Поспелова, кандидат биологических наук, В. С. Михайловская, Д. А. Кочергина

Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, 614081, Пермь, ул. Голева, 13
E-mail: mar19719@yandex.ru

Сельскохозяйственная птица служит источником устойчивых к антибиотикам и потенциально патогенных *Escherichia coli*, которые могут циркулировать на предприятиях и попадать в окружающую среду через органические отходы. Цель исследования – анализ профилей устойчивости к противомикробным препаратам, генов патогенности и филогрупп штаммов *E. coli*, циркулирующих в птицеводческих хозяйствах Пермского края. Изучены штаммы трех групп: от здоровых птиц ($n=16$), от кур с признаками колибактериоза ($n=28$) и из органических отходов ($n=19$). Методом ПЦР детектировали гены устойчивости к антимикробным препаратам и гены, кодирующие факторы патогенности. Среди штаммов первой группы мультирезистентные *E. coli* встречались в 18,8 % случаев, второй – в 75 %, третьей – в 73,7 % случаев. В ДНК *E. coli* обнаружено до 6 генов антибиотикорезистентности. Во всех группах чаще других встречался ген бета-лактамазы *bla*_{TEM}. Более половины *E. coli*, полученных от больных кур, несли *bla*_{CTX-M}. В органических отходах отмечали высокую долю *E. coli*, содержащих бета-лактамазу SHV-типа (63,2 %). Среди последних чаще детектировали ген системы эффлюкса *tetA*, также в этой группе более 20 % *E. coli* имели гены белков *QnrB* и *QnrS*, ответственные за плазмид-опосредованную резистентность к фторхинолонам. Большинство изолятов, полученных от здоровых птиц, относились к филогруппе E, от больных – к B1, выделенных из органических отходов – к C или E. Патогенные для птиц (APEC) культуры, в том числе клоны высокого риска, наиболее часто встречались в группе штаммов от больных птиц (75 %). При этом их обнаруживали и среди штаммов от здоровых кур (6,3 %), а также в органических отходах (63,2 %). Большинство проанализированных *E. coli* несли комбинации генов-маркеров как экстраинтестинальных, так и интестинальных *E. coli*, что указывает на их высокий зоонозный потенциал.

ANTIBIOTIC RESISTANCE AND ZOO NOTIC POTENTIAL OF *ESCHERICHIA COLI* STRAINS ISOLATED FROM POULTRY AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

M. V. Kuznetsova, Yu. S. Pospelova, V. S. Mihailovskaya, D. A. Kochergina

Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 614081, Perm, ul. Goleva, 13
E-mail: mar19719@yandex.ru

Poultry is a source of antibiotic-resistant and potentially pathogenic *Escherichia coli*, which can circulate in enterprises and enter the environment through organic waste. The aim of the study was to analyze antimicrobial resistance profiles, pathogenicity genes and phylogroups of *E. coli* strains circulating in poultry farms in the Perm Region. The strains of three different groups were studied: those isolated from healthy birds ($n=16$), chickens with colibacteriosis ($n=28$) and organic waste ($n=19$). PCR was used to detect antibiotic resistance and virulence-associated genes. In each of the groups, multidrug-resistant *E. coli* were found in 18.8 %, 75 % and 73.7 % of cases, respectively. Up to 6 antibiotic resistance genes were detected in *E. coli* genomes. The beta-lactamase *bla*_{TEM} gene was found most often in all groups. More than half of the *E. coli* obtained from sick chickens carried *bla*_{CTX-M}. A high proportion of *E. coli* encoding SHV type beta-lactamase (63.2 %) was found in the organic waste. Among them, the *tetA* efflux system gene was detected more often, and in this group more than 20 % of *E. coli* had the genes encoding *QnrB* and *QnrS* proteins responsible for plasmid-mediated resistance to fluoroquinolones. Most of the strains obtained from healthy birds belonged to phylogroup E, from sick birds – to B1, isolated from organic waste – to C or E. Avian pathogenic *E. coli* (APEC), including high-risk clones, were found with high frequency in the group of sick birds (75 %), were found in the group of healthy birds (6.3 %) and were preserved in organic waste (63.2 %). Most of the analyzed *E. coli* (54 %) carried combinations of marker genes both extraintestinal and intestinal *E. coli*, which indicates their high zoonotic potential.

Ключевые слова: птицеводческие предприятия, *Escherichia coli*, патогенные для птиц *E. coli* (APEC), антибиотикорезистентность, гены патогенности, филогруппы.

Keywords: poultry enterprises, *Escherichia coli*, avian pathogenic *E. coli* (APEC), antibiotic resistance, virulence-associated genes, phylogroups.

В современных условиях большое внимание уделяется вопросам возникновения и распространения устойчивости к антибиотикам в местах, ассоциированных с сельскохозяйственной деятельностью человека, особенно в контексте безопасности пищевых продук-

тов [1, 2]. По данным ВОЗ, использование антибиотиков в ветеринарии в два раза превышает объем аналогичных препаратов, применяемых в медицине. Наиболее активно используют антибиотики в условиях птицеводческих хозяйств – при выращивании бройлеров в среднем

проводят 2...4 цикла антибиотикотерапии [3, 4]. Это способствует появлению бактерий с фенотипом множественной лекарственной устойчивости (МЛУ). В разных странах, например, в Бразилии, которая относится к числу крупнейших производителей и ведущих экспортеров куриного мяса, проводят масштабные исследования, посвященные выявлению антибиотикорезистентности в коллекциях бактериальных культур, выделенных от сельскохозяйственных птиц, а также в продуктах питания, получаемых на агропромышленных предприятиях и частных фермах [5]. Показана связь между применением антибиотиков для лечения или улучшения состояния сельскохозяйственных животных и обнаружением устойчивых микроорганизмов в условиях агропромышленного комплекса (в организме животного, в пищевой продукции, окружающей среде) [2, 6, 7].

Природные популяции *E. coli* могут представлять опасность для здоровья людей [8, 9, 10], так как, помимо детерминант антибиотикостойчивости, они могут содержать гены патогенности, располагающиеся на плазидах или хромосоме в определенных регионах, называемых островками патогенности [11]. В первую очередь, эпидемическую и эпизоотическую значимость в условиях птицеводческих хозяйств представляют штаммы патогенной для птиц *E. coli* (avian pathogenic *E. coli*, АРЕС), отнесенной в 2004 г. к группе внекишечных *E. coli* (ExPEC) [12]. Отмечается, что АРЕС обладают высоким зоонозным потенциалом, поскольку ExPEC человека и птиц имеют сходное филогенетическое происхождение и содержат некоторые общие гены вирулентности [13, 14]. Показано, что присутствие плазмид вирулентности ColV и ColBM, несущих маркеры *hlyF* и *ompT*, классифицирует штамм как клон АРЕС высокого риска [15]. Необходимо отметить, что появляются гибридные и гетеропатогенные представители, сочетающие комбинации генов, характерные для разных патотипов эшерихий [16].

Особый интерес представляет оценка влияния птицеводческих хозяйств на экосистему, поскольку органические удобрения могут служить факторами биологического и химического загрязнения биосферы [17]. Возможна контаминация используемых в сельском хозяйстве органических удобрений на основе куриного помета устойчивыми к антибактериальным препаратам штаммами. Выход условно-патогенных и патогенных антибиотикостойчивых бактерий в окружающую среду через отходы животного происхождения увеличивает «резервуар сопротивления» и «резервуар патогенности», существующий в микробиоме природных биотопов [5]. Для оценки рисков, связанных с возможным переносом резистентных патогенных бактерий внутри производственной цепочки птицеводства, а также за ее пределы, представляется важным знать разнообразие и распространенность генетических детерминант антибиотикостойчивости и патогенности среди бактерий *E. coli*, которые относятся к числу основных возбудителей кишечных и внекишечных инфекций птицы.

Цель исследования – определение профилей устойчивости к противомикробным препаратам, генов антибиотикорезистентности и патогенности, а также филогрупп у штаммов *E. coli*, циркулирующих в птицеводческом хозяйстве.

Методика. В работе использовали штаммы *E. coli* с индивидуальными генетическими профилями, собранные на птицеводческих предприятиях Пермского края: 28 культур выделены из органов цыплят-бройлеров с признаками колисептицемии в 2016–2018 гг. [18]; 16 культур – из фекалий здоровых сельскохозяйствен-

ных птиц в 2020 г. [19]; 19 культур – из органических отходов, в том числе, свежего, хранившегося не более 3-х недель помета ($n=17$) или после 12 мес. хранения органического удобрения ($n=2$) в 2022–2023 гг. Идентификацию штаммов проводили с использованием тест-системы «ENTEROtest 16» (Erba Lachema s.r.o., Czech Republic) и видоспецифических uidA-F/uidA-R праймеров. Генетическое типирование культур осуществляли посредством гер-ПЦР с праймерами ERIC1/2 [19].

Определение чувствительности штаммов к антибактериальным препаратам (ампициллин – 10 мкг, цефоперазон – 75 мкг, цефепим – 30 мкг, меропенем – 10 мкг, азтреонам – 30 мкг, амикацин – 30 мкг, гентамицин – 10 мкг, ципрофлоксацин – 5 мкг левофлоксацин – 5 мкг, тетрациклин – 30 мкг, хлорамфеникол – 30 мкг) проводили согласно клиническим рекомендациям «Определение чувствительности микроорганизмов к антимикробным препаратам» Межрегиональной ассоциации по клинической микробиологии и антимикробной химиотерапии (МАКМАХ, Версия-2018-03). Проверку выполняли диско-диффузионным методом с использованием агара Мюллера-Хинтона (ФБУН ГНЦ ПМБ, Россия) и дисков (НИИЦФ, Санкт-Петербург). Нечувствительность штамма хотя бы к одному препарату трех и более классов антибиотиков считали как МЛУ [20].

ДНК для идентификации генов устойчивости к антибиотикам получали следующим образом: петлю биомассы бактериальной культуры инокулировали в 100 мкл сверхчистой воды, прогревали при 97 °С в твердотельном термостате «Термит» (Россия) 15 мин, пробы охлаждали, центрифугировали 5 мин при 13 тыс. об./мин. Супернатанты использовали в генетических исследованиях. Методом ПЦР по конечной точке детектировали гены, обуславливающие устойчивость к бета-лактамам антибиотикам (*bla*_{TEM}, *bla*_{CTX-M}, *bla*_{SHV}, *bla*_{CMY}, *bla*_{OXA}), тетрациклину (*tetA*), фторхинолонам (*qnrA*, *qnrB*, *qnrS*, *qepA*), аминогликозидам (*aacC2*), а также ген регулятора конъюгативного переноса F-плазмиды (*traI*) и интегроны 1 класса (*int1*) [18, 21]. Использовали праймеры и режимы амплификации согласно рекомендациям авторов. Амплификацию проводили на термоциклере DNA Engine Dyad Thermal Cycler (Bio-Rad, США). Визуализацию полос и документирование данных осуществляли с использованием системы гель-документации Gel-DocXR (Bio-Rad, США).

Для идентификации генов, ассоциированных с вирулентностью, детектировали гены, кодирующие факторы патогенности: токсины (*hlyA*, *hlyF*, *east1*, *ehxA*, *estI*, *eltA*, *stx1*, *stx2*, *cnf1*), адгезины (*fimH*, *iha*, *yqi*), протектины (*ompT*, *kpsMTII*, *iss*), белки систем поглощения железа (*iroN*, *iutA*) [19]. Использовали праймеры (ООО «Синтол», Москва) и программы по рекомендациям авторов. Штаммы, содержащие хотя бы три из пяти генов (*hlyF*, *iroN*, *ompT*, *iss*, *iutA*), относили к патотипу АРЕС [22].

Штаммы *E. coli* относили к филогенетическим группам A, B1, B2, C, D, E или U по результатам ПЦР-анализа генов *chuA*, *yjaA*, *arpA* и фрагмента ДНК TspE4.

C2 с использованием ранее описанного протокола [23]. Для выявления статистически значимых различий между качественными показателями выборок определяли точный критерий Фишера (двусторонний). Обработку данных проводили с использованием компьютерных программ Microsoft Office XP Excel и GraphPad Prism Statistical Software.

Результаты и обсуждение. Во всех группах отмечены высокие показатели резистентности к ампициллину и тетрациклину, тогда как устойчивость к амикацину

Табл. 1. Распространенность устойчивых к антибиотикам штаммов *E. coli*

Антибиотик	Резистентные <i>E. coli</i> , выделенные из разных источников			Точный критерий Фишера (<i>p</i> -значение) между		
	1	2	3			
	здоровые птицы, число штаммов (%)	больные птицы, число штаммов (%)	органические отходы, число штаммов (%)	1 и 2	1 и 3	2 и 3
Ампициллин	5 (31,3)	23 (82,1)	19 (100)	0,001	<0,001	0,072
Цефоперазон	2 (12,5)	7 (25)	3 (15,8)	0,450	1,000	0,718
Цефепим	2 (12,5)	7 (25)	0	0,450	–	–
Азтреонам	1 (6,3)	5 (17,9)	0	0,392	–	–
Меропенем	0	0	0	–	–	–
Амикацин	2 (12,5)	3 (10,7)	1 (5,3)	1,000	0,582	0,638
Гентамицин	1 (6,3)	13 (46,4)	3 (15,8)	0,007	0,608	0,058
Ципрофлоксацин	1 (6,3)	14 (50)	17 (89,5)	0,007	<0,001	0,005
Левифлоксацин	2 (12,5)	13 (46,4)	16 (84,2)	0,049	<0,001	0,006
Тетрациклин	9 (56,3)	22 (78,6)	13 (68,4)	0,172	0,503	0,506
Хлорамфеникол	2 (12,5)	13 (46,4)	11 (57,9)	0,045	0,017	0,770
Мультирезистентные	3 (18,8)	21 (75)	14 (73,7)	<0,001	0,002	1,000

была низкой (табл. 1). Для большинства антибиотиков (кроме фторхинолонов) уровень резистентности между изолятами, выделенными от больных птиц и органических отходов, не различался. Высокой резистентностью к фторхинолонам характеризовались *E. coli*, полученные из куриного помета: к левофлоксацину – 84,2 %, к ципрофлоксацину – 89,5 %. Из 63 штаммов *E. coli* 60,3 % были мультирезистентными: от здоровых птиц было выделено 18,8 % (3 из 16) таких штаммов, от больных птиц – 75 % (21 из 28), из органических отходов – 73,7 % (14 из 19).

Число противомикробных препаратов, к которым каждый изолят проявлял устойчивость, составляло от 0 до 7. Культуры *E. coli*, изолированные от птиц с признаками колибактериоза и из отходов на основе куриного помета, чаще были устойчивы одновременно к 6 (21,4 %) и 5 (31,6 %) антибиотикам соответственно, тогда как от здоровых птиц чаще выделяли монорезистентные культуры (31,3 %, 5 из 16). Профиль устойчивости AMP-CIP-LEV-CHL-TET чаще встречался в группах *E. coli* от больных кур (3 из 28) и из органических отходов (4 из 19). Необходимо отметить, что во всех группах большинство штаммов имели индивидуальные/неповторяющиеся профили устойчивости к антибиотикам (табл. 2).

В ходе исследования у изученных штаммов *E. coli* было выявлено 7 различных детерминант устойчивости. Обнаружены гены трех различных типов бета-лактамаз (bla_{TEM} , bla_{SHV} , bla_{CTX-M}), среди которых чаще всего в каждой группе встречался bla_{TEM} (табл. 3). Более половины *E. coli*, полученных от больных кур, несли bla_{CTX-M} . В органических отходах отмечена высокая доля культур, несущих ген bla_{SHV} (63,2 %). Кроме того, среди последних чаще детектировали ген системы эффлюкса *tetA*, а более 20 % *E. coli* в этой группе несли гены белков QnrB и QnrS, ответственные за плазмид-опосредованную резистентность к фторхинолонам – важным противомикробным препаратам из списка ВОЗ. Ген *aacC2*, придающий устойчивость к аминогликозидам, присутствовал у 28,6 % культур, изолированных из органов птиц с колибактериозом, и у 21,1 % *E. coli* из отходов. Гены bla_{CMY} , bla_{OXA} , *qnrA* и *qerA* не были обнаружены ни в одной из групп. В геномах *E. coli* детектировали от 0 до 6 генов устойчивости

Табл. 2. Индивидуальные фенотипические профили антибиотикорезистентности и профили генов устойчивости к антибиотикам штаммов *E. coli*

Профили устойчивости к антибиотикам	Число штаммов	Профили генов устойчивости к антибиотикам	Число штаммов
<i>E. coli</i> от здоровых птиц			
AMK-LEV-AMP-CFP-CFO-CHL-TET*	1	$tetA-qnrB$	1
GEN-AMK-LEV-CIP-TET	1	$bla_{TEM}-tetA$	2
AMP-CFP-CFO-AZT-CHL	1	bla_{TEM}	3
AMP-TET	2	$tetA$	4
AMP	1		
TET	5		
<i>E. coli</i> от больных птиц			
AMP-GEN-AMK-LEV-CIP-CHL-TET	1	$bla_{CTX}-bla_{TEM}-qnrS-qnrB-aacC2$	1
AMP-CFP-AZT-LEV-CIP-CHL-TET	1	$bla_{CTX}-bla_{TEM}-tetA-qnrB-aacC2$	2
AMP-CFP-GEN-AMK-CIP-CHL-TET	1	$bla_{CTX}-bla_{TEM}-tetA-aacC2$	1
AMP-CFP-CFO-AZT-GEN-CHL-TET	1	$bla_{CTX}-bla_{TEM}-tetA-qnrB$	1
AMP-CFP-CFO-AZT-GEN-TET	1	$bla_{CTX}-bla_{TEM}-aacC2$	2
AMP-GEN-LEV-CIP-CHL-TET	1	$bla_{CTX}-bla_{TEM}-tetA$	3
AMP-GEN-AMK-LEV-CIP-TET	1	$bla_{TEM}-tetA-qnrB$	1
AMP-CFP-GEN-LEV-CIP-TET	1	$bla_{SHV}-qnrB$	1
AMP-CFO-GEN-LEV-CIP-TET	2	$bla_{CTX}-aacC2$	1
AMP-CFP-CFO-AZT-GEN	1	$bla_{CTX}-bla_{TEM}$	4
AMP-LEV-CIP-CHL-TET	3	bla_{TEM}	5
GEN-LEV-CIP-CHL-TET	1		
AMP-CFP-CHL-TET	1		
AMP-CFP-AZT-TET	1		
AMP-CFP-GEN-TET	1		
AMP-CHL-TET	2		
AMP-LEV-CIP	2		
AMP-GEN-CHL	1		
AMP-TET	1		
TET	2		
<i>E. coli</i> из органических отходов			
AMP-CFO-GEN-LEV-CIP-CHL-TET	1	$bla_{CTX}-bla_{TEM}-bla_{SHV}-tetA-qnrS-aacC2$	2
AMP-CFO-LEV-CIP-CHL-TET	2	$bla_{TEM}-bla_{SHV}-tetA-qnrS$	1
AMP-GEN-LEV-CIP-CHL-TET	1	$bla_{CTX}-bla_{TEM}-tetA-qnrS$	1
AMP-LEV-CIP-CHL-TET	2	$bla_{CTX}-bla_{TEM}-bla_{SHV}-tetA$	1
AMP-LEV-CIP-CHL-TET	2	$bla_{SHV}-tetA-qnrS-aacC2$	1
AMP-GEN-CIP-CHL-TET	1	$bla_{TEM}-bla_{SHV}-tetA-qnrB$	1
AMP-AMK-LEV-CIP-TET	1	$bla_{CTX}-bla_{TEM}-tetA-qnrB$	1
AMP-LEV-CIP-CHL	1	$bla_{TEM}-tetA-aacC2$	1
AMP-LEV-CIP-TET	3	$bla_{TEM}-bla_{SHV}-tetA$	3
AMP-LEV-CIP	3	$bla_{CTX}-bla_{TEM}-bla_{SHV}$	1
AMP-CHL	1	$bla_{CTX}-bla_{TEM}$	1
AMP	1	$bla_{TEM}-qnrB$	2
		$bla_{TEM}-bla_{SHV}$	1
		$bla_{TEM}-tetA$	1
		bla_{SHV}	1

*AMP – ампициллин, CFO – цефоперазон, CFP – цефепим, AZT – азтреонам, GEN – гентамицин, LEV – левофлоксацин, CIP – ципрофлоксацин, CHL – хлорамфеникол, TET – тетрациклин

к антибиотикам. Наибольшее их количество в расчете на 1 штамм отмечали в группах культур, изолированных

Табл. 3. Распространенность генов устойчивости к антибиотикам и мобильных генетических элементов среди штаммов *E. coli*

Ген	<i>E. coli</i> , выделенные из разных источников			Точный критерий Фишера (p-значение) между		
	1	2	3	1 и 2	1 и 3	2 и 3
	здоровые птицы, число штаммов (%)	больные птицы, число штаммов (%)	органические отходы, число штаммов (%)			
<i>bla</i> _{TEM}	5 (31,1)	20 (71,4)	17 (89,5)	0,013	<0,001	0,168
<i>bla</i> _{SHV}	0	1 (3,6)	12 (63,2)	—	—	<0,001
<i>bla</i> _{CTX-M}	0	15 (53,6)	7 (36,8)	—	—	0,373
<i>bla</i> _{CMY}	0	0	0	—	—	—
<i>bla</i> _{OXA}	0	0	0	—	—	—
<i>tetA</i>	7 (43,8)	8 (28,6)	13 (68,4)	0,340	0,182	0,016
<i>qnrA</i>	0	0	0	—	—	—
<i>qnrB</i>	1 (6,3)	6 (21,4)	4 (21,1)	0,393	0,347	1,000
<i>qnrS</i>	0	1 (3,6)	5 (26,3)	—	—	0,033
<i>qepA</i>	0	0	0	—	—	—
<i>aacC2</i>	0	8 (28,6)	4 (21,1)	—	—	0,737
<i>traJ</i>	8 (50)	15 (53,6)	15 (78,9)	1,000	0,089	0,122
<i>int1</i>	3 (18,8)	8 (28,6)	6 (31,6)	0,719	0,461	1,000

от больных кур и из органических отходов – $2,1 \pm 1,3$ и $3,3 \pm 1,0$ соответственно, тогда как культуры, изолированные от здоровых птиц, содержали $0,8 \pm 0,6$ генов резистентности на штамм (рис. 1). Среди исследованных групп культуры, полученные из органических отходов, отличались большим разнообразием профилей генов устойчивости – 12 из 15 детектированных профилей были уникальными. Распространенность *E. coli*, несущих детерминанты резистентности как к бета-лактамам, так и не бета-лактамам антибиотикам одновременно, среди культур от здоровых птиц составила 18,8 % (5 из 16), от больных птиц – 46,4 % (13 из 28), из органических отходов – и 78,9 % (15 из 19) (табл. 2). Встречаемость гена-регулятора конъюгативного переноса *traJ* была высокой во всех группах и составила соответственно 50,0 %, 53,6 % и 78,9 %. Причем *traJ* был обнаружен только среди штаммов с фенотипом МЛУ. Интегроны класса 1 с молекулярной массой от 800 п.н. до 2000 п.н. детектировали во всех трех группах.

Наиболее распространенным во всех группах был ген *fimH*, ответственный за прикрепление к уротелию посредством адгезина фимбрий 1 типа. Гены *cnf1*, *hlyA*, *stx1* не обнаружены ни в одной из групп. Ген микроцина V (*mccV*), маркирующий плазмиду вирулентности

ColV, встречался только у одного штамма от кур с колибактериозом и трех культур из органических отходов на основе помета (табл. 4).

Культуры, полученные от птиц с признаками колибактериоза, были потенциально более вирулентными, поскольку содержали значительно больше генов патогенности в расчете на один штамм, чем *E. coli*, выделенные из органических отходов ($7,9 \pm 1,8$ и $4,6 \pm 1,9$, $p < 0,01$, *t*-test) или от здоровой сельскохозяйственной птицы ($7,9 \pm 1,8$ и $2,7 \pm 1,7$, $p < 0,01$, *t*-test). Во всех 3 группах были обнаружены 6 из 15 генов патогенности (рис. 2).

В целом, большинство всех проанализированных *E. coli* имели комбинации генов трех патотипов (АРЕС, ЕхРЕС, InРЕС) одновременно (54 %, или 34 из 63) (рис. 3). Среди *E. coli*, полученных от больных птиц, 75 % (21 из 28) штаммов включали хотя бы три из пяти генов (*hlyF*, *iroN*, *ompT*, *iss*, *iutA*), маркирующих патотип АРЕС, связанный с системным колибактериозом птиц. Большинство (95,2 %, или 20 из 21) АРЕС-штаммов, выделенных из органов птиц с признаками колибактериоза, содержали гены-маркеры InРЕС: *iha*, *east1*, *est1*, *eltA*. Один штамм, классифицированный как АРЕС, был найден среди *E. coli*, изолированных от здоровых птиц. Культуры с генотипом АРЕС сохранялись и в органических отходах: они были обнаружены в этой группе в 63,2 % случаев. При этом две культуры, изолированные из помета после 12 месяцев хранения, содержали только гены общей патогенности – *fimH*, *yqi*, *iroN*.

В группе *E. coli*, полученных от здоровых птиц, большинство изолятов (43,8 %, или 7 из 16) относились к филогруппе Е (рис. 4), к филогруппам А и С были отнесены по 2 культуры (12,5 %). Среди *E. coli*, выделенных из органических отходов, чаще обнаруживали штаммы филогрупп С (31,6 %, или 6 из 19) и Е (26,3 %, или 5 из 19), а среди культур от птиц с признаками колибактериоза – филогрупп В1 (28,6 %, или 8 из 28) и U (17,9 %, или 5 из 28).

Сельскохозяйственная птица служит источником устойчивых к антибиотикам и потенциально патогенных *E. coli*, которые могут циркулировать на предприятиях и попадать в окружающую среду через органические отходы. Микроорганизмы могут сохраняться как в свежем помете, так и в его компостированных продуктах в течение длительного времени и вызывать инфекции пищевого происхождения [24]. Поскольку куриный помет – экономически выгодное удобрение, необходима оценка влияния отходов птицеводческих хозяйств

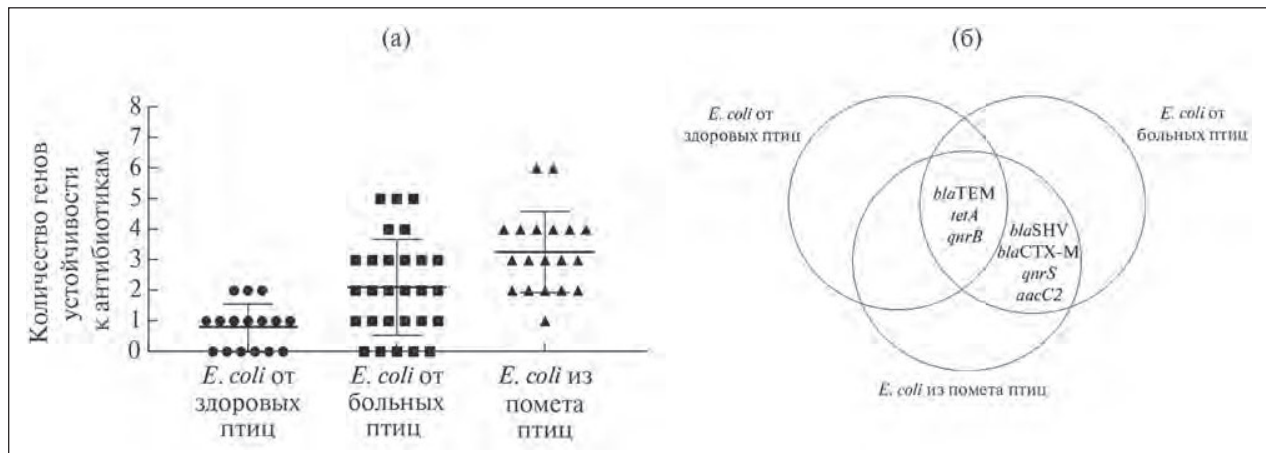


Рис. 1. Количество детектированных генов устойчивости к антибиотикам, (а) и их распределение между тремя группами *E. coli* (б).

Табл. 4. Распространенность генов, ассоциированных с вирулентностью, среди штаммов *E. coli*

Пато- группа/ патотип	Ген	<i>E. coli</i> , выделенные из разных источников			Точный критерий Фишера (<i>p</i> - значе- ние) между		
		1	2	3	1 и 2	1 и 3	2 и 3
		здо- ровые птицы, число штам- мов (%)	больные птицы, число штаммов (%)	органи- ческие отходы, число штаммов (%)			
ExPEC ¹	<i>cnf1</i>	0	0	0	—	—	—
	<i>hlyA</i>	0	0	0	—	—	—
	<i>fimH</i>	13 (81,3)	26 (92,9)	18 (94,7)	0,169	0,156	1,000
InPEC	<i>kpsMTII</i>	1 (6,3)	23 (82,1)	2 (10,5)	<0,001	1,000	<0,001
	<i>yqi</i>	2 (12,5)	0	3 (15,8)	—	1,000	—
	<i>stx1</i>	0	0	0	—	—	—
	<i>stx2</i>	2 (12,5)	0	0	—	—	—
	<i>ehxA</i>	4 (25,0)	0	0	—	—	—
	<i>east1</i>	5 (31,3)	17 (60,7)	7 (36,8)	0,071	1,000	0,142
	<i>est1</i>	0	12 (42,9)	0	—	—	—
APEC	<i>est2</i>	0	23 (82,1)	0	—	—	—
	<i>eltA</i>	3 (18,8)	4 (14,3)	0	0,692	—	—
	<i>iha</i>	0	21 (75)	1 (5,3)	—	—	—
	<i>hlyF</i>	5 (31,3)	23 (82,1)	13 (68,4)	0,001	0,044	0,312
	<i>iroN</i>	2 (12,5)	19 (67,9)	13 (68,4)	<0,001	0,002	1,000
	<i>ompT</i>	6 (37,5)	22 (78,6)	12 (63,2)	0,010	0,181	0,324
	<i>iss</i>	0	18 (64,3)	11 (57,9)	—	—	0,763
	<i>iutA</i>	0	12 (42,9)	8 (42,1)	—	—	1,000
	<i>mccV</i>	0	1 (3,6)	3 (15,8)	—	—	0,289

¹ExPEC – внекишечные патогенные *E. coli* (extraintestinal pathogenic *E. coli*), InPEC – диареогенные *E. coli* (intestinal pathogenic *E. coli*), APEC – патогенные для птиц *E. coli* (avian pathogenic *E. coli*).

на почву и человека [17]. Все перечисленное послужило поводом для проведения комплексного исследования штаммов *E. coli*, выделенных из разных источников на территории птицеводческих комплексов.

Известно, что введение противомикробных препаратов цыплятам-бройлерам для профилактики и лечения заболеваний способствует появлению и распространению устойчивых к антибиотикам энтеробактерий. В нашем исследовании обнаружена высокая доля МЛУ штаммов *E. coli* из органических отходов и органов больных птиц (73,7 % и 75 % соответственно), с высокой частотой встречались культуры, устойчивые к ампициллину, гентамицину, тетрациклину, фторхинолонам и хлорамфениколу. Подобные профили резистентности отмечают во многих странах. Так, в исследовании, проведенном Н. Blaak и соавт., в Нидерландах *E. coli* с фе-

нотипом МЛУ были обнаружены в 65 % проб, взятых на птицеводческих хозяйствах яичного направления, и в 81 % проб из хозяйств мясного направления [25]. В Бразилии Ж. М. А. Agostinho и соавт. показали, что более 70 % штаммов из органического удобрения были МЛУ, а наибольшая часть (~50 %) устойчивых штаммов выявлена в отношении тетрациклина, гентамицина, ампициллина, цефотаксима [5]. Группой А. Хехаки и соавт. у *E. coli*, выделенных от цыплят-бройлеров и кур-несушек на предприятиях Греции, также выявлены высокие показатели устойчивости к антибиотикам различных классов, в том числе к тетрациклину (~70 %), но резистентность изолятов к цефалоспорином третьего поколения оказалась несколько ниже: от 2,8 % для цефтазидима до 4,7 % для цефокситина и цефотаксима [6]. При этом тетрациклины, аминогликозиды, сульфаниламиды и пенициллины зарегистрированы для использования в птицеводстве во всех оцениваемых странах. В России у *E. coli* от домашней птицы были обнаружены более высокие, по сравнению с другими европейскими странами, уровни резистентности к критически важным противомикробным препаратам: около 30 % изолятов от кур были устойчивы к колистину, 8 % – к цефотаксиму и 88 % – к ципрофлоксацину [26].

Применение антибиотиков в ветеринарии привело к распространению плазмид, несущих гены устойчивости к антибиотикам, в том числе генов бета-лактамаз расширенного спектра (БЛРС), среди *E. coli* животного происхождения [27]. Мы обнаружили гены *bla*_{TEM}, *bla*_{SHV}, *bla*_{CTX-M}, среди которых *bla*_{CTX-M} наиболее часто встречался у *E. coli*, выделенных от больных птиц, *bla*_{SHV} – среди культур из органических отходов, *bla*_{TEM} был обнаружен с высокой частотой во всех трех группах. О высокой распространенности в птицеводческих хозяйствах *E. coli*, обладающих фенотипом МЛУ и продуцирующих БЛРС SHV-типа (93,94 %), сообщали Nossair и соавт. [28]. Взаимосвязь присутствия генов эффлюксных помп *tetA* и *tetB* с устойчивостью к тетрациклину у представителей семейства *Enterobacteriaceae* хорошо описана [29]. Действительно, мы обнаружили, что большинство тетрациклин-устойчивых штаммов из всех источников содержали *tetA*. Гены, кодирующие белки защиты ДНК-гиразы (*qnrA*, *qnrB*, *qnrS*, *qepA*), играют важную роль в распространении плазмид резистентности, но не обеспечивают клинически значимый уровень устойчивости к фторхинолонам [30]. В нашем исследовании только у 17,5 % и 9,5 % устойчивых к фторхинолонам *E. coli* были детектированы соответственно *qnrB* и *qnrS*.

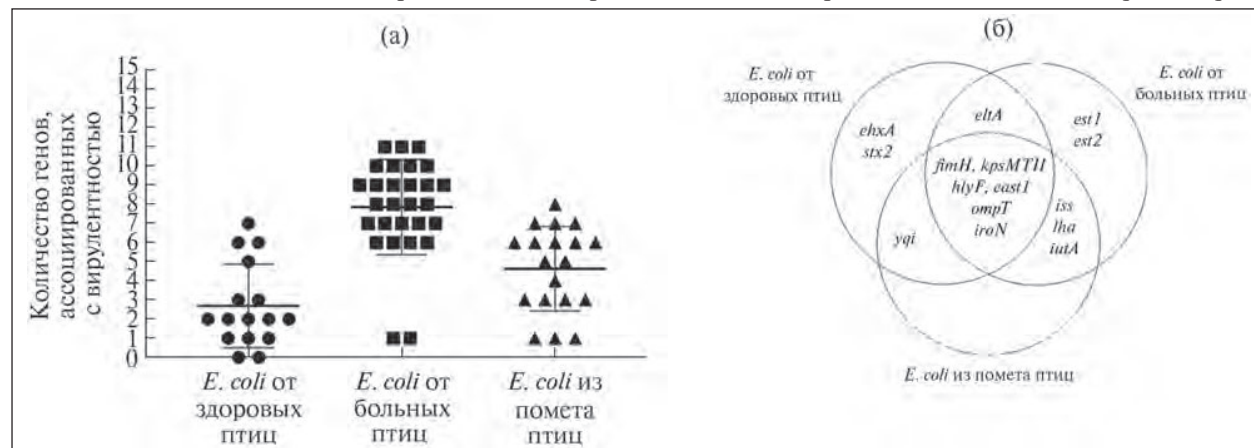


Рис. 2. Количество детектированных генов, ассоциированных с вирулентностью (а) и их распределение между тремя группами *E. coli* (б).

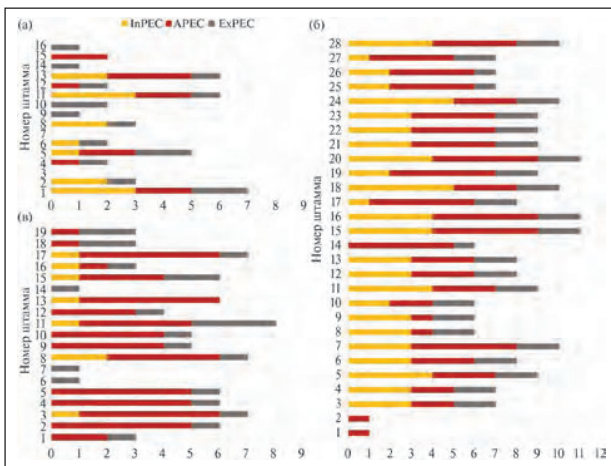


Рис. 3. Распределение генов, ассоциированных с патотипами InPEC, ExPEC и APEC, в штаммах *E. coli*, выделенных от здоровых птиц (а), птиц с признаками колибактериоза (б), из органических отходов (в). Число по оси абсцисс отражает количество детектированных генов.

Тем не менее широкое распространение плазмид-опосредованных генов устойчивости к антибиотикам может обеспечивать быстрый генетический обмен между *E. coli* в условиях птицеводческих предприятий и окружающей среды, а также формирование множественной лекарственной устойчивости под давлением отбора.

Кроме генов антибиотикостойчивости *E. coli* животного происхождения часто содержат гены патогенности [11]. Культуры патотипа APEC вызывают системный колибактериоз птиц. Некоторые авторы сообщают о том, что APEC тесно связаны с ExPEC человека, что указывает на их высокий зоонозный потенциал [8, 9, 14]. Минимальный набор генов для идентификации APEC был предложен Т. Johnson и соавт. и включал *hlyF* (птичий гемолизин), *ompT* (протеаза наружной мембраны), *iutA* (рецептор аэробактина), *iss* (фактор выживаемости в сыворотке), *iroN* (рецептор сальмохелина) [22]. Эти гены также часто обнаруживают в штаммах *E. coli*, вызывающих инфекции мочевыводящих путей [31], они были зарегистрированы на конъюгативной плазмиде *E. coli*, выделенных от пациентов с сепсисом [32]. Кроме того, получены экспериментальные доказательства способности APEC вызывать заболевания у животных при моделировании инфекций человека [33], что подтверждает их зоонозный риск. В нашем исследовании среди *E. coli*, полученных от больных птиц, 75 % включали

хотя бы три из пяти упомянутых генов. Важно отметить, что APEC-культуры были обнаружены в 63,2 % штаммов из органических отходов. Аналогичные данные представлены в других работах [5], среди 30 штаммов *E. coli*, выделенных из удобрения на основе куриного помета, были обнаружены гены, характерные для APEC-культур, причем *hlyF* и *ompT* в разных комбинациях встречались у 70,2 % *E. coli*. Исследования L. Mageiros и соавт. показали, что штаммы патотипа APEC возникают из комменсальных бактерий, в том числе в результате горизонтального переноса генов, кодирующих факторы патогенности [34]. Присутствие плазмид вирулентности ColV и ColBM, несущих маркеры *hlyF* и *ompT*, позволяет классифицировать изолят как клон высокого риска APEC [15], однако отсутствие этих маркеров не исключает, что изолят вирулентен, так как в развитии колибактериоза вовлечены разнообразные факторы патогенности. Наиболее значимы белки-аутопереносчики, белок резистентности к сыворотке (*Iss*) и «птичий» адгезин 1 (*Yqi*), что определяет множество проявлений инфекций птиц, возникающих в результате экспрессии различных комбинаций детерминант вирулентности. Необходимо отметить, что большинство проанализированных APEC-культур дополнительно несли детерминанты, характерные для различных патотипов ExPEC и InPEC. Известно, что ExPEC преимущественно относится к филогруппе B2 [23]. В нашем исследовании штаммы, выделенные из разных источников, различались по принадлежности к филогруппе: большинство *E. coli* от больных птиц относились к B1, из органических отходов – к C и E, от здоровых птиц – к E. Важно отметить, что наиболее часто встречались *E. coli* филогруппы B1 и особенно E. Согласно результатам недавних исследований, представители упомянутых филогрупп распространены среди энтерогеоморфических *E. coli* [35].

Многофакторный сравнительный анализ изолятов *E. coli* трех групп (домашней птицы, пищевых продуктов и пациентов с инфекциями мочевыводящих путей) показал их сходство в отношении устойчивости к антибиотикам, тогда как генетические профили вирулентности были более разнообразными [36]. Интересно, что в исследовании S. E. Rezatofighi и соавт. профили резистентности и патогенности штаммов APEC и *E. coli* из фекалий здоровых птиц не коррелировали между собой (менее патогенные штаммы от здоровых птиц оказались более резистентными), что отражает различные эволюционные пути приобретения устойчивости у патогенных и непатогенных *E. coli* [37]. В нашем исследовании показано, что *E. coli*, несущие гены антибиотикорезистентности

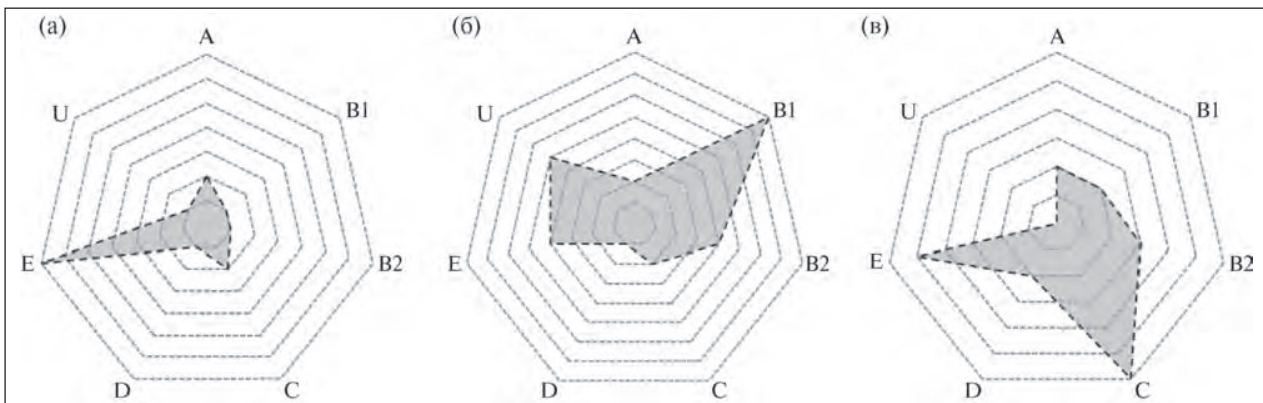


Рис. 4. Радар-плоты, отражающие количество штаммов *E. coli* разных филогрупп, выделенных от здоровых птиц (а), птиц с признаками колибактериоза (б), из органических отходов (в).

и патогенности, сохраняются в органических отходах, а здоровая и больная сельскохозяйственная птица может быть источником таких штаммов – это подтверждает необходимость микробиологического контроля отходов агропромышленного комплекса.

Выводы. Сельскохозяйственная птица может быть носителем возбудителей бактериальных и вирусных инфекций человека. Обозначенную проблему следует рассматривать не только как медицинскую или ветеринарную, но и как экологическую, поскольку контаминация почвы продуктами птицеводческих комплексов – одно из наиболее распространенных нарушений ее биоценоза. В нашем исследовании впервые сравниваются биологические свойства штаммов трех субпопуляций *E. coli*, выделенных из разных источников (здоровой птицы, птицы с колибактериозом и органических отходов на основе куриного помета) в европейской части России (Пермский край). Во всех группах выявлены мультирезистентные *E. coli*. В штаммах были широко распространены гены патогенности, характерные для представителей патотипов ExPEC и InPEC, что указывает на их высокий зоонозный потенциал. АРЕС-культуры встречались с высокой частотой в группе больных птиц, были обнаружены в группе здоровых и сохранялись в органических отходах. Заслуживает особого внимания высокая распространенность представителей *E. coli*, относящихся к клонам АРЕС высокого риска. Результаты исследования свидетельствуют о возможности интродукции условно-патогенных и патогенных антибиотикоустойчивых штаммов бактерий в окружающую среду через отходы животного происхождения, что увеличивает «резервуар сопротивления и патогенности», существующий в микробиоме природных биотопов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств РНФ, грант № 24-24-20048 Пермский край, <https://rscf.ru/en/project/24-24-20048>. 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.

- Hedman H. D., Vasco K. A., Zhang L. A. Review of antimicrobial resistance in poultry farming within low-resource settings // *Animals*. 2020. Vol. 10. Article 1264. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/10/8/1264> (дата обращения: 01.04.2024). doi: 10.3390/ani10081264.
- Влияние антибиотиков, используемых в животноводстве, на распространение лекарственной устойчивости бактерий (обзор) / И. С. Сазыкин, Л. Е. Хмелевцова, Е. Ю. Селиверстова и др. // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2021. Т. 57. № 1. С. 24–35.
- Use of antibiotics in broiler production: Global impacts and alternatives / Y. Mehdi, M. P. Létourneau-Montminy, M. L. Gaucher, et al. // *Animal nutrition*. 2018. Vol. 4. No. 2. P. 170–178. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30140756/> (дата обращения: 01.04.2024). doi: 10.1016/j.aninu.2018.03.002.
- Щепеткина С. В. Антибиотики в птицеводстве: запретить нельзя нормировать // *Эффективное животноводство*. 2019. № 4. С. 85–87.
- Antibiotic resistance and virulence factors among *Escherichia coli* isolates from avian organic fertilizer / J. M. A. Agostinho, M. V. Cardozo, M. M. Borzi, et al. // *Ciência Rural*. 2020. Vol. 50. No. 2. Article e20180849. URL: <https://www.scielo.br/j/cr/a/GdwZcDsCbBKhXhhQ4VLRhSz/?lang=en> (дата обращения: 01.04.2024). doi: 10.1590/0103-8478cr20180849.
- Prevalence of antibiotic resistant *Escherichia coli* strains isolated from farmed broilers and hens in Greece, based on phenotypic and molecular analyses / A. Xexaki, D. K. Papadopoulos, M. V. Alvanou, et al. // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Article 9421. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/12/9421> (дата обращения: 01.04.2024). doi.org/10.3390/su15129421.
- Antibiotic use in agriculture and its consequential resistance in environmental sources: potential public health implications / C. Manyi-Loh, S. Mamphweli, E. Meyer, et al. // *Molecules*. 2018. Vol. 23. No. 4. Article 795. URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/23/4/795> (дата обращения: 01.04.2024). doi: 10.3390/molecules23040795.
- Escherichia coli* from animal reservoirs as a potential source of human extraintestinal pathogenic *E. coli* / L. Bélanger, A. Garenaux, J. Harel, et al. // *FEMS immunology and medical microbiology*. 2011. Vol. 62. No. 1. P. 1–10. URL: <https://academic.oup.com/femspd/article/62/1/1/519216?login=false> (дата обращения: 14.04.2024). doi: 10.1111/j.1574-695X.2011.00797.x.
- Evaluation of *Escherichia coli* isolates from healthy chickens to determine their potential risk to poultry and human health / Z. R. Stromberg, J. R. Johnson, J. M. Fairbrother, et al. // *PLoS One*. 2017. Vol. 3. No. 12. Article e0180599. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0180599> (дата обращения: 14.04.2024). doi: 10.1371/journal.pone.0180599.
- Zoonotic approach to Shiga toxin-producing *Escherichia coli*: integrated analysis of virulence and antimicrobial resistance in ruminants and humans / B. Oporto, M. Oejo, M. Alkorta, et al. // *Epidemiology and infection*. 2019. Vol. 147. Article e164. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31063106/> (дата обращения: 14.04.2024). doi: 10.1017/S0950268819000566.
- Distribution of pathogenicity island (PAI) markers and phylogenetic groups in diarrheagenic and commensal *Escherichia coli* from young children / G. Naderi, F. Haghi, H. Zeighami, et al. // *Gastroenterology and hepatology from bed to bench*. 2016. Vol. 9. No. 4. P. 316–324.
- Kaper B., Nataro J. P., Mobley H. L. Pathogenic *Escherichia coli* // *Nature reviews. Microbiology*. 2004. Vol. 2. No. 2. P. 123–140. URL: <https://www.nature.com/articles/nrmicro818> (дата обращения: 14.04.2024). doi: 10.1038/nrmicro818.
- Manges A. R., Johnson J. R., Food-borne origins of *Escherichia coli* causing extraintestinal infections // *Clinical infectious diseases: an official publication of the Infectious Diseases Society of America*. 2012. Vol. 55. No. 5. P. 712–719. URL: <https://academic.oup.com/cid/article-abstract/55/5/712/351325?redirectedFrom=full-text> (дата обращения: 14.04.2024). doi: 10.1093/cid/cis502.
- Mellata M. Human and avian extraintestinal pathogenic *Escherichia coli*: infections, zoonotic risks, and antibiotic resistance trends // *Foodborne pathogens and disease*. 2013. Vol. 10. No. 11. P. 916–932. URL: <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/fpd.2013.1533> (дата обращения: 17.04.2024). doi: 10.1089/fpd.2013.1533.

15. Refining the definition of the avian pathogenic *Escherichia coli* (APEC) pathotype through inclusion of high-risk clonal groups / T. J. Johnson, E. A. Miller, C. Flores-Figueroa, et al. // *Poultry Science*. 2022. Vol. 101. No. 10. Article 102009. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579122003005?via%3Dihub> (дата обращения: 17.04.2024). doi: 10.1016/j.psj.2022.102009.
16. Diversity of hybrid- and hetero-pathogenic *Escherichia coli* and their potential implication in more severe diseases / A. C. M. Santos, F. F. Santos, R. M. Silva, et al. // *Frontiers in cellular and infection microbiology*. 2020. Vol. 10. Article 339. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/cellular-and-infection-microbiology/articles/10.3389/fcimb.2020.00339/full> (дата обращения: 17.04.2024). doi: 10.3389/fcimb.2020.00339.
17. Intensive poultry farming: A review of the impact on the environment and human health / G. Gržinić, A. Piotrowicz-Cieślak, A. Klimkowicz-Pawlas, et al. // *The Science of the total environment*. 2023. Vol. 1. Article 160014. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722071145?via%3Dihub> (дата обращения: 17.04.2024). doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160014.
18. *Escherichia coli* isolated from cases of colibacillosis in Russian poultry farms (Perm Krai): Sensitivity to antibiotics and bacteriocins / M. V. Kuznetsova, J. S. Gizatulina, L. Y. Nesterova, et al. // *Microorganisms*. 2020. Vol. 8. No. 5. Article 741. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2607/8/5/741> (дата обращения: 17.04.2024). doi: 10.3390/microorganisms8050741.
19. Bacteriocin-producing *Escherichia coli* isolated from the gastrointestinal tract of farm animals: prevalence, molecular characterization and potential for application / M. V. Kuznetsova, V. S. Mihailovskaya, N. B. Remezovskaya, et al. // *Microorganisms*. 2022. Vol. 10. Article 1558. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2607/10/8/1558> (дата обращения: 17.04.2024). doi: 10.3390/microorganisms10081558.
20. Multidrug-resistant, extensively drug-resistant and pandrug-resistant bacteria: an international expert proposal for interim standard definitions for acquired resistance / A. P. Magiorakos, A. Srinivasan, R. B. Carey, et al. // *Clin. Microbiol. Infect.* 2012. Vol. 18. P. 268–281. doi: 10.1111/j.1469-0691.2011.03570.x.
21. Mihailovskaya V. S., Starčič Erjavec M., Kuznetsova M. V. *Escherichia coli* from healthy farm animals: antimicrobial resistance, resistance genes and mobile genetic elements // *Acta Veterinaria Hungarica*. 2024. Vol. 72. No. 4. P. 225–234. URL: <https://akjournals.com/view/journals/004/72/4/article-p225.xml> (дата обращения: 17.04.2024). doi: 10.1556/004.2024.01102.
22. Comparison of extraintestinal pathogenic *Escherichia coli* strains from human and avian sources reveals a mixed subset representing potential zoonotic pathogens / T. J. Johnson, Y. Wannemuehler, S. J. Johnson, et al. // *Applied and environmental microbiology*. 2008. Vol. 74. No. 22. P. 7043–7050. doi: 10.1128/AEM.01395-08.
23. The Clermont *Escherichia coli* phylo-typing method revisited: improvement of specificity and detection of new phylo-groups / O. Clermont, J. K. Christenson, E. Denamur, et al. // *Environmental microbiology reports*. 2013. Vol. 5. No. 1. P. 58–65. doi: 10.1111/1758-2229.12019.
24. Olaimat A. N., Holley R. A. Factors influencing the microbial safety of fresh produce: a review // *Food Microbiology*. 2012. Vol. 32. No. 1. P. 1–19. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0740002012000986?via%3Dihub> (дата обращения: 17.04.2024). doi: 10.1016/j.fm.2012.04.016.
25. Distribution, numbers, and diversity of ESBL-producing *E. coli* in the poultry farm environment / H. Blaak, A. H. van Hoek, R. A. Hamidjaja, et al. // *PLoS One*. 2015. Vol. 10. No. 8. Article e0135402. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0135402> (дата обращения: 20.04.2024). doi: 10.1371/journal.pone.0135402.
26. Antimicrobial resistance of commensal *Escherichia coli* from food-producing animals in Russia / D. A. Makarov, O. E. Ivanova, S. Y. Karabanov, et al. // *Veterinary world*. 2020. Vol. 13. No. 10. P. 2053–2061. doi: 10.14202/vetworld.2020.2053-2061.
27. Szmolka A., Nagy B. Multidrug resistant commensal *Escherichia coli* in animals and its impact for public health, *Frontiers in microbiology*, 2013, vol. 4, Article 258. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2013.00258/full> (дата обращения: 20.04.2024). doi: 10.3389/fmicb.2013.00258.
28. Prevalence and molecular characterization of extended-spectrum β -lactamases and AmpC β -lactamase-producing *Enterobacteriaceae* among human, cattle, and poultry / M. A. Nossair, F. A. Abd El Baqy, M. S. Y. Rizk, et al. // *Pathogens*. 2022. Vol. 11. No. 8. Article 852. URL: <https://www.mdpi.com/2076-0817/11/8/852> (дата обращения: 20.04.2024). doi: 10.3390/pathogens11080852.
29. Davin-Regli A., Pages J.-M., Ferrand A. Clinical status of efflux resistance mechanisms in gram-negative bacteria // *Antibiotics*. 2021. Vol. 10. Article 1117. URL: <https://www.mdpi.com/2079-6382/10/9/1117> (дата обращения: 20.04.2024). doi.org/10.3390/antibiotics10091117.
30. Plasmid-mediated quinolone resistance: a multifaceted threat / J. Strahilevitz, G. A. Jacoby, D. C. Hooper, et al. // *Clinical microbiology reviews*. 2009. Vol. 22. No. 4. P. 664–689. doi: 10.1128/CMR.00016-09.
31. Характеристика вирулентных штаммов *Escherichia coli*, выделенных от пациентов с урологической инфекцией / П. В. Слукин, Е. И. Асташкин, Е. М. Асланян и др. // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2021. Т. 98. № 6. С. 671–684. doi: 10.36233/0372-9311-134.
32. Molecular screening of virulence genes in extraintestinal pathogenic *Escherichia coli* isolated from human blood culture in Brazil / V. L. Koga, G. Tomazetto, P. S. Cyويا, et al. // *BioMed Research International*. 2014. Article 465054. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2014/465054> (дата обращения: 20.04.2024). doi: 10.1155/2014/465054.
33. Avian-pathogenic *Escherichia coli* strains are similar to neonatal meningitis *E. coli* strains and are able to cause meningitis in the rat model of human disease / K. A. Tivendale, C. M. Logue, S. Kariyawasam, et al. // *Infection and Immunity*. 2010. Vol. 78. P. 3412–3419. doi: 10.1128/IAI.00347-10.
34. Genome evolution and the emergence of pathogenicity in avian *Escherichia coli* / L. Mageiros, G. Méric, S. C. Bayliss, et al. // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. No. 1. Article 765. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-20988-w> (дата обращения: 20.04.2024). doi: 10.1038/s41467-021-20988-w.
35. Phylogenetic group and virulence profile classification in *Escherichia coli* from distinct isolation sources in

- Mexico / J. R. Aguirre-Sánchez, J. B. Valdez-Torres, N. C. Del Campo, et al. // *Infection, genetics and evolution*. 2022. Vol. 106. Article 105380. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1567134822001770?via%3Dihub> (дата обращения: 20.04.2024). doi: 10.1016/j.meegid.2022.105380.
36. Comparative characteristics and pathogenic potential of *Escherichia coli* isolates originating from poultry farms, retail meat, and human urinary tract infection / J. Sarowska, T. Olszak, A. Jama-Kmiecik, et al. // *Life*. 2022. Vol. 12. No. 6. Article 845. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1729/12/6/845> (дата обращения: 20.04.2024). doi: 10.3390/life12060845.
37. An integrated perspective on virulence-associated genes (VAGs), antimicrobial resistance (AMR), and phylogenetic clusters of pathogenic and non-pathogenic avian *Escherichia coli* / S. E. Rezatofighi, A. Najafifar, M. Askari Badouei, et al. // *Frontiers Veterinary Science*. 2021. Vol. 24. No. 8. Article 758124. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/veterinary-science/articles/10.3389/fvets.2021.758124/full> (дата обращения: 20.04.2024). doi: 10.3389/fvets.2021.758124.

Поступила в редакцию 10.08.2024

После доработки 30.10.2024

Принята к публикации 21.01.2025

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ВАРИАЦИЯ УРОВНЯ КОРТИЗОЛА В МОЛОКЕ ДОМАШНИХ КОЗ В ЕСТЕСТВЕННОЙ СРЕДЕ ОБИТАНИЯ

© 2025 г. А. К. Пискунов¹, кандидат биологических наук, Н. Ю. Саушкин², кандидат химических наук, Ж. В. Самсонова^{1,2}, кандидат химических наук

¹Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова Российской академии наук, 119991, Москва, ул. Губкина, 3

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 11Б
E-mail: sushk_90@mail.ru

Исследования проводили с целью определения диапазона изменений концентрации гормона кортизола в молоке свободно-живущих в природной среде домашних коз (*Capra hircus*) и оценки потенциального влияния индивидуальных и средовых факторов на физиологический уровень гормона. Материалом для исследования служили образцы молока пяти коз, отобранные во время утренней и вечерней дойки в течение 10-недельного мониторинга (с августа по октябрь). Всего было собрано 416 образцов молока, аликвоты которых наносили на целлюлозную мембрану, высушивали и перевозили в лабораторию для проведения количественного иммуноферментного анализа (ИФА). Концентрация кортизола в молоке достигала уровня до 76...116 нмоль/л. При этом наблюдаемая внутрииндивидуальная вариация гормона в молоке была значительно выше (53 %), чем межиндивидуальная (26 %). Отмечено резкое повышение концентрации кортизола (до 330...460 нмоль/л) в молоке болеющего животного за несколько дней перед летальным исходом. В ходе анализа данных не выявлено значимых корреляций уровня кортизола с возрастом животного, объемом выдоенного молока за одну дойку, временем дойки и временем ожидания дойки. Однако достоверно более низкие уровни гормона отмечали у первого в очереди на дойку животного, по сравнению со вторым, а достоверно самые высокие – у второго, по сравнению со всеми остальными особями. Вследствие этого выдвинуто предположение о том, что определяющее влияние на уровень кортизола в молоке домашних коз могут иметь текущие психоэмоциональные реакции, связанные с социальным взаимодействием – как внутри вида, так и с человеком. Они могут вносить больший вклад в вариацию уровня гормона, чем циркадные ритмы, возраст и наполненность молочной железы.

BIOLOGICAL VARIATION OF CORTISOL LEVEL IN MILK OF DOMESTIC GOATS IN NATURAL HABITAT

A. K. Piskunov¹, N. Yu. Saushkin², J. V. Samsonova^{1,2}

¹Vavilov Institute of General Genetics of the Russian Academy of Sciences, 119991, Moskva, ul. Gubkina, 3

²Lomonosov Moscow State University, 119991, Moskva, Leninskie gory, 1, str. 11B
E-mail: sushk_90@mail.ru

The purpose of the study was to determine the milk cortisol range of free-living domestic goats (*Capra hircus*) and to assess the potential influence of individual and environmental factors on the physiological level of the hormone. Milk samples from five goats were collected during morning and evening milking during a 10-week monitoring period (from August to October). 416 milk samples were collected and aliquots were applied onto a cellulose membrane, dried, and transported to the laboratory for quantitative enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). The milk cortisol concentration reached 76...116 nmol/L. Moreover, the observed intra-individual variation of the milk hormone was significantly higher (53 %) than the inter-individual variation (26 %). A significant increase of milk cortisol (up to 330...460 nmol/L) was found for a sick animal several days before death. During the data analysis, there were no significant correlations between the cortisol level and the age of the animal, the milk volume milked per one milking, the time of milking and the time of waiting for milking. However, significantly lower levels of the hormone were observed for the first animal in line for milking compared to the second, and significantly higher levels were observed for the second animal compared to all others. It is therefore assumed that the current psychoemotional reactions associated with social interaction – both within the species and with humans – may have a determining effect on the milk cortisol level of domestic goats. They may make a greater contribution to the variation of the hormone level than circadian rhythms and age, fullness of the mammary gland.

Ключевые слова: кортизол, домашние козы, ИФА, молоко, стресс.

Keywords: cortisol, domestic goats, ELISA, milk, stress.

Глюкокортикоиды (ГК) играют многогранную и важную роль в регуляции практически всех физиологических процессов. Они способны напрямую влиять на транскрипцию генов, связываясь с ядерными рецепторами непосредственно на молекулах ДНК. Их часто называют стрессорными гормонами, поскольку у позвоночных животных ГК обеспечивают адаптацию к изменениям внешней или внутренней среды путем координации метаболических, иммунных и поведенческих

реакций [1]. Таким образом, изучение ГК представляет интерес как для физиологии, так и для более прикладных областей, например медицины и ветеринарии. В частности, ГК могут быть использованы как биомаркеры адаптивной реакции организма на изменение условий среды или гомеостаза [1]. Кортизол и другие ГК – химически стабильные аналиты, методы их определения отличаются простотой и высокой аналитической точностью [2, 3]. Однако интерпретация измеряемых *in vivo*

концентраций кортизола довольно затруднительна, поскольку индивидуальный уровень гормона складывается под влиянием многих факторов, среди которых могут быть пол и возраст [4, 5], время года [6], наличие острых и хронических стрессоров [7, 8, 9], воспалительных процессов [10, 11] и др. [12]. Например, существенные изменения в уровне кортизола у животных может вызывать реакция на отбор крови, а также на другие ветеринарные манипуляции [2, 3].

Обычными матрицами для анализа кортизола или его метаболитов служат кровь, слюна, моча и фекалии. В этих биологических материалах измеренные уровни кортизола представляют собой концентрацию гормона в определенный момент времени или усредненный уровень за 1...2 дня [2, 5]. Более предпочтительным для мониторинга кортизола может стать использование альтернативных неинвазивных методов отбора проб (молока, шерсти) [5, 13, 14]. Однако это требует уточнения ряда методических аспектов. Кортизол может быть использован как биомаркер адаптивной реакции организма на изменение условий среды или гомеостаза животных, что позволяет контролировать стресс и благополучие животных [15, 16, 17].

Цель исследований – определение пределов изменения концентрации гормона кортизола в молоке свободноживущих в природной среде обитания домашних коз и изучение потенциального влияния индивидуальных и средовых факторов на физиологический уровень этого гормона в молоке для оценки возможности применения молока как удобной неинвазивной матрицы при исследовании факторов, влияющих на благополучие животных (условия содержания, манипуляции с животными и др.).

Методика. Образцы молока отбирали от лактирующих домашних коз (*Capra hircus*), принадлежащих к свободноживущей в природных условиях популяции, созданной и поддерживаемой на опытной биологической станции «Шаховская» ИОГен РАН. Эта популяция используется в рамках экспериментальной парадигмы изучения поведения и других сложных явлений, полноценная реализация которых происходит в естественной среде. Животные сохраняют контакт с человеком, приучены к ветеринарным манипуляциям. Образцы собирали во время ручной дойки, на которую козы приходят самостоятельно.

Отбор проб осуществляли во время утренней и вечерней дойки у пяти животных в течение 10 недель в период с августа по октябрь. Молоко отбирали, фиксируя дату, время дня, очередность животного, время, проведенное животным в ожидании, и время, затраченное на дойку. Кроме того, отмечали нетипичные обстоятельства, например, наличие видимого воспалительного процесса. Непосредственно после дойки на целлюлозную фильтровальную бумагу (TE46, Hoefler Scientific Instruments, США) наносили аликвоты проб молока (по 20 мкл) и высушивали при комнатной температуре. Полученные образцы в виде сухих пятен молока на листах фильтровальной бумаги хранили в плотно закрытом пластиковом пакете с осушителем при температуре +4°C. Всего было собрано и проанализировано 416 образцов. Отбор проб осуществлял один человек на протяжении всего эксперимента, за исключением трех непоследовательных дней, в которые было получено 24 образца. Для проведения анализа пробы перевозили в лабораторию, расположенную на расстоянии 150 км от места их отбора.

Для измерения кортизола в молоке использовали диагностический набор «ИФА-кортизол» (Иммунотех, Россия). Для проведения анализа на том же целлюлозном носителе аналогично образцам молока

были приготовлены сухие пятна стандартных растворов (0...1200 нмоль/л) и контрольный образец из ИФА-набора. Содержание кортизола определяли в соответствии с инструкцией к набору с некоторыми изменениями. Для анализа использовали выбитые дыроколом диски целлюлозной бумаги диаметром 0,5 см с высушенным стандартом/образцом. Бумажные диски помещали в лунки ИФА планшета и предварительно смачивали 20 мкл дистиллированной воды. Затем в каждую лунку добавляли 100 мкл конъюгата (кортизол-фермент). Планшет инкубировали в течение 15 мин с постоянным перемешиванием при 37 °C для пропитки дисков раствором, а затем еще 1 ч при тех же условиях. Все остальные процедуры выполняли в соответствии с инструкцией к набору.

Результаты анализа обрабатывали методами описательной статистики (с применением t-критерия Стьюдента) и корреляционного анализа по методу Пирсона с использованием программы SPSS Statistics v. 26 (IBM, США). Оценивали диапазон наблюдаемых концентраций кортизола для каждого животного, а также взаимосвязь его физиологического уровня в молоке с индивидуальными (возраст, объем выдоенного молока за одну дойку) и средовыми (время дня, время ожидания дойки, дневная и ночная температуры) факторами, а также очередности подхода на дойку, которую исследуемые животные определяли самостоятельно.

Результаты и обсуждение. Содержание кортизола в молоке коз в большинстве случаев не превышало 100 нмоль/л (рис. 1). Коэффициент индивидуальной вариации величины этого показателя составил 53 %, межиндивидуальной – 26 %. Как было показано ранее при исследовании растущих козлят, с возрастом средний выявленный уровень кортизола повышается [4]. В нашем исследовании принимали участие козы возрастом от двух до девяти лет и прямой зависимости между возрастом и уровнем кортизола в молоке не установлено (табл. 1). Например, для трехлетней и девятилетней особи предельные значения кортизола находились на одном уровне и превышали 100 нмоль/л, при этом медианные значения также были близки (32 и 21 нмоль/л соответственно). Кроме того, не отмечено явной тенденции к увеличению либо к уменьшению средних значений и медианы концентраций кортизола в выборке при увеличении возраста особи (табл. 1). При этом в ходе анализа образцов молока был обнаружен факт резкого повышения уровня кортизола (до 330...460 нмоль/л) для болеющего животного за несколько дней перед наступлением летального исхода.

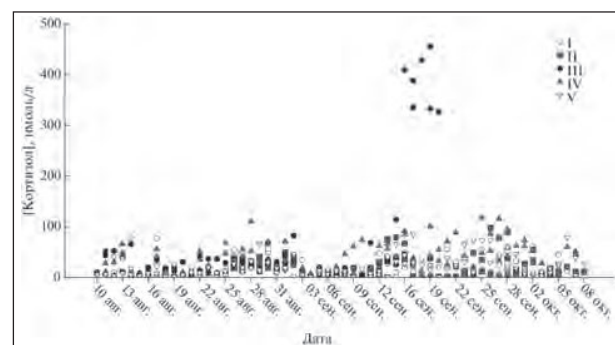


Рис. 1. Изменение содержания кортизола в молоке пяти домашних коз в течение 10 недель (различные символы обозначают разных животных).

Табл. 1. Статистические показатели уровня кортизола в молоке для каждого из пяти животных и итоговые для всей выборки*

Код	Возраст	N	M	Медиана	SEM	SD	Асимметрия	Экцесс	Диапазон	5 %	95 %
I	4	92	20	13	2	18	1,3	1,2	76	2	56
II	7	63	25	18	3	23	1,5	1,9	95	2	78
III	9	61	26	21	3	22	1,6	3,8	113	2	68
IV	3	106	36	32	3	28	0,9	0,2	116	4	93
V	2	94	23	16	2	20	1,3	1,1	84	2	72
Все		416	26	18	1	23	1,4	1,7	116	2	73

*N – количество образцов в выборке, M – среднее значение, SD – стандартное отклонение, SEM – стандартная ошибка среднего.

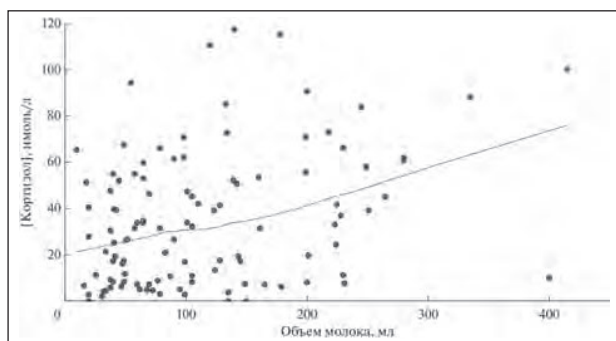
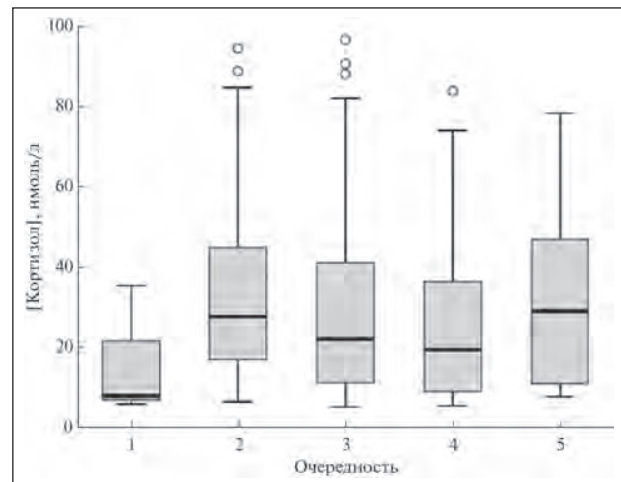
По результатам расчета коэффициентов корреляции Пирсона между объемом молока, сдоенного за одну дойку (утром или вечером), и наблюдаемой в нем концентрацией кортизола (табл. 2) значимая связь была обнаружена только у животного IV ($p < 0,01$). Соответствующие значения для этой особи отображены на диаграмме, на которую также была помещена аппроксимирующая линия (рис. 2). Как видно из диаграммы, по мере увеличения объема молока возрастает содержание в нем кортизола, причем эта закономерность становится несколько более выраженной с ростом объема. Возможно, что такая зависимость, которая не наблюдается в группе в целом, может носить индивидуальный характер. Для ответа на вопрос о существовании какой-либо закономерности необходимо провести исследования на большем числе особей и в течение более продолжительного временного промежутка.

Табл. 2. Коэффициенты корреляции между концентрацией определяемого кортизола и объемом сдоенного молока за одну дойку, рассчитанные для каждого животного

Животное	r	p
I	0,13	0,20
II	-0,13	0,33
III	-0,22	0,09
IV	0,33*	0,01
V	0,15	0,15

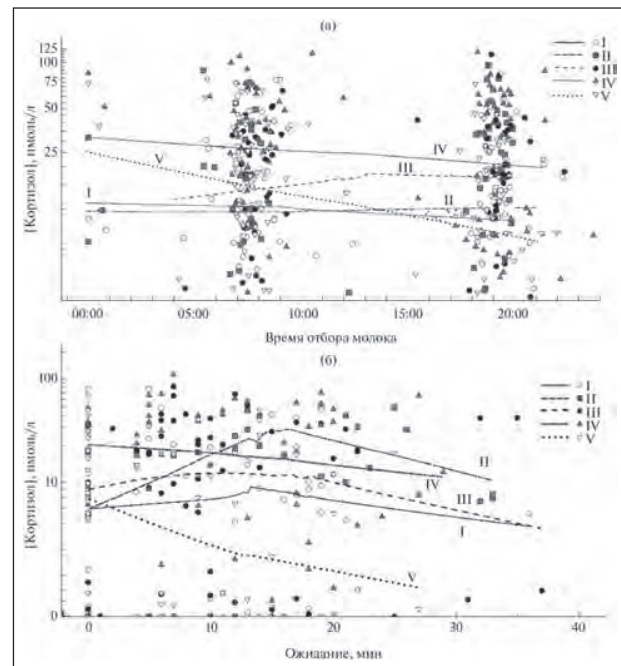
*корреляция достоверна при $p < 0,01$.

Также был проанализирован уровень кортизола в молоке в зависимости от очередности доения, которая определялась самими животными. Достоверно более низкие уровни гормона отмечали у первого в очереди животного, по сравнению со вторым, а достоверно наиболее высокие – у второй особи, по сравнению со всеми остальными (рис. 3). У последнего (5-го) в очереди на дойку животного также отмечали высокий средний уровень гормона в выдоенном молоке, однако различия со 2-м, 3-м и 4-м животным в очереди были недостоверными согласно выбранному уровню значимости t-критерия (рис. 3). Вероятнее всего, гормон равномерно поступает в молоко

**Рис. 2. Зависимость концентрации определяемого кортизола от объема сдоенного за одну дойку молока у животного IV.****Рис. 3. Зависимость уровня кортизола в молоке от очередности дойки козы (статистически значимое различие наблюдается при переходе от 1 ко 2 особи (t -test, $p < 0,05$); горизонтальные бары обозначают медианное значение и квантили с шагом 25 %, выбросы отмечены круговыми символами).**

в ходе его образования в альвеолах и скорость диффузии кортизола в молоко сопоставима со скоростью его образования. В то же время изменение психоэмоционального статуса, например, при определении очередности подхода на дойку, которую козы определяли самостоятельно, быстро, в течение нескольких минут, отражаются на концентрации кортизола в молоке. Это предполагает наличие альтернативного пути его поступления.

В целом, полученные данные не выявили выраженного циркадного паттерна в уровне кортизола в молоке. Содержание гормона в утренние и вечерние часы значительно не отличалось (рис. 4а), так же как оно не за-

**Рис. 4. Изменение содержания кортизола в молоке пяти домашних коз в зависимости от: а) времени дойки, б) времени ожидания дойки (различные символы и линии обозначают разных животных и соответствующие им линии аппроксимации).**

висело от времени ожидания дойки (рис. 46). Значимым предиктором уровня гормона в молоке может быть среднесуточная температура окружающей среды или сочетание дневной и ночной температуры на конкретную дату отбора образца [18]. Это может быть напрямую связано как с физиологической адаптацией животных к ее изменению, так и опосредованно, например, с двигательной активностью, уровень которой различается при разной погоде. Однако в нашем исследовании значимой корреляции между уровнем кортизола и среднесуточной температурой не установлено. Для выявления потенциальной зависимости необходимо проведение годового мониторинга, учитывающего сезонные колебания температуры и освещенности.

Выводы. Молоко можно использовать в качестве удобного неинвазивного биологического образца при исследовании различных факторов, влияющих на благополучие животных, поскольку не выявлено значимого воздействия индивидуальных и средовых факторов на физиологический уровень кортизола. По-видимому, определяющее влияние на уровень кортизола в молоке домашних коз будут оказывать текущие психоэмоциональные реакции, связанные с социальным взаимодействием как внутри вида, так и с человеком, а также наличие заболеваний. Они могут вносить больший вклад в вариацию уровня гормона, чем циркадные ритмы и возраст, а также наполненность молочной железы. Наблюдаемая внутрииндивидуальная вариация уровня кортизола в молоке была значительно выше, чем межиндивидуальная. В связи с изложенным популяционные референтные интервалы могут иметь ограниченную ценность для интерпретации значений, получаемых при анализе молока определенного животного.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-76-10053).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература.

1. Джафаров М. Х., Зайцев С. Ю., Максимов В. И. Стероиды. Строение, получение, свойства и биологическое значение, применение в медицине и ветеринарии. СПб.: Лань, 2011. 288 с.
2. Новгородова И. П. Методы определения концентрации кортизола у животных // *Аграрная наука*. 2024. Т. 4. С. 35–43. doi: 10.32634/0869-8155-2024-381-4-35-43
3. Aguiar D., Marques C., Pereira A. C. The importance of monitoring cortisol in the agri-food sector-A systematic review // *Metabolites*. 2023. Vol. 13. No. 6. Article 692. URL: <https://www.mdpi.com/2218-1989/13/6/692> (дата обращения: 21.12.2024). doi: 10.3390/metabo13060692.
4. Пушкарев Н. Н. Уровень и динамика половых гормонов у коз оренбургской породы с возрастом // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2015. Т. 2. № 52. С. 185–187.
5. Heimbürge S., Kanitz E., Otten W. The use of hair cortisol for the assessment of stress in animals // *General and Comparative Endocrinology*. 2019. Vol. 270. P. 10–17. doi: 10.1016/j.ygcen.2018.09.016.
6. Effect of seasonal stress on cortisol level of goats / S. Shukla, A. Ludri, A. Parashar et al. // *The Pharma Innovation Journal*. 2021. Vol. 10. No. 11s. P. 2654–2656.
7. Tajik J., Nazifi S., Eshtraki R. The influence of transportation stress on serum cortisol, thyroid hormones, and some serum biochemical parameters in Iranian cashmere (Raini) goat // *Veterinarski Arhiv*. 2016. Vol. 86. P. 795–804.
8. Use of goat interleukin-6, cortisol, and some biomarkers to evaluate clinical suitability of two routes of ascorbic acid administration in transportation stress / K. T. Biobaku, T. O. Omobowale, A. O. Akeem, et al. // *Veterinary World*. 2018. Vol. 11. No. 5. P. 674–680. doi: 10.14202/vet-world.2018.674-680.
9. Hydrbring-Sandberg E., von Walter L. W., Forkman B. Cortisol is not enough: A complex stress reaction in tethered goats // *Animal Welfare*. 2022. Vol. 31. No. 1. P. 91–98. doi: 10.7120/09627286.31.1.008.
10. Serum cortisol of Sahel goats following rumenotomy with assorted anaesthetics and sutures / A. M. Saidu, P. B. Bokko, A. Mohammed, et al. // *International Journal of Veterinary Science&Medicine*. 2016. Vol. 4. No. 1. P. 23–26. doi: 10.1016/j.ijvsm.2016.10.008.
11. Acute cortisol and behavior of dairy goat kids administered local anesthesia, topical anesthesia or systemic analgesia prior to cautery disbudding / M. N. Hempstead., T. M. Lindquist, J. K. Shearer, et al. // *Physiology & Behavior*. 2020. Vol. 222. Article 112942. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031938420302560> (дата обращения: 21.12.2024). doi: 10.1016/j.physbeh.2020.112942.
12. Altered stress-induced cortisol levels in goats exposed to polychlorinated biphenyls (PCB 126 and PCB 153) during fetal and postnatal development / K. E. Zimmer, A. C. Gutleb, J. L. Lyche, et al. // *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 2009. Vol. 72. No 3–4. P. 164–172. doi: 10.1080/15287390802539004.
13. Within-day variation and effect of acute stress on plasma and milk cortisol in lactating goats / G. Romero, I. Restrepo, R. Muelas, et al. // *Journal of Dairy Research*. 2015. Vol. 98. No. 2. P. 832–839. doi: 10.3168/jds.2014-8052.
14. Variation in milk cortisol during lactation in Murciano-Granadina goat / J. R. Díaz, M. Alejandro, G. Romero, et al. // *Journal of Dairy Research*. 2013. Vol. 96. No. 2. P. 897–905. doi: 10.3168/jds.2012-5614.
15. Comparison of cortisol concentrations in plasma and saliva in dairy cattle following ACTH stimulation / A. Riek, L. Schrader, F. Zerbe, et al. // *Journal of Dairy Research*. 2019. Vol. 86. No. 4. P. 406–409. doi: 10.1017/S0022029919000669.
16. Within a hair's breadth – Factors influencing hair cortisol levels in pigs and cattle / S. Heimbürge, E. Kanitz, A. Tuchscherer, et al. // *General and Comparative Endocrinology*. 2020. Vol. 288. Article 113359. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016648019304885> (дата обращения: 21.12.2024). doi: 10.1016/j.ygcen.2019.113359.
17. Cavallino L., Rincón L., Scaia M. F. Social behaviors as welfare indicators in teleost fish // *Frontiers in Veterinary Science*. 2023. Vol. 10. Article 1050510 URL: <https://www.frontiersin.org/journals/veterinary-science/articles/10.3389/fvets.2023.1050510/full> (дата обращения: 21.12.2024). doi: 10.3389/fvets.2023.1050510.
18. Serum cortisol levels in goats exhibit seasonal but not daily rhythmicity / A. Alila-Johansson, L. Eriksson, T. Soveri, et al. // *Chronobiology International*. 2003. Vol. 20. No. 1. P. 65–79. doi: 10.1081/cbi-120017684.

Поступила в редакцию 26.12.2024

После доработки 29.01.2025

Принята к публикации 23.04.2025

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

УДК 637.115:637.11

DOI 10.31857/S2500262725020106 EDN DFBRRQ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ СБОРОК ЛЕВИТИРУЮЩЕЙ
ДОИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ «КАРУСЕЛЬ»**

© 2025 г. **Я. П. Лобачевский**, доктор технических наук, академик РАН, **В. Ф. Федоренко**, доктор технических наук, академик РАН, **В. В. Кирсанов**, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, **Д. Ю. Павкин**, кандидат технических наук, **С. В. Кирсанов**, аспирант

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5
E-mail: kirvv2014@mail.ru

На молочных фермах от 1200 голов наибольшее распространение получили доильные установки типа «Карусель» на 40...90 доильных мест. Большие размеры самой установки и высокая механическая нагрузка на платформу определяют повышенный износ их колесных движителей (рельс-колесо). Поэтому актуальное значение имеет разработка левитирующей доильной платформы на постоянных магнитах. Исследование проводили с целью определения параметров магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, на основе имитационного моделирования с использованием программы Ansys Maxwell. Рассматривали три варианта магнитных сборок: с постоянными прямоугольными и цилиндрическими магнитами, а также магнитами кубической формы, собранными в виде массивов Хальбаха. Оценку общей картины распределения магнитного поля в воздушном зазоре и за его пределами, определение силовых характеристик магнитного поля, создающих эффект левитации, а также количества магнитных сборок в расчете на одно доильное место осуществляли на основе визуализированных результатов 3D-моделирования левитирующего магнитного поля между подвижными и неподвижными магнитными сборками в виде линий магнитной индукции. Средняя величина магнитной индукции в рабочем зазоре для прямоугольных магнитов ($100 \times 100 \times 30$ мм) составила 0,306 Тл, для цилиндрических магнитов (100×30 мм) – 0,233 Тл, для двойной симметричной сборки Хальбаха (5×5) из пяти магнитов кубической формы ($25 \times 25 \times 25$) – 0,539 Тл. Удельные силы отталкивания в расчете на 1 кг элементарных магнитных сборок для прямоугольных магнитов были равны 84 Н/кг, для цилиндрических – 48,7 Н/кг, для сборки Хальбаха – 314,3 Н/кг. При создании левитирующей доильной платформы предпочтительнее использовать сборки Хальбаха.

SIMULATION OF THE INTERACTION OF MAGNETIC ASSEMBLIES OF THE "KARUSEL" LEVITATING MILKING PLATFORM

Ya. P. Lobachevsky, V. F. Fedorenko, V. V. Kirsanov, D. Yu. Pavkin, S. V. Kirsanov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
109428, Moskva, 1-i Institutskii proezd, 5
E-mail: kirvv2014@mail.ru

On large dairy farms of 1,200 heads or more, milking machines of the "Karusel" type with a capacity of 40 to 90 milking places have become the most widespread. The large size of the installation itself and the high mechanical load on the platform determine the increased wear of the wheel thrusters (rail-wheel). Therefore, the development of a levitating milking platform with permanent magnets is of urgent importance. The study was conducted to determine the parameters of the magnetic field generated by permanent magnets based on simulation using the Ansys Maxwell program. Three variants of magnetic assemblies were considered: with permanent rectangular, cylindrical and cubic magnets assembled in the form of Halbach arrays. The visualized results of 3D-modeling of the levitating magnetic field between movable and stationary magnetic assemblies in the form of magnetic induction lines have been obtained, allowing us to assess the overall picture of the magnetic field distribution in the air gap and beyond, and determine its force characteristics, creating the effect of levitation, as well as the number of magnetic assemblies per milking place. The average value of magnetic induction in a working gap of the magnetic assemblies made: for rectangular magnets ($100 \times 100 \times 30$ mm) – 0,306 TL, cylindrical magnets (100×30 mm) – 0,233 TL and double symmetric Assembly of Halbach (5×5) of the five magnets cubic form ($25 \times 25 \times 25$) – 0,539 TL. Specific repulsive forces per 1 kg elementary magnetic assemblies for rectangular magnets made – 84 N/kg cylindrical – 48,7 N/kg for the Assembly of Halbach – 314,3 N/kg. It is preferable to use Halbach assemblies when creating a levitating milking platform.

Ключевые слова: доильная платформа «Карусель», моделирование, магнитная левитация, магнитная индукция, воздушный зазор, постоянные магниты, магнитные сборки, массив Хальбаха.

Keywords: milking platform "Karusel", modeling, magnetic levitation, magnetic induction, air gap, permanent magnets, magnetic assemblies, Halbach array.

На крупных фермах с численностью животных более 1200 голов рациональнее всего использовать доильные установки типа «Карусель» вместимостью от 40 до 90 доильных мест. К их достоинствам относятся высокая производительность (от 120 до 500 гол./ч), рациональная рабочая поза и малая зона обслуживания операторов, удобная логистика перемещения животных (вход и выход

с одной стороны) и др. В процессе эксплуатации могут возникать определенные сложности, связанные с большими размерами самой установки и высокой нагрузкой на движители (более 1200 кг на одно доильное место) [1], что предопределяет повышенный износ колесных движителей (рельс-колесо) и ведущих колес фрикционных передач электроприводов платформы [2].

Альтернативным вариантом колесным двигателям доильной платформы установки «Карусель» может быть ее магнитный подвес на постоянных магнитах, который применяют на некоторых высокоскоростных поездах, эксплуатируемых в Германии, Китае, Японии, США и Великобритании. В качестве системы подвеса транспортного средства в них используют электромагнитный и электродинамический подвес, а также подвес на постоянных магнитах [3]. Проанализировав перспективные способы применения магнитной левитации на транспорте, можно предложить создание магнито–левитирующей платформы для установки «Карусель», что позволит устранить ряд недостатков, связанных с изнашиванием опорных колес и рельсов платформы, снизить шум при движении, уменьшить материалоемкость платформы и трудоемкость ее монтажа и технического обслуживания. Благодаря более равномерному распределению весовой нагрузки между магнитами, по сравнению с точечной передачей усилия в системе «рельс-колесо», магнитные двигатели платформы будут практически без износными, что позволит обеспечить их высокую долговечность и срок эксплуатации, а также существенно снизить расход электроэнергии на привод платформы.

Цель исследования – провести имитационное моделирование взаимодействия магнитных сборок левитирующей доильной платформы «Карусель».

Методика. Моделирование магнитного поля постоянных магнитов осуществляли с использованием программы Ansys Maxwell [4] с целью изучения распределения магнитного поля постоянного магнита; анализа взаимодействия магнитных сборок; оптимизации формы и материала магнита.

Для решения задачи, связанной с постоянными магнитами, использовали режим Magnetostatic, включающий: препроцессирование – геометрическое построение модели, разбивку области моделирования методом конечных элементов и задание свойств материалов; определение граничных условий, решение задачи; постпроцессирование – 3D-визуализация результатов, заключающаяся в построении программой линий магнитной индукции и их распределении в воздушном зазоре между магнитными сборками и за ее пределами.

Для задания граничных условий (boundary conditions) в задачах с постоянными магнитами была выбрана подпрограмма Open Boundary, которая обеспечивает:

моделирование бесконечного пространства вокруг конструкции;

возможность реализации методов поверхностей бесконечности (Absorbing Boundary Conditions, ABC) или линейного упрощения (Balloon Boundary);

моделирование полей постоянных магнитов в свободном пространстве.

Для точного расчета магнитного поля была создана расчетная сетка, которая детализируется в областях с высокими градиентами магнитного поля (на краях магнитов). Алгоритм Ansys Maxwell предусматривает использование численных методов, например метода конечных элементов (МКЭ), для решения уравнений Максвелла [5]. Для расчета магнитного поля постоянного магнита были осуществлены следующие действия:

созданы прямоугольный параллелепипед, цилиндр или куб, представляющие различные типы магнитов; добавлен окружающий его объем (воздушное пространство);

выбран магнитный материал (NdFeB) с указанием ключевых параметров (остаточная индукция, Вг; коэрцитивная сила, Нс; магнитная проницаемость среды, μ); выполнен расчет в режиме Magnetostatic.

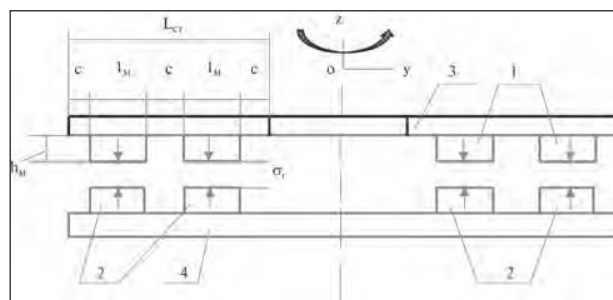


Рис. 1. Фрагмент магнитного подвеса по двухрядной схеме (2×2) вращающейся кольцевой доильной платформы: 1 – подвижные постоянные магниты, 2 – неподвижные постоянные магниты, 3 – вращающееся неферромагнитное основание кольцевой доильной платформы, 4 – неподвижное неферромагнитное основание; $h_{\text{м}}$, $l_{\text{м}}$ – соответственно высота и длина (диаметр) магнита, m – шаг установки магнитов, L , $L_{\text{ст}}$ – длина стойла, m , β_z – левитационный зазор между магнитами, m , стрелками указаны направления линий магнитной индукции).

Для 3D-визуализации магнитного поля программа предусматривает построение линий магнитной индукции (В) внутри магнита и в окружающем пространстве.

За основу моделирования была взята технологическая схема платформы «Карусель» [6] (рис. 1) с использованием аксиально намагниченных постоянных магнитов разных типов: прямоугольных, цилиндрических и кубической формы в виде (массива Хальбаха). Левитационный зазор σ_L между горизонтальными магнитными сборками 1 и 2 принят равным 0,05 м, согласно данным [6]. Для повышения устойчивости и грузоподъемности платформы в пределах одного стойла использовали два ряда неодимовых магнитов.

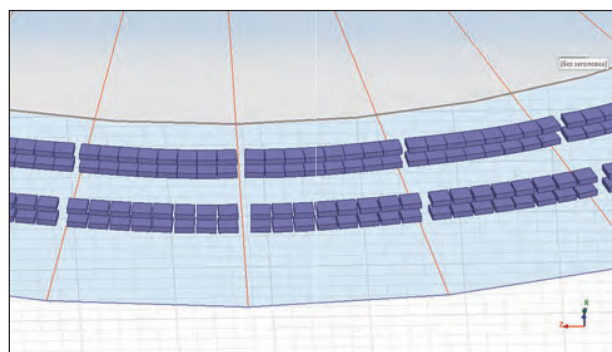


Рис. 2. Расположение магнитных сборок постоянных прямоугольных магнитов на доильной платформе «Карусель».

Первый вариант компоновки магнитных сборок (рис. 1, 2) предусматривал использование прямоугольных магнитов размерами $(100 \times 100 \times 30)$. Число магнитов на одно столбо-место – 8×2 (2 ряда). Вектор намагниченности для образования сил отталкивания подвижных магнитов 1 направлен по оси Z вниз, неподвижных магнитов 2 – вверх [7]. Во втором варианте использовали постоянные магниты цилиндрической формы (100×30) в количестве 9×2 на одно столбо-место. В третьем варианте вместо одинарных магнитов использовали массивы Хальбаха (рис. 3), состоящие из 5-и магнитов каждый (5×5) кубической формы $(25 \times 25 \times 25 \text{ мм})$. Во всех трех вариантах использовали один тип аксиально намагниченных неодимовых

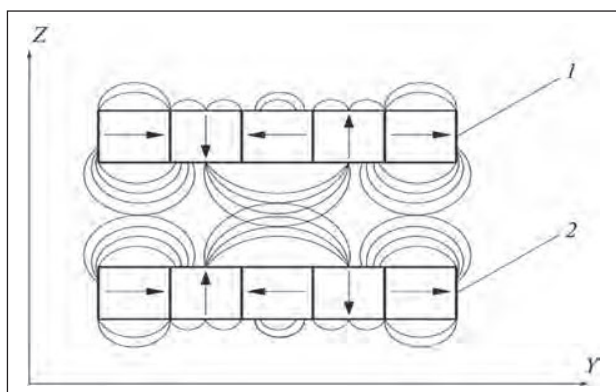


Рис. 3. Двойная симметричная магнитная сборка Хальбаха (5×5) в радиальном направлении Y (к центру платформы): 1 – магнитный полюс подвижной части платформы из 5-и магнитов; 2 – магнитный полюс неподвижной части платформы из 5-и магнитов.

магнитов NdFeB52 со следующими характеристиками: остаточная индукция (B_r)=1,48 Тл, коэрцитивная сила (H_c)=915 кА/м, магнитная проницаемость (μ)=1,05.

Массивы Хальбаха применяют в системах магнитного подвеса высокоскоростного транспортного средства с целью усиления магнитного поля с одной стороны сборки в рабочем зазоре [8]. Подобные сборки, как правило, состоят из магнитов кубической формы с поворотом вектора намагниченности на угол $\pi/4$ и $\pi/2$. Можно использовать двойную сборку Хальбаха со встречным отталкиванием сильных магнитных полей для увели-

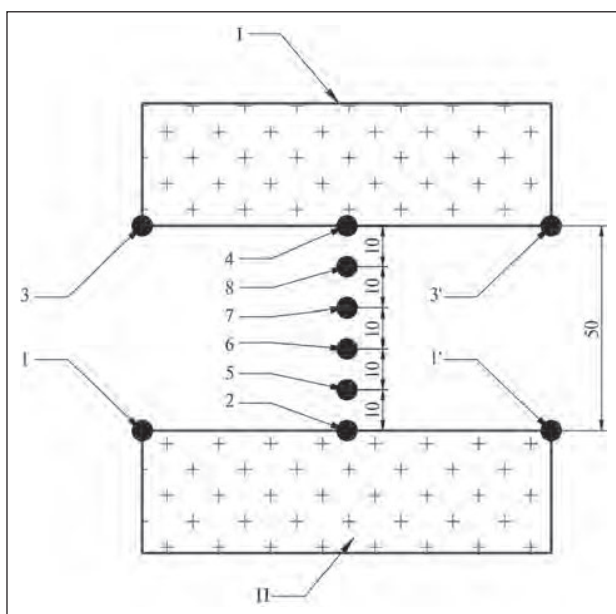


Рис. 4. Расположение линий измерения магнитной индукции между верхней подвижной (I) и нижней неподвижной (II) магнитными сборками (вид сбоку): 1 – линия на поверхности нижней сборки по левому краю магнитов; 1' – линия на поверхности нижней сборки по правому краю магнитов; 2 – линия, проходящая через центры магнитов на поверхности нижней сборки; 3 – линия на поверхности верхней сборки по левому краю магнитов; 3' – линия на поверхности верхней сборки по правому краю магнитов; 4 – линия, проходящая через центры магнитов на поверхности верхней сборки; 5, 6, 7 и 8 – линии равномерно расположены по высоте рабочего зазора между сборками с шагом 10 мм.

чения левитирующего эффекта, которые применяют, например, в магнитах Вигглера для ускорения элементарных частиц [9] и на высокоскоростных транспортных средствах на магнитном подвесе [10]. Двойные сборки Хальбаха могут быть как симметричными (5×5 – пять магнитов вверх, пять магнитов вниз), так и несимметричными (например, 9×5 – девять магнитов вверх, пять – вниз) [11].

Измерения магнитной индукции в рабочем зазоре между сборками проводили по 10 линиям (рис. 4), расположенным по длине сборок: для прямоугольных магнитов длина составляла 800 мм, для цилиндрических – 900 мм; для сборки Хальбаха – 125 мм. Количество и шаг между точками варьировались программой в зависимости от геометрических размеров сборки, конфигурации магнитов и особенностей создаваемого ими поля.

Результаты и обсуждение. Анализ распределения линий магнитной индукции (B) магнитных сборок, представленных в виде 3D-моделей, позволяет оценить общую картину создаваемых магнитных полей в воздушном (рабочем) зазоре и за его пределами, а также оценить среднюю величину магнитной индукции в воздушном рабочем зазоре между сборками для расчета сил отталкивания, необходимых для левитации доильной платформы.

Максимальная плотность линий магнитного поля, создаваемого прямоугольными магнитами (рис. 5 а), наблюдается вблизи их краев, где концентрация силовых линий выше. Поле между ними (в воздушном зазоре) относительно равномерно распределено и ориентировано вдоль направления взаимодействия магнитов. Зона рассеяния магнитного поля за пределами магнитных сборок визуально значительно больше величины воздушного зазора 50 мм. Для цилиндрических магнитов распределение магнитного поля внутри воздушного зазора и за его пределами не существенно отличается от аналогичного для прямоугольных магнитов (рис. 5 б).

В варианте с двойной симметричной сборкой Хальбаха (5×5) магнитное поле концентрируется преимущественно в воздушном зазоре, за пределами сборки поле рассеяния практически отсутствует (рис. 5 в), что позволяет усилить магнитную индукцию в зазоре, по сравнению с прямоугольными и цилиндрическими магнитами, собранными по однонаправленной схеме, в 1,5...2 раза (см. табл.). Среднее значение магнитной индукции в левитационном зазоре между сборками для прямоугольных магнитов составило 0,306 Тл, для цилиндрических – 0,233 Тл, для двойной сборки Хальбаха – 0,539 Тл.

Зная магнитную индукцию в зазоре и площадь магнитов (магнитных сборок), можно определить силу отталкивания магнитов, расположенных один над другим (магнитных сборок) по выражению [12]:

$$F_{1-2} = \frac{B^2 F}{2\mu_0} \quad (1),$$

где F_{1-2} – площадь каждой поверхности магнита (магнитной сборки), м²; μ_0 – магнитная постоянная ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; B – магнитная индукция в зазоре, Тл.

Площади взаимодействующих магнитов определяем с использованием известных зависимостей для прямоугольника и круга. Для сборки Хальбаха площадь одного магнита умножаем на их число в элементарной сборке. Подставив соответствующие значения в выражение (1), получим величины сил отталкивания F_{1-2} элементарных сборок: для прямоугольных магнитов –

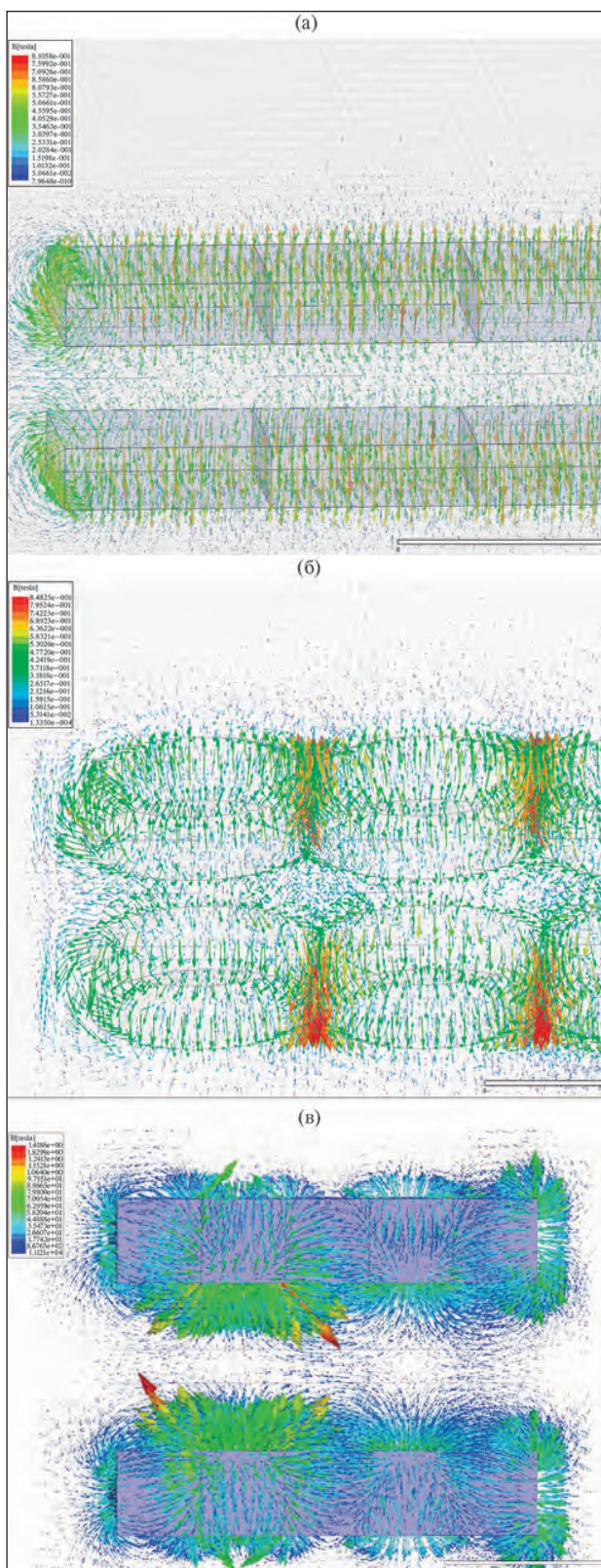


Рис. 5. Результаты 3D-моделирования линий магнитной индукции (B) магнитных сборок: а) постоянные прямоугольные магниты, б) постоянные цилиндрические магниты, в) двойные симметричные сборки Хальбаха (5×5).

Результаты моделирования параметров магнитного поля (магнитной индукции B , мТл), создаваемого сборками из прямоугольных, цилиндрических магнитов и массивов Хальбаха

	Линия									
L, мм*	1	1'	2	3	3'	4	5	6	7	8
постоянные прямоугольные магниты										
0	311	316	473	349	1180	885	287	196	210	285
42	527	497	147	622	993	144	100	73	74	101
84	504	487	103	553	1077	105	63	37	37	62
126	480	477	95	526	879	104	63	24	27	59
168	560	512	92	575	1020	102	54	25	25	60
211	512	510	92	558	1046	99	55	26	27	56
253	520	502	94	572	924	92	43	14	15	46
295	474	524	92	547	940	98	49	21	22	51
337	535	539	93	549	1115	100	55	32	32	58
379	497	522	91	488	957	100	53	20	21	55
421	592	514	91	527	985	101	53	21	21	55
463	562	580	91	658	1063	99	54	27	28	56
505	513	536	94	563	1000	91	49	20	21	51
547	554	490	93	538	911	91	44	16	16	46
589	579	476	93	601	1050	91	54	26	27	56
632	550	505	94	530	1028	102	58	24	25	55
674	536	495	98	477	950	100	62	24	23	56
716	530	493	102	558	1045	102	61	35	35	63
758	550	503	157	561	1091	142	99	70	69	98
800	371	356	424	376	1190	893	290	214	208	290
Средняя В зазоре	523	501	116	542	1015	145	70	38	38	71
306										
постоянные цилиндрические магниты										
0	440	458	452	472	811	957	223	136	159	251
89	411	406	-*	434	424	-	-	-	-	-
100	-	-	56	-	-	237	87	26	31	72
178	419	364	-	429	365	--	-	-	-	-
200	-	-	58	-	-	245	94	33	32	86
267	321	326	-	319	332	-	-	-	-	-
300	-	-	52	-	-	260	66	35	33	63
356	279	233	-	222	218	-	-	-	-	-
400	-	-	48	-	-	266	82	26	18	87
444	230	218	-	239	216	-	-	-	-	-
500	-	-	51	-	-	262	65	35	34	63
533	342	336	-	338	293	-	-	-	-	-
600	-	-	56	-	-	235	66	34	35	68
622	378	398	-	392	367	-	-	-	-	-
700	-	-	49	-	-	251	79	30	34	81
711	455	409	-	430	396	-	-	-	-	-
800	394	377	58	396	424	252	82	35	33	97
900	-	-	411	-	-	832	289	205	196	265
Средняя В зазоре	367	352	129	367	385	380	113	59	60	113
233										
двойные симметричные сборки Хальбаха										
0	314	330	423	395	326	408	213	82	77	217
7	321	340	487	1021	1003	920	235	127	115	258
13	343	354	467	967	957	837	249	144	124	212
20	438	446	716	863	854	593	238	140	127	251
26	494	489	869	1387	1465	1147	315	118	107	312
33	525	481	709	1225	1255	771	288	86	66	314
39	511	487	728	1211	1198	681	288	104	100	333
46	505	523	789	1417	1335	1019	313	153	140	350
53	491	547	840	781	734	429	320	184	182	340
59	463	459	626	839	798	717	322	208	211	333
66	461	475	622	831	793	701	325	201	211	326
72	487	574	857	755	719	402	339	179	172	337
79	518	508	844	1329	1315	1001	341	163	163	384
86	534	457	705	1193	1176	710	336	81	98	347
92	544	460	657	1226	1201	779	310	80	76	307
99	505	470	742	1399	1373	1118	373	137	115	308
105	446	423	682	884	848	621	281	115	133	290
112	339	375	461	984	959	834	241	134	150	223
118	361	344	499	1036	1014	921	220	119	120	203
125	387	331	458	1039	1015	904	203	91	82	207
Средняя В зазоре	460	456	683	1075	1055	789	296	137	134	302
0,539										

*Пустые ячейки таблицы связаны с отсутствием данных после их выгрузки из программы моделирования (магнитная индукция в этих точках равна 0).

373 Н, для цилиндрических – 169,6 Н, для сборок Хальбаха (5 × 5) – 361,4 Н.

Количество элементарных магнитных сборок в расчете на одно доильное место определяем по выражению:

$$n_{сб} = \frac{P}{(F_{1-2} - n_m \cdot m_m \cdot g)} \quad (2),$$

где P – грузоподъемность платформы в расчете на одно доильное место (принимается ≈ 1200 кг или 11772 Н в соответствии с рекомендациями, представленными в [2]), n_m, m_m – соответственно количество (шт.) и масса одного магнита в элементарной сборке (для прямоугольных и цилиндрических магнитов – $n_m = 2$, $m_m = \rho \cdot V$, ($\rho = 7400$ кг/м³), V – объем магнита, м³ (определяется по известным формулам для параллелепипеда и цилиндра), для сборки Хальбаха (5 × 5) – $n_m = 10$).

С учетом плотности материала масса элементарной сборки из прямоугольных магнитов, расположенных по схеме (1 × 1), будет равна 4,44 кг, из цилиндрических (1 × 1) – 3,48 кг, из сборок Хальбаха (5 × 5) – 1,15 кг. Удельная сила отталкивания в расчете на 1 кг магнитов – соответственно 84 Н, 48,7 Н и 314,3 Н.

Выводы. По результатам моделирования магнитного поля разных типов постоянных магнитов средняя величина магнитной индукции в левитационном воздушном зазоре доильной платформы «Карусель» для прямоугольных магнитов (100 × 100 × 30) NdFeB52 составляет 0,306 Тл, для цилиндрических магнитов (100 × 30 мм) – 0,233 Тл, для сборок Хальбаха из пяти магнитов кубической формы (25 × 25 × 25) – 0,539 Тл. Удельные величины сил отталкивания элементарных магнитных сборок в расчете на 1 кг магнитных сборок для прямоугольных магнитов составляют 84 Н/кг, для цилиндрических – 48,7 Н/кг, сборок Хальбаха – 314,3 Н/кг. Это открывает возможности для оптимизации массы и общего количества магнитных сборок в расчете на одно место левитирующей доильной платформы «Карусель». В целом для магнитного подвеса вращающейся доильной платформы «Карусель» более целесообразно использование сборок Хальбаха, магнитное поле которых характеризуется меньшей зоной рассеяния за пределами сборки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

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

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Морозов Н. М., Кирсанов В. В., Ценч Ю. С. Историко-аналитическая оценка развития процессов автоматизации и роботизации в молочном животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. № 1. С. 11–18.
2. Лобачевский Я. П., Кирсанов В. В., Кирсанов С. В. Платформы Карусель на принципах магнитной левитации // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024. № 2. С. 63–67.
3. Зайцев А. А., Соколова Я. В., Пантина Т. А. Инновационное развитие транспортной системы с применением технологии магнитной левитации // *Мир транспорта*. 2019. Т. 17. № 4(83). С. 36–45.
4. Исследование магнитных полей в новой конструкции гомополярного магнитного подшипника / В. Е. Вавилов, Ф. Р. Исмаилов, А. А. Жеребцов и др. // *Авиакосмическое приборостроение*. 2023. № 8. С. 50–61.
5. Черкасова О. А. Сравнительное исследование нелинейных магнитных характеристик для магнитного подвеса при помощи численного моделирования // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. Т. 183. 2021. № 4. С. 20–25.
6. Кирсанов В. В., Федоренко В. Ф., Кирсанов С. В. Магнитоэстатический расчет левитирующей вращающейся доильной платформы карусель на постоянных магнитах // *Техника и оборудование для села*. 2024. № 6(324). С. 29–32.
7. Микроскопическая структура магнитного поля на поверхности постоянного магнита / Б. А. Гинзбург, Т. П. Каминская, П. А. Поляков и др. // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2018. Т. 82. № 2. С. 226–231.
8. Моделирование магнитного поля в нелинейных ферромагнитных средах с использованием блочных элементов и их схем замещения / А. Н. Ткачев, А. В. Пашиковский, Д. Н. Черноиван и др. // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2020. Т. 63. № 2–3. С. 44–54.
9. Сверхпроводящие многополюсные вигглеры для генерации синхротронного излучения в ИЯФ СО РАН / В. А. Шкаруба, А. В. Брагин, А. А. Волков и др. // *Письма в журнал физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2020. Т. 17. № 4. С. 567–575.
10. Зайцев А. А. Грузовая транспортная платформа на магнитно-левитационной основе: опыт создания // *Транспортные системы и технологии*. 2015. Т. 1. № 2. С. 5–15.
11. Брюханов С. А. Устройство магнитной левитации на постоянных магнитах // *Патент РФ 2743104*. Оpubл. 15.02.2021. бюлл. № 5.
12. Коротченя В. М., Ценч Ю. С., Лобачевский Я. П. Система машин как фактор научно-технического прогресса в агропромышленном комплексе // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024. № 4. С. 67–72.

Поступила в редакцию 18.02.2025

После доработки 07.03.2025

Принята к публикации 01.04.2025

ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ МОДЕЛЬ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

© 2025 г. **В. К. Каличкин**¹, доктор сельскохозяйственных наук, **В. И. Усенко**², доктор сельскохозяйственных наук, **А. А. Гаркуша**², кандидат сельскохозяйственных наук, **Д. С. Федоров**¹, **К. Ю. Максимович**¹, кандидат биологических наук

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, 630501, Новосибирская область, Новосибирский р-он, пос. Краснообск
E-mail: vk.kalichkin@gmail.com

²Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий, 656910, Алтайский край, Барнаул, пос. Научный городок, 35
E-mail: usenko.001@mail.ru

Исследования проводили с целью создания интерпретируемой модели машинного обучения (объяснимый искусственный интеллект) для прогнозирования урожайности яровой пшеницы. Использовали данные длительного полевого опыта (2001–2024 гг.), проведенного в лесостепи Алтайского Приобья. Схема эксперимента предусматривала изучение роли предшественников, приемов основной обработки выщелоченного чернозема, а также уровней применения минеральных удобрений и химических средств защиты растений в формировании урожайности яровой мягкой пшеницы. Для создания модели использовали экстремальный градиентный бустинг (XGBoost), а для ее интерпретации – аддитивные объяснения Шепли (SHAP), что позволило оценить вклад каждого признака. Построенная модель XGBoost продемонстрировала высокую точность прогнозирования ($R^2=0,95$, $MAE=0,13$ т/га, $RMSE=0,17$ т/га), а интеграция с SHAP-анализом выявила наиболее значимые признаки (5...6 из 18), определяющие урожайность в лесостепи Алтайского Приобья. Наибольший вклад в высокую прогнозную урожайность вносили достаточное увлажнение за сельскохозяйственный год (596,5 мм; 1,19 т/га), использование пара в качестве предшественника (0,58 т/га) и применение азотно-фосфорных удобрений (0,21 т/га). Низкая прогнозная урожайность обусловлена недостатком увлажнения в течение сельскохозяйственного года (317 мм; –0,77 т/га) и с мая по октябрь (246 мм; –0,24 т/га), а также высокими значениями суммы положительных температур (2527,5 °C; –0,13 т/га), низким количеством осадков в период вегетации пшеницы (175 мм; –0,10 т/га) и отсутствием применения средств защиты растений (–0,10 т/га). Разработанная модель расширяет возможности машинного обучения, позволяя получать более надежные и информативные результаты.

INTERPRETABLE MACHINE LEARNING MODEL FOR SPRING WHEAT YIELD FORECASTING

V. K. Kalichkin¹, **V. I. Usenko**², **A. A. Garkusha**², **D. S. Fedorov**¹, **K. Yu. Maksimovich**¹

¹Siberian Federal Research Center of Agricultural Biotechnology, Russian Academy of Sciences, 630501, Novosibirskaya obl., Novosibirskii r-n, pos. Krasnoobsk
E-mail: vk.kalichkin@gmail.com

²Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnologies, 656910, Barnaul, pos. Nauchnyi gorodok, 35
E-mail: usenko.001@mail.ru

The research was conducted to construct an interpretable machine learning model (explainable artificial intelligence) for spring wheat yield forecasting. The data of a long-term field experiment (2001–2024) carried out in the forest-steppe of the Altai Priobye region were used. The scheme of the experiment provided for the analysis of predecessors' role, methods of basic cultivation of leached chernozem, as well as levels of application of mineral fertilizers and chemical plant protection products in the formation of spring soft wheat yield. Extreme gradient boosting (XGBoost) was used to construct the model, and SHapley Additive exPlanations (SHAP) were used for its interpretation, which allowed estimating the contribution of each feature. The constructed XGBoost model demonstrated high prediction accuracy ($R^2=0.95$, $MAE=0.13$ t/ha, $RMSE=0.17$ t/ha), and integration with SHAP-analysis revealed the most significant features (5...6 out of 18) determining yield in the forest-steppe of the Altai Priobye. The greatest contribution to high predicted yield in the experiment was made by sufficient moisture for the crop year (596.5 mm; 1.19 t/ha), the use of fallow as a predecessor (0.58 t/ha) and the use of nitrogen-phosphorus fertilizers (0.21 t/ha). Low predicted yields are due to lack of moisture during the crop year (317 mm; –0.77 t/ha) and from May to October (246 mm; –0.24 t/ha), as well as high values of the sum of positive temperatures (2527.5 °C; –0.13 t/ha), low precipitation during wheat growing season (175 mm; –0.10 t/ha) and lack of application of plant protection products (–0.10 t/ha). The model expands the possibilities of applying machine learning, allowing us to obtain more reliable and informative results.

Ключевые слова: объяснимый искусственный интеллект, урожайность яровой пшеницы, многофакторные полевые опыты, XGBoost, SHAP.

Keywords: explicable artificial intelligence, spring wheat yield, multifactorial field experiments, XGBoost, SHAP.

Длительные многофакторные полевые опыты, охватывающие различные почвенно-климатические зоны, служат основой для формирования знаний в сельскохозяйственной науке и практике. Осуществление

многолетних экспериментов и наблюдений позволяет получать данные об эффективности возделывания сельскохозяйственных культур в зависимости от уровня применения агрохимических средств [1, 2, 3], параметров

технологических операций и почвенно-климатических условий конкретного пространственного объекта (территории) [4, 5, 6]. В мировой и отечественной практике с использованием аналитики данных, полученных в полевых опытах, и агрономических знаний создается система рекомендаций по выращиванию культур – инструмент поддержки принятия решений для агрономов. Составляющим звеном этого инструмента выступает моделирование (прогноз) возможной урожайности культур в зависимости от условий окружающей среды и управляющих воздействий.

Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур становится одним из ключевых элементов в процессе цифрового управления посевами, оценке рентабельности производства и производственных рисков, а также распределении химико-техногенных ресурсов в конкретном землепользовании [7, 8]. В предыдущие годы урожайность сельскохозяйственных культур прогнозировали посредством статистических моделей с использованием различных данных. Например, неплохо развита система прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в масштабе регионов (субъектов РФ) с использованием данных по метеопараметрам и дистанционному зондированию Земли. Обычно анализируется временной ход NDVI по фазам вегетации, определяется теснота связи NDVI с урожайностью по этим периодам в комплексе с метеорологическими условиями. Затем формируются регрессионные модели прогнозирования урожайности на основе совместного использования наземных и спутниковых данных [9]. Разрабатываются также математические модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур, основанные на агрохимических показателях почвы, – гумус, обменный калий (K), доступный фосфор (P) и pH солевой вытяжки [10, 11]. Однако прогнозирование урожайности культур с использованием традиционных регрессионных моделей представляет собой ряд проблем, в первую очередь из-за их неспособности обрабатывать большие наборы данных и эффективно улавливать влияние условий окружающей среды.

Модели искусственного интеллекта (ИИ) открывают новый путь для обработки обширных наборов данных и извлечения информации из полевых агрономических экспериментов [12, 13]. Эти вычислительно эффективные модели способны анализировать сложные взаимодействия между признаками и условиями окружающей среды, тем самым улучшая понимание моделей и повышая точность прогнозов [14, 15, 16]. Применение технологий ИИ, преимущественно методов машинного обучения (МО), для анализа сельскохозяйственных данных делает более доступным и научно-обоснованным их преобразование в прикладные инструменты для поддержки принятия решений при реализации агротехнологий. В то же время модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур, основанные на сложных алгоритмах МО, например ансамблевых методах, несмотря на высокую точность прогнозирования, часто непрозрачны и не поддаются объяснению. Такие модели получили название «черного ящика». Поэтому возникла потребность в их интерпретируемости, что может быть решено с использованием объяснимого ИИ [17, 18]. Интерпретируемая модель имеет решающее значение, поскольку она позволяет понять важные факторы и условия, влияющие на урожайность сельскохозяйственных культур, и обосновать конкретные прогнозы. В дополнение к прогнозам с использованием МО для получения объяснений и интерпретаций поведения моделей применяют аддитивные объяснения

Шепли (SHapley Additive ExPlanations – SHAP) [19]. Использование значений SHAP позволяет оценить вклад каждого признака в модели МО и понять, какие признаки влияют на результаты ее работы [20]. В российском научном дискурсе SHAP используется в электроэнергетике [21, 22], телекоммуникации [23], медицине [24] и др. Публикаций по использованию метода SHAP для интерпретации прогнозных моделей МО в сельском хозяйстве нами не обнаружено.

Урожайность яровой пшеницы зависит от условий окружающей среды и различных управляющих воздействий, обычно называемых в моделях МО признаками. Использование интерпретируемых алгоритмов имеет важное значение для понимания сложных взаимодействий между различными признаками и их влияния на урожайность культуры. Применение новых подходов интеллектуального анализа данных полевых экспериментов существенно увеличивает их информативность и имеет важное значение для обеспечения надежности и согласованности прогнозов.

Цель исследования – разработать интерпретируемую модель машинного обучения для прогнозирования урожайности яровой пшеницы с использованием данных длительного многофакторного полевого опыта.

Методика. Машинное обучение выполняли с использованием данных длительного полевого опыта, проведенного Федеральным Алтайским научным центром агробиотехнологий в 2001–2024 гг. в лесостепи Алтайского Приобья. Почва опытного участка – чернозем выщелоченный среднесуглинистый малогумусный среднесуглинистый на склоне юго-восточной экспозиции крутизной 1...2°. Содержание гумуса в пахотном слое почвы составляло 3,8 %.

Набор данных состоял из 3456 записей, содержащих информацию об урожайности пшеницы и факторах, влияющих на нее (всего 18 признаков). Признаки включали категориальные переменные: предшественники (горох, овес, пар, бессменная пшеница); приемы основной обработки почвы (без обработки – БО, глубокая (на 25...27 см) плоскорезная – ГПО, мелкая (на 14...16 см) плоскорезная – МПО); удобрения (без удобрений – удобрение₀, P₂₅, N₄₆P₂₅); средства защиты растений (без средств защиты – СЗР₀, гербициды против двудольных сорняков – Г-1, гербициды против двудольных и однодольных сорняков – Г-2, гербициды, инсектициды, фунгициды – ГИФ). Числовые признаки представлены урожайностью пшеницы (т/га), осадками сельскохозяйственного года (O_{сх}, мм), осадками за апрель-октябрь (O_{4...10}, мм), осадками за май-август (O_{5...8}, мм) и суммой положительных температур за вегетационный период (СПТ, °C). Временные ряды осадков и положительных температур воздуха получены на основании анализа данных агрометеорологической станции (АМС) Барнаул Алтайского ЦГМС (источник данных: web-ресурс <<http://www.pogodaiklimat.ru>>).

Для формирования модели прогнозирования урожайности культуры использовали экстремальный градиентный бустинг (XGBoost) – усовершенствованный алгоритм МО, представляющий собой оптимизированную распределенную реализацию градиентного бустинга. XGBoost эффективно применяет принципы параллельного построения деревьев решений (известного также как GBDT или GBM) в рамках парадигмы градиентного бустинга. Общая формула модели градиентного бустинга выглядит следующим образом:

$$f(x) = \sum_{m=1}^M \gamma_m h_m(x), \quad (1)$$

где $h_m(x)$ – базовый предиктор (дерево решений), γ_m – коэффициент усадки, регулирующий вклад каждого дерева, M – число итераций бустинга [25].

Оценку производительности модели XGBoost проводили с использованием трех статистических параметров – средняя абсолютная ошибка (MAE), корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE) и коэффициент детерминации (R^2).

Для интерпретации модели МО использовали аддитивные объяснения Шепли (SHAP). SHAP использует теорию игр (значения Шепли) для объяснения вклада каждого признака в предсказание модели. Хотя значения Шепли выступают более общей концепцией, SHAP специально фокусируется на интерпретации и объяснении моделей МО [25, 26]. Значение SHAP определяли следующим уравнением:

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq \{1, \dots, N\} \setminus \{i\}} \frac{|S|!(N-|S|-1)!}{(N-1)!} [f(x_S \cup \{i\}) - f(x_S)], \quad (2)$$

где $S_i(x)$ – значение SHAP для i -го признака и наблюдения x ; N – множество признаков, $|N|$ – размер множества признаков; S – подмножество признаков, исключая i -й признак; $|S|$ – размер подмножества S ; x_S – наблюдение x с учетом только признаков из множества S ; $f(x_S \cup \{i\})$ – прогноз модели для наблюдения x , включая i -й признак; $f(x_S)$ – прогноз для наблюдения x_S .

Для построения прогнозной модели данные разделили в соотношении 80:20, где 80 % использовали для обучения, а оставшиеся 20 % – для тестирования качества модели. Настройку гиперпараметров проводили с использованием методов перекрестной проверки, что позволило оптимизировать производительность модели и избежать переобучения. Среди ключевых гиперпараметров, которые были скорректированы, выделяются количество деревьев в ансамбле, максимальная глубина деревьев и минимальное количество наблюдений, необходимое для разделения узла дерева.

Статистические расчеты и графические построения выполнены средствами языка программирования Python в интерактивном блокноте Jupyter. Модель прогнозирования урожайности яровой пшеницы реализована в авторской программе Crop Yield Analysis & Forecast (CYAF) [27, 28].

Результаты и обсуждение. Предварительная обработка выступает важным этапом в уточнении исходного набора данных, создавая среду, подходящую для эффективного анализа и моделирования признаков МО. Этот ключевой шаг охватывает различные процессы, направленные на повышение качества и релевантности данных. Была проведена очистка данных с целью выявления и исправления отсутствующих или несоответствующих значений. Также были проведены обнаружение и удаление выбросов для предотвращения искажений в обучении модели и нормализация данных.

Основные статистические показатели категориальных признаков были проанализированы и использованы для интерпретации влияния различных признаков на урожайность пшеницы. Анализ диаграмм размахов или графиков «ящик с усами» (рис. 1) позволяет оценить влияние каждого категориального признака на урожайность.

Из графика видно, что пар был наиболее благоприятным предшественником, обеспечивая максимальную среднюю урожайность (2,31 т/га) и медиану (2,31 т/га). В то же время пшеница как предшественник при бесменном возделывании демонстрировала наименьшие

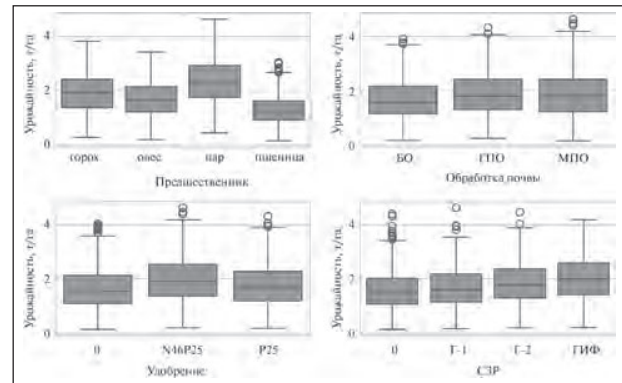


Рис. 1. Диаграммы размахов данных по урожайности яровой пшеницы.

в опыте значения: средняя урожайность составила 1,29 т/га, а медиана – 1,24 т/га. Горох и овес занимали промежуточное положение по влиянию на урожайность.

При сравнении способов обработки почвы наивысшая в эксперименте урожайность выявлена при глубокой (1,87 т/га) и мелкой плоскорезной (1,85 т/га) обработках, при этом медианные значения близки к средним (1,79 и 1,80 т/га соответственно). Наименьшие значения урожайности зафиксированы при отсутствии основной обработки почвы.

Наибольшую урожайность яровой пшеницы обеспечивала доза минеральных удобрений $N_{46}P_{25}$. Без внесения удобрений или при использовании только фосфорных удобрений (P_{25}) урожайность снижалась. Это подтверждает важность сбалансированного внесения азота и фосфора для повышения урожайности зерна пшеницы.

Применение средств защиты растений (СЗР) также положительно влияло на урожайность культуры. Наибольший в эксперименте эффект достигался при комплексном использовании гербицидов, инсектицида и фунгицида, где средняя урожайность составляла 2,04 т/га.

Кроме того, анализ числовых признаков показал, что урожайность культуры изменялась от 0,14 до 4,64 т/га, с медианой в 1,72 т/га. Осадки за сельскохозяйственный год варьировали от 317 до 596,5 мм, с медианой в 441,2 мм. Осадки с апреля по октябрь составляли 213,8...436,3 мм, с медианой в 298,3 мм. Осадки с мая по август находились в диапазоне от 135,6 до 288,8 мм, с медианой в 206,4 мм. Сумма положительных температур изменялась от 2043,3 до 2536,5 °C. Эти данные позволили провести анализ диапазонов значений климатических признаков и их связи с урожайностью культуры.

Корреляционный анализ методом Пирсона выявил статистически значимые связи: положительную корреляцию между количеством осадков и урожайностью ($p < 0,05$) и отрицательную – между суммой положительных температур и урожайностью ($p < 0,05$). Эти результаты подчеркивают важность учета климатических факторов при прогнозировании урожайности культуры.

Результаты дисперсионного анализа методом многовариантного ANOVA для категориальных признаков указывают на их значимое влияние на урожайность ($p < 0,05$): предшественник – $F = 333,96$ ($p < 0,001$), обработка почвы – $F = 22,51$ ($p < 0,001$), удобрение – $F = 29,56$ ($p < 0,001$), СЗР – $F = 56,52$ ($p < 0,001$). Эти результаты подтверждают, что все перечисленные признаки (18 шт.) в той или иной степени влияли на урожайность пшеницы, что важно учитывать при разработке прогностических моделей.

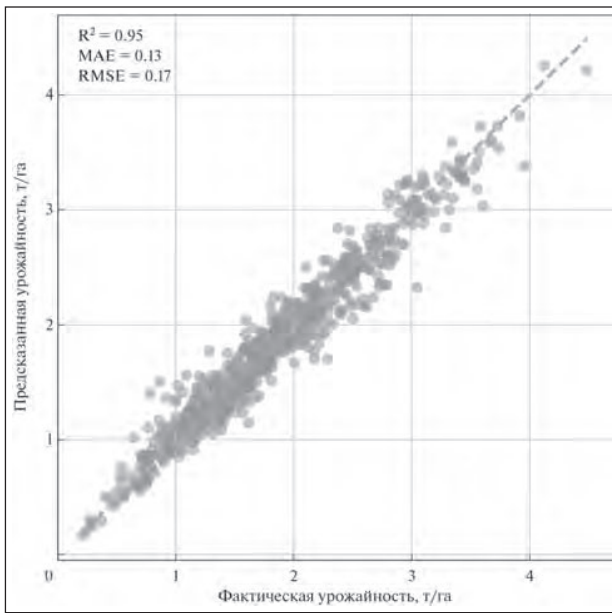


Рис. 2. Сравнение фактических и предсказанных значений урожайности яровой пшеницы.

Сравнение результатов расчета вклада признаков в целевую переменную традиционными статистическими методами (дисперсионный, регрессионный и корреляционный анализы) и оценки важности признаков алгоритмом XGBoost показало схожие закономерности: осадки за сельскохозяйственный год (важность рассчитанного с использованием алгоритма XGBoost признака – 0,2037), предшественник – пар (0,1953), предшественник – пшеница (0,1783), сумма положительных температур (0,1453), осадки с мая по август (0,0949), осадки с мая по октябрь (0,0808), обработка почвы – БО (0,0788), СЗР – ГИФ (0,0712), СЗР – 0 (0,0608), а важность остальных признаков не превышала значение 0,04.

Для построения модели МО были использованы все признаки, полученные с применением временных рядов данных полевого эксперимента. Построенная модель XGBoost продемонстрировала высокую точность прогнозирования урожайности яровой пшеницы. Основные метрики качества модели позволяют судить о ее эффективности: коэффициент детерминации (R^2) составил 0,95, средняя абсолютная ошибка (MAE) – 0,13 т/га, среднеквадратичная ошибка (RMSE) – 0,17 т/га. Коэффициент детерминации свидетельствует о том, что модель объясняет 95 % вариаций в урожайности пшеницы.

Для визуальной оценки качества модели был построен график сравнения фактических и предсказанных значений урожайности (рис. 2). На представленном графике видно, что предсказанные значения располагаются вдоль линии идеального предсказания, что подтверждает высокую точность модели. Важно отметить, что значения равномерно распределены вдоль всей линии без значительных выбросов (при урожайности от 1,0 до 3,0 т/га), что свидетельствует о стабильности модели на различных уровнях урожайности культуры.

Расчет значений SHAP предполагает оценку вклада каждого признака в модель МО с учетом всех возможных комбинаций признаков. Для визуализации значений SHAP строятся соответствующие графики, которые помогают понять вклад входных признаков в прогноз модели для конкретного наблюдения. Значения SHAP

показывают, как каждый признак влияет на итоговый прогноз – положительно или отрицательно, а также с какой силой. График SHAP отображает признаки на оси x и соответствующие им значения SHAP на оси y (рис. 3). Каждая точка на графике представляет значение SHAP для конкретного признака в конкретном наблюдении. Анализируя эти графики, можно получить представление о внутренней работе сложных моделей МО и больше доверять их прогнозам.

SHAP-анализ выявил отчетливую положительную зависимость между количеством осадков за сельскохозяйственный год и урожайностью пшеницы. Высокие значения осадков (отмеченные серым цветом) преимущественно смещены в правую часть графика, что свидетельствует об увеличении связи с прогнозируемой урожайностью. Это наблюдение подтверждает, что для условий Алтайского Приобья атмосферное увлажнение выступает ключевым лимитирующим признаком, и увеличение количества осадков практически всегда положительно сказывается на урожайности культуры. Количественно этот признак имеет наибольшее среднее абсолютное значение SHAP (0,204 т/га) и максимальный диапазон влияния от –0,927 до 1,077 т/га, что подчеркивает его доминирующую роль в модели.

График также наглядно продемонстрировал влияние пара в качестве предшественника на урожайность пшеницы. Серые точки на графике соответствуют случаям использования пара в качестве предшественника (значение 1), а черные – остальным предшественникам (значение 0). На графике отчетливо видно, что серые точки преимущественно расположены в правой части, что указывает на положительное влияние пара в качестве предшественника на урожайность. Со средним абсолютным значением SHAP 0,195 т/га, этот признак выступает вторым по вкладу в прогнозную способность

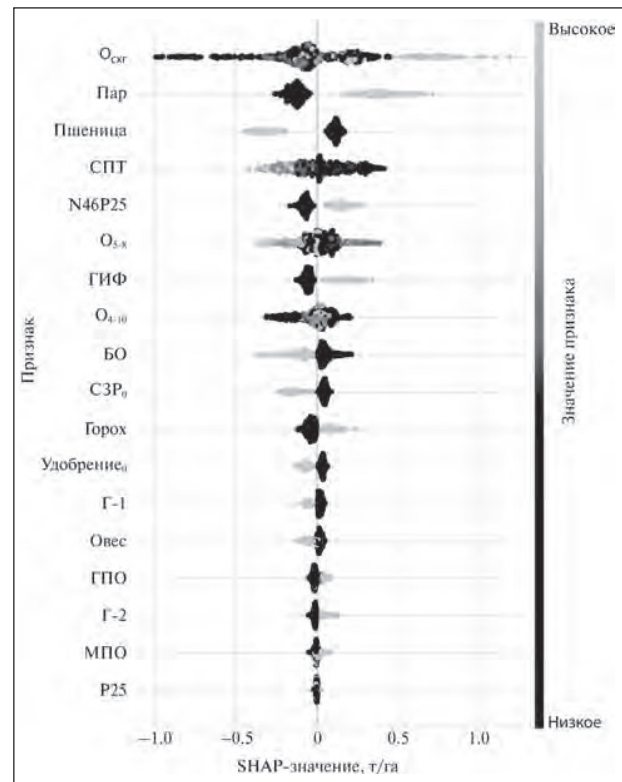


Рис. 3. Вклад различных признаков в прогнозирование урожайности пшеницы.

модели. Выявлено негативное влияние бессменного выращивания пшеницы. На графике преобладают серые точки в левой части, что свидетельствует о снижении урожайности культуры. Среднее абсолютное значение SHAP для этого признака составляет 0,178 т/га, что делает его третьим по величине вклада среди всех признаков модели. Показательно, что максимальное в эксперименте отрицательное влияние (–0,501 т/га) по модулю бессменной пшеницы превышает максимальное положительное (0,182 т/га), что подчеркивает преимущественно негативное воздействие на урожайность культуры.

Суммы положительных температур воздуха имеют нелинейную связь с урожайностью пшеницы. Как низкие, так и высокие значения температур негативно влияют на урожайность, в то время как средние значения (точки смешанного цвета в правой части графика) способствуют увеличению урожайности. Диапазон влияния изменяется от –0,396 до 0,425 т/га, а среднее абсолютное значение SHAP (0,145 т/га) подтверждает значимость этого признака для формирования урожайности. Осадки с мая по август показали положительную связь с урожайностью культуры, особенно заметную при высоких значениях осадков. Среднее абсолютное значение SHAP составляет 0,095 т/га, что подтверждает существенный, хотя и меньший по сравнению с осадками сельскохозяйственного года, вклад этого признака. Схожую тенденцию демонстрировали осадки апреля–октября (0,081 т/га), хотя их среднее значение SHAP слегка отрицательно (–0,008 т/га), что указывает на более сложный характер влияния осадков в течение всего вегетационного периода.

Анализ показал, что отсутствие основной обработки почвы преимущественно связано со снижением урожайности. Это объясняется тем, что без обработки в условиях Алтайского края происходит худшее накопление влаги в осенне-зимний период и более позднее прогревание почвы весной. Среднее абсолютное значение SHAP для этого признака составило 0,079 т/га, а диапазон влияния варьировал от –0,384 до 0,222 т/га, что указывает на значительную вариативность эффекта в зависимости от сочетания с другими признаками.

Применение комплекса средств защиты растений (ГИФ) в большинстве случаев положительно влияло на урожайность. Это объясняется тем, что эффективная защита от вредителей, болезней и сорняков позволяет растениям реализовать свой генетический потенциал продуктивности. При значении SHAP в 0,071 т/га влияние этого признака может достигать значительного положительного эффекта (максимум 0,273 т/га).

Анализ показал вариативное влияние уровня минерального питания растений на урожайность культуры в вариантах без внесения минеральных удобрений, преимущественно негативное, особенно в сочетании с другими неблагоприятными признаками. Это подтверждает необходимость сбалансированного минерального питания для формирования урожайности пшеницы. Значение SHAP этого признака составляет 0,061 т/га, а диапазон влияния от –0,191 до 0,089 т/га указывает на преобладающее потенциально негативное воздействие.

Остальные признаки, включающие различные дозы удобрений ($N_{46}P_{25}$, P_{25}), средства защиты растений (Г-1, Г-2) и приемы обработки почвы (глубокая и мелкая плоскорезная), имеют меньшее среднее абсолютное значение SHAP (0,039 т/га и ниже). Это свидетельствует о том, что их вклад в предсказания модели менее выражен, по сравнению с ключевыми климатическими факторами. Однако их присутствие в модели и положительные максимумы значений SHAP свидетель-

ствуют о том, что при определенных условиях они могут оказывать существенное положительное влияние на урожайность пшеницы. Например, удобрение $N_{46}P_{25}$ с SHAP-значением 0,0975 т/га может давать положительный эффект до 0,288 т/га, что сопоставимо с влиянием более важных признаков.

Для более детального выяснения связи признаков с различным уровнем урожайности яровой пшеницы были построены каскадные графики на основе данных SHAP-анализа для высокой (рис. 4) и низкой (рис. 5) урожайности.

В результате этого анализа установлено, что базовое значение урожайности пшеницы составило 1,793 т/га, Σ SHAP равно 2,418 т/га, прогноз: $1,793 + 2,418 = 4,211$ т/га. SHAP-анализ показал, что высокая урожайность обусловлена следующими признаками с наибольшим положительным влиянием (рис. 4):

$O_{схл}$ – высокое значение осадков (596,5 мм) дало наибольший положительный вклад (SHAP=1,19 т/га). Среднее абсолютное значение SHAP по всей модели составляет 0,23 т/га, что делает этот признак самым важным;

пар – использование пара в качестве предшественника внесло значительный вклад в урожайность культуры (SHAP=0,58 т/га), что выше среднего абсолютного значения SHAP по модели (0,21 т/га);

$N_{46}P_{25}$ – применение азотно-фосфорных удобрений внесло существенный положительный вклад (SHAP=0,21 т/га). Среднее абсолютное значение SHAP по модели для этого признака составляет 0,10 т/га, что подтверждает его значимость в этом наблюдении;

бессменная пшеница – этот предшественник внес положительный вклад (SHAP=0,13 т/га). Однако в среднем по модели он имеет смешанное влияние. Среднее абсолютное значение SHAP составляет 0,17 т/га, но максимальное отрицательное значение SHAP (–0,44 т/га) превышает максимальное положительное (0,17 т/га). Это указывает на то, что эффект бессменного возделывания пшеницы зависит от сочетания с другими признаками. В этой модели повышенное количество атмосферного увлажнения и применение удобрений могли компенсировать потенциально негативное влияние ее бессменного возделывания;

$O_{4...10}$ – высокое значение осадков в период с апреля по октябрь (436,3 мм) способствовало увеличению урожайности (SHAP=0,12 т/га). Хотя среднее абсолютное значение SHAP по модели ниже (0,08 т/га), в нашем наблюдении этот признак оказался более значимым;

БО – прием отказа от обработки почвы внес положительный вклад (SHAP=0,12 т/га). Однако в среднем по модели его влияние более вариативное: среднее абсолютное значение SHAP составляет 0,07 т/га с диапазоном от –0,36 до 0,21 т/га. По-видимому, в условиях повышенного атмосферного увлажнения и применения удобрений оставление почвы без обработки не оказывает отрицательного влияния на урожайность пшеницы.

Низкая прогнозная урожайность пшеницы представляет собой противоположный сценарий, где агрометеорологические условия и агротехнические факторы оказывают негативное влияние на продуктивность.

Базовое значение урожайности пшеницы составило 1,793 т/га, Σ SHAP равна –1,63 т/га, прогноз: $1,793 - 1,63 = 0,161$ т/га. SHAP-анализ показал, что низкая урожайность культуры обусловлена следующими признаками с наибольшим отрицательным влиянием (рис. 5):

$O_{схл}$ – низкое значение осадков за сельскохозяйственный год (317 мм) оказало наибольшее отрицательное

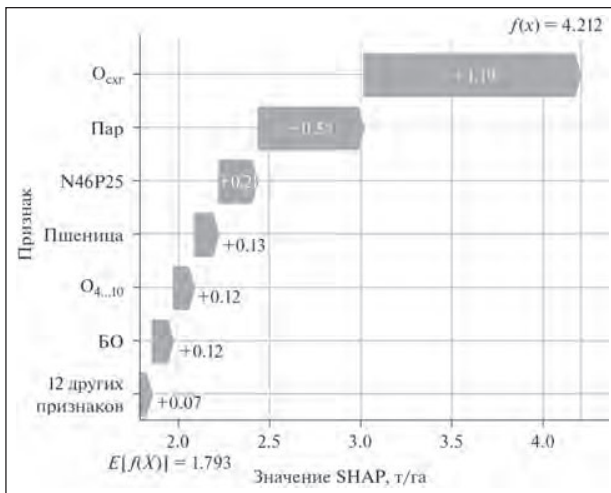


Рис. 4. Каскадная диаграмма значений SHAP для прогнозной модели высокой урожайности пшеницы.

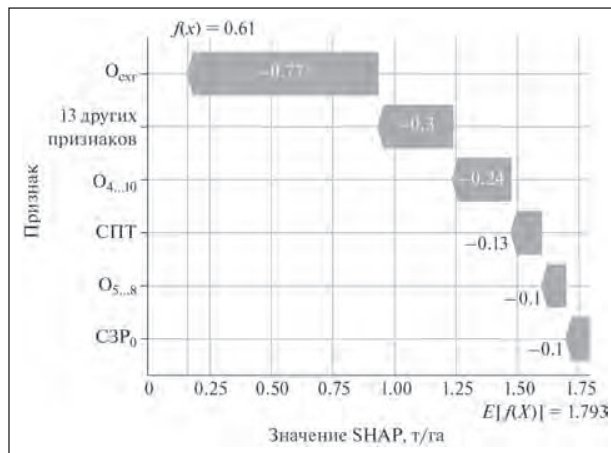


Рис. 5. Каскадная диаграмма значений SHAP для прогнозной модели низкой урожайности пшеницы.

влияние (SHAP=-0,77 т/га). Для сравнения, среднее абсолютное значение SHAP по всей модели составляет 0,23 т/га, что подчеркивает роль влагообеспеченности в варьировании урожайности культуры;

$O_{4...10}$ – недостаток атмосферных осадков в апреле-октябре (246 мм) также снизил урожайность (SHAP=-0,24 т/га). Среднее абсолютное значение SHAP по модели ниже (0,08 т/га), что указывает на значимость этого периода для урожайности пшеницы;

СПТ – высокое значение суммы положительных температур (2527,5 °C) оказало умеренно отрицательное влияние (SHAP=-0,13 т/га). Для сравнения, среднее абсолютное значение SHAP по всей модели составляет 0,14 т/га;

$O_{5...8}$ – низкое количество осадков в период вегетации пшеницы (175 мм) внесло отрицательный вклад (SHAP=-0,10 т/га). Среднее абсолютное значение SHAP для этого признака по всей модели составляет 0,09 т/га;

СЗР₀ – отсутствие применения средств защиты растений также внесло отрицательный вклад (SHAP=-0,10 т/га). Среднее абсолютное значение SHAP по модели составляет 0,07 т/га.

Разница в значениях SHAP между общим анализом построенной модели (рис. 3) и моделями с высокой (рис. 4) и низкой урожайностью культуры (рис. 5) объяс-

няется несколькими ключевыми моментами. Во-первых, значения SHAP следует считать контекстуальными, то есть их рассчитывают для каждого конкретного наблюдения, и они зависят от взаимодействия признаков. В общем анализе значения SHAP усредняют по всей выборке, что может не отражать индивидуальные особенности каждого наблюдения. Например, в случае высокой урожайности благоприятные климатические условия (годы с достаточным и повышенным увлажнением) и применение удобрений могут нивелировать негативное влияние повторного размещения пшеницы, что не всегда отражается в средних значениях по всей модели.

Во-вторых, взаимодействие признаков играет значительную роль в формировании значений SHAP. В конкретных случаях благоприятные или неблагоприятные условия могут усиливать или компенсировать влияние отдельных признаков. Например, при высокой урожайности осадки за сельскохозяйственный год ($O_{\text{ср}}$) имели SHAP 1,19 т/га, что значительно выше среднего абсолютного значений SHAP по всей модели (0,23 т/га). Это подчеркивает, что в конкретных наблюдениях определенные признаки могут оказывать более выраженное влияние на урожайность.

Кроме того, различия в значимости признаков между общим анализом и конкретными наблюдениями также объясняются изменчивостью данных. Значения SHAP могут варьировать из-за случайности и вариативности данных, что в конкретных случаях может привести к более выраженному влиянию определенных признаков. Например, в случае прогнозирования низкой урожайности культуры недостаток осадков с апреля по октябрь ($O_{4...10}$) оказывает значительное отрицательное влияние (SHAP=-0,24 т/га), хотя среднее абсолютное значение SHAP этого признака в целом по модели меньше (0,08 т/га).

SHAP-анализ позволяет детально оценить вклад каждого признака в предсказание модели, но его результаты зависят от контекста и взаимодействия признаков. Конкретные наблюдения могут демонстрировать более выраженное влияние определенных условий и факторов, по сравнению с общим анализом.

В целом, интеграция модели XGBoost с SHAP-анализом показала, что урожайность яровой пшеницы в условиях Алтайского Приобья определяется сложным взаимодействием климатических и агротехнических признаков. Агротехнические приемы могут усиливать положительное влияние благоприятных погодных условий, а также нивелировать негативное воздействие неблагоприятных. Это наблюдение имеет практическое значение для гибкой адаптации технологии возделывания яровой пшеницы к конкретным условиям региона и текущей агрометеорологической ситуации.

Выводы. Интеграция SHAP в структуру предиктивного моделирования значительно повысила интерпретируемость модели прогнозирования урожайности яровой пшеницы, созданной с использованием алгоритма XGBoost. Анализ значений SHAP способствовал более глубокому пониманию предиктивной модели и существенно расширил возможности по проверке эффективности МО в реальных сценариях. Интерпретируемая модель МО позволяет также дифференцировать признаки и выделять наиболее важные из них.

В условиях лесостепи Алтайского Приобья общий SHAP-анализ выявил ключевые признаки, определяющие прогнозную урожайность яровой пшеницы. Десять наиболее значимых признаков, с вкладом более 0,07 т/га, можно расположить в следующий ряд в порядке убывания влияния: атмосферное увлажнение за сельскохозяйственный год, пар и пшеница в качестве

предшественников, сумма положительных температур, удобрение $N_{46}P_{25}$, атмосферное увлажнение за период с мая по август, средства защиты растений ГИФ, осадки за период с апреля по октябрь, отсутствие обработки почвы и защиты растений.

Высокая прогнозная урожайность культуры в условиях полевого опыта достигалась при достаточном атмосферном увлажнении за сельскохозяйственный год (596,5 мм; 1,19 т/га), использовании пара в качестве предшественника (0,58 т/га) и применении азотно-фосфорных удобрений (0,21 т/га). Умеренное положительное влияние оказывали варианты опыта с пшеницей в качестве предшественника (0,13 т/га), отсутствие обработки почвы (0,12 т/га) и атмосферное увлажнение апреля–октября (436,3 мм; 0,12 т/га). Низкая прогнозная урожайность яровой пшеницы обусловлена недостатком увлажнения в течение сельскохозяйственного года (317 мм; –0,77 т/га) и с апреля по октябрь (246 мм; –0,24 т/га). Также умеренное отрицательное влияние оказали высокая сумма положительных температур (2527,5 °С; –0,13 т/га), низкое количество осадков в период вегетации пшеницы (175 мм; –0,10 т/га) и отсутствие средств защиты растений – 0,10 т/га).

Разработанная модель на основе данных временных рядов длительных полевых опытов позволяет проводить детальный анализ того, как различные факторы окружающей среды и управляющие воздействия влияют на урожайность яровой пшеницы. Понимая поведение модели, можно принимать решения на основе ее выводов, а также использовать результаты моделирования при разработке агрономических рекомендаций.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН и Федерального Алтайского научного центра агробиотехнологий в рамках Государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ. 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. Влияние длительного применения органических и минеральных удобрений на урожайность и качество яровой пшеницы / И. В. Понкратенкова, А. Ю. Гаврилова, Г. Е. Мерзлая и др. // *Аграрный вестник Урала*. 2019. № 7(186). С. 39–44.
2. Эффективность использования азота в длительных и краткосрочных опытах агрохимслужбы и Геосети Российской Федерации / В. А. Романенков, М. В. Беличенко, О. В. Рухович и др. // *Агрохимия*. 2020. № 12. С. 28–37. doi: 10.31857/S0002188120120091.
3. Зерновая продуктивность свекловичных севооборотов в зависимости от степени биологизации в условиях Центрального Черноземья / А. С. Акименко, В. И. Свиридов, Т. А. Дудкина и др. // *Земледелие*. 2022. № 3. С. 12–18.
4. Сычев В. Г., Беличенко М. В., Романенков В. А. Результаты мониторинга урожайности сельскохозяйственных культур, продуктивности севооборотов и изменения свойств почв в длительных опытах Географической сети // *Плодородие*. 2017. № 6(99). С. 2–5.
5. Рублюк М. В., Иванов Д. А. Изменение свойств дерново-подзолистой почвы в зависимости от условий осушаемого агроландшафта при возделывании овса в фитоценозе с травами // *Земледелие*. 2023. № 3. С. 8–12.
6. Подлесных И. В., Тарасов С. А., Рубаник Ю. О. Динамика органического углерода почвы в пахотном слое и продуктивность культур почвозащитного агропесопандишафтного комплекса в ЦЧР // *Земледелие*. 2023. № 5. С. 37–41.
7. Bali N., Singla A. Emerging Trends in Machine Learning to Predict Crop Yield and Study Its Influential Factors: A Survey // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022. Vol. 29. P. 95–112. doi: 10.1007/s11831-021-09569-8.
8. Иванов Д. А., Рублюк М. В., Анциферова О. Н. Прогнозирование размещения посевов льна на основе данных мониторинга и ГИС-технологий // *Земледелие*. 2023. № 7. С. 3–6.
9. Страшная А. И., Береза О. В., Кланг П. С. Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах Южного федерального округа // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2021. № 2. С. 111–137. doi: 10.37162/2618-9631-2021-2-111-137.
10. Математические модели и программный комплекс по прогнозированию урожайности сельскохозяйственных культур / Д. А. Благоев, С. В. Митрофанов, В. С. Никитин и др. // *Агротехника и энергообеспечение*. 2019. № 3(24). С. 182–188.
11. Прогнозирование урожайности яровой пшеницы по агрохимическим свойствам в условиях Тетюшского района Республики Татарстан / А. А. Лукманов, Ю. П. Переведенцев, А. Б. Мустафина и др. // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2023. Т. 18. № 3(71). С. 39–45.
12. Panigrahi B., Kathala K. C. R., Sujatha M. A machine learning-based comparative approach to predict the crop yield using supervised learning with regression models // *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 218. P. 2684–2693. doi: 10.1016/j.procs.2023.01.241.
13. Boppudi S. Deep ensemble model with hybrid intelligence technique for crop yield prediction // *Multimedia Tools and Applications*. 2024. Vol. 83. No. 31. P. 75709–75729. doi: 10.1007/s11042-024-18354-1.
14. Applied Deep Learning-Based Crop Yield Prediction: A Systematic Analysis of Current Developments and Potential Challenges / K. Meghraoui, I. Sebari, J. Pilz, et al. // *Technologies*. 2024. Vol. 12. No. 4. P. 43. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7080/12/4/43> (дата обращения: 03.03.2025). doi: 10.3390/technologies12040043.
15. Shingade S. D., Mudhalwadkar R. P. Analysis of crop prediction models using data analytics and ML techniques: a review // *Multimedia Tools and Applications*. 2024. Vol. 83. No. 13. P. 37813–37838. doi: 10.1007/s11042-023-17038-6.
16. Ramesh V., Kumaresan P. Stacked Ensemble Model for Accurate Crop Yield Prediction Using Machine Learning Techniques // *Environmental Research Communications*. 2025. Vol. 7. No. 3. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/adb9c0/pdf> (дата обращения: 03.03.2025). doi: 10.1088/2515-7620/adb9c0.
17. Ryo M. Explainable artificial intelligence and interpretable machine learning for agricultural data analysis //

- Artificial Intelligence in Agriculture*. 2022. Vol. 6. P. 257–265. doi: 10.1016/j.aaaa.2022.11.003.
18. Cartolano A., Cuzzocrea A., Pilato G. Analyzing and assessing explainable AI models for smart agriculture environments // *Multimedia Tools and Applications*. 2024. Vol. 83. P. 37225–37246. doi: 10.1007/s11042-023-17978-z.
 19. Bifarin O. O. Interpretable machine learning with tree-based shapley additive explanations: Application to metabolomics datasets for binary classification // *Plos one*. 2023. Vol. 18. No. 5. P. e0284315. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0284315> (дата обращения: 03.03.2025). doi: 10.1371/journal.pone.0284315.
 20. Interpretable Machine Learning Techniques for an Advanced Crop Recommendation Model / M. Bouni, B. Hssina, K. Douzi, et al. // *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2024. Vol. 2024. No. 1. P. 7405217. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2024/7405217> (дата обращения: 03.03.2025). doi: 10.1155/2024/7405217.
 21. Степанова А. И., Хальясмаа А. И., Матренин П. В. Краткосрочное прогнозирование нагрузки предприятия нефтегазовой промышленности с использованием технологических факторов и аддитивного объяснения Шепли // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2024. Т. 26. № 4. С. 75–88. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-4-75-88.
 22. Горшенин А. Ю., Грицай А. С., Денисова Л. А. Применение машинного обучения деревьев решений для краткосрочного прогнозирования электропотребления // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023. № 11. С. 226–231. doi: 10.24412/2071-6168-2023-11-226-227.
 23. Бадыкова И. Р., Биктимирова К. Р. Выявление факторов воздействия на сектор связи и телекоммуникаций с применением ансамблевых методов машинного обучения // *π-Economy*. 2024. Т. 17. № 6. С. 61–78. doi: 10.18721/JE.17604.
 24. Интерпретируемые модели машинного обучения как инструмент объяснения прогнозных оценок в кардиологии / К. И. Шахгельдян, В. Ю. Рублев, Н. С. Куксин и др. // *Вестник современной клинической медицины*. 2025. Т. 18. № 1. С. 98–106. doi: 10.20969/VSKM.2025.18(1).98-106.
 25. Friedman J. H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine // *Annals of statistics*. 2001. Vol. 29. No. 5. P. 1189–1232. URL: <https://www.jstor.org/stable/2699986> (дата обращения: 03.03.2025).
 26. From Local Explanations to Global Understanding With Explainable AI for Trees / S. M. Lundberg, G. Erion, H. Chen, et al. // *Nature Machine Intelligence*. 2020. Vol. 2. No. 1. P. 56–67. doi: 10.1038/s42256-019-0138-9.
 27. Программа анализа и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур (CYAF – Crop Yield Analysis & Forecast) / Д. С. Федоров, О. К. Альсова, В. К. Каличкин и др. // *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021777894*, 08.11.2021.
 28. Разработка программы анализа и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур / В. К. Каличкин, Д. С. Федоров, О. К. Альсова и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 1. С. 51–56. doi: 10.53859/02352451_2022_36_1_51.

Поступила в редакцию 12.03.2025

После доработки 31.03.2025

Принята к публикации 15.04.2025

Хранение и переработка сельскохозяйственной продукции

УДК 543.429.22:577.334

DOI 10.31857/S2500262725020126 EDN DFMGZH

ПРИМЕНЕНИЕ ЭПР-СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФАКТА ОБЛУЧЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ СЕМЯН ПШЕНИЦЫ© 2025 г. **И. М. Меджидов, В. А. Харламов**, кандидат биологических наук, **Н. Н. Лой**, кандидат биологических наук, **Д. И. Титова**, кандидат биологических наук*Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
249035, Калужская обл., Обнинск, Киевское ш., 1, корп. 1
E-mail: immedzhidov@mail.ru*

Исследование проводили с целью изучения возможности применения спектрометрии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) для идентификации факта облучения низкоэнергетическими электронами семян яровой пшеницы. Радиационную обработку семян сорта Ирень (урожай 2023 г., репродукция 1) проводили спустя год после сбора урожая с использованием электронного облучения с энергией 100 и 120 кэВ в дозах 1...5 кГр с шагом 1 кГр (мощность – 100 Гр/имп.). Необлученные семена использовали в качестве контроля. Семена после облучения хранили без доступа света при комнатной температуре и влажности не более 60 %. Спектрометрию проводили спустя 14, 28 дней, 3 и 6 месяцев после облучения. Изучали изменения сигнала ЭПР в зависимости от дозы облучения, а также скорость его ослабления с течением времени. Отмечено возрастание интенсивности ЭПР-сигнала с увеличением дозы облучения. Разница в амплитуде сигнала между образцами, обработанными при 100 и 120 кэВ, в зависимости от дозы через 14 дней достигала 8...55 %, через 28 дней – 12...62 % ($p \leq 0,05$). В первые 14 и 28 дней после облучения зарегистрировано значительное снижение интенсивности сигнала в зависимости от дозы на 16...38 % (100 кэВ) и 16...32 % (120 кэВ). Спустя 3 месяца интенсивность сигнала уменьшалась на 5...25 % (100 кэВ) и 5...47 % (120 кэВ) относительно данных 28-го дня. Через 6 месяцев интенсивность сигнала уменьшилась на 26...33 % (100 кэВ) и 26...41 % (120 кэВ), по сравнению с трехмесячными данными. Величина g-фактора (в точке пересечения первой производной ЭПР-сигнала с нулевой линией) составляла 2,0048, что свидетельствует о присутствии углерод-центрированных радикалов.

APPLICATION OF EPR SPECTROMETRY FOR IDENTIFYING THE IRRADIATION OF WHEAT SEEDS WITH LOW-ENERGY ELECTRONS**I. M. Medzhidov, V. A. Kharlamov, N. N. Loy, D. I. Titova***Russian Institute of Radiology and Agroecology
National Research Centre «Kurchatov Institute»,
249035, Kaluzhskaya obl., Obninsk, Kievskoe sh., 1, korp. 1
E-mail: immedzhidov@mail.ru*

The study aimed to investigate the applicability of electron paramagnetic resonance (EPR) spectrometry for detecting the radiation treatment of spring wheat seeds using low-energy electrons. Seeds of the Iren variety (2023 crop, first reproduction) were irradiated one year after harvesting with electrons at energies of 100 and 120 keV over a dose range of 1...5 kGy (step 1 kGy), dose rate was 100 Gy/imp. Non-irradiated seeds served as the control. After irradiation, the seeds were stored in the dark at room temperature and relative humidity below 60 %. EPR spectrometry was performed 14, 28 days, 3 and 6 months after irradiation. The dose dependence of the EPR signal and its attenuation over time were studied. An increase in EPR signal intensity with increasing dose was observed. The difference in signal amplitude between samples irradiated at 100 and 120 keV, depending on the dose, reached 8...55 % at day 14 and 12...62 % at day 28 ($p \leq 0,05$). In the first 14–28 days, the signal decreased by 16...38 % (100 keV) and 16...32 % (120 keV), depending on the dose. After 3 months, the intensity decreased by 5...25 % (100 keV) and 5...47 % (120 keV), relative to the data of day 28. After 6 months, the signal intensity decreased by 26...33 % (100 keV) and 26...41 % (120 keV) relative to the 3-month data. The g-factor (at the zero-crossing point of the first derivative of the EPR signal) was 2.0048, confirming the presence of carbon-centred radicals.

Ключевые слова: пшеница (*Triticum aestivum* L.), семена, низкоэнергетическое электронное излучение, ЭПР-спектрометрия.

Keywords: wheat, seeds, low-energy electron radiation, EPR spectrometry.

Согласно информации, предоставленной Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО), мировые потери растениеводческой продукции составляют от 10 до 30 % [1]. Основные их причины – различные заболевания растений, вызываемые микроорганизмами (фитопатогенами), а также насекомые-вредители. В связи с этим возникает необходимость применения средств защиты растений.

Для борьбы с болезнями и вредителями растений активно применяют агрохимикаты. Однако у них есть

ряд недостатков, среди которых можно выделить токсичность для людей и окружающей среды, а также загрязнение почвы и грунтовых вод [2]. В качестве альтернативы предлагают радиационные технологии, которые более эффективны и безопасны для окружающей среды [3].

Радиационную обработку сельскохозяйственных продуктов можно проводить с использованием гамма-излучения (^{60}Co или ^{137}Cs), электронного излучения с энергией до 10 МэВ и тормозного излучения до 5 МэВ [4]. Для эффективной защиты зерна от бакте-

рий и грибов без негативного воздействия на пищевые качества необходима доза до 10 кГр [3], для уничтожения насекомых – 0,1...1,0 кГр [3, 5]. Такие параметры подходят для обработки семян, не предназначенных для посева.

В литературе [6] охарактеризован способ предпосевной обработки семян низкоэнергетическими (до 300 кэВ) электронами, при котором глубина проникновения излучения настолько мала, что позволяет избежать повреждения зародыша. Такие электронные ускорители представляют собой электронно-физические устройства и не содержат радиоактивных изотопов. У семян зерновых после обработки низкоэнергетическими электронами снижается зараженность фитопатогенами, ростовые показатели при этом существенно не нарушаются или даже улучшаются [6, 7].

Хотя радиационная обработка сельхозпродуктов имеет доказанные преимущества, существуют опасения в отношении такого подхода. Правила, установленные объединенными комитетами Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) и Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), предписывают предотвращать чрезмерное или повторное облучение продуктов [4]. Для проверки соответствия продуктов требованиям безопасности используют специальные методы идентификации [8, 9]. Ионизирующее излучение вызывает образование в облучаемом материале свободных радикалов (парамагнитных частиц). Их количество зависит от поглощенной дозы излучения. Один из наиболее чувствительных методов идентификации факта облучения – спектрометрия на основе электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Он предусматривает изучение материалов с неспаренными электронами. Идентификация происходит путем поглощения магнитного поля объектом исследования и продуцированием квантовых переходов между энергетическими уровнями. Этот метод регламентируют российские (ГОСТ 31672-2012, ГОСТ 31652-2012, ГОСТ Р 52529-2006 и др.) и европейские (EN13708:2001, EN 1787:2000 и т.д.) стандарты.

Цель исследования – выявление возможности применения ЭПР-спектрометрии для идентификации факта облучения низкоэнергетическими электронами семян яровой пшеницы.

Для ее достижения решали следующие задачи: оценить связи между интенсивностью ЭПР-сигнала семян пшеницы и дозой облучения; изучить изменения динамики сигнала ЭПР со временем; проанализировать возможности и ограничения использования метода ЭПР-спектрометрии для определения факта облучения.

Методика. Объектом исследования служили семена яровой пшеницы сорта Ирень урожая 2023 г. I репродукции. Их облучали спустя год после сбора урожая на широкоапертурном ускорителе электронов «Дуэт» (Томск, Россия) с энергией 100 и 120 кэВ в диапазоне доз от 1 до 5 кГр с шагом 1 кГр. Необлученные семена использовали в качестве контроля. После облучения их помещали в полиэтиленовые пакеты и до пробоподготовки хранили при комнатной температуре без доступа света и относительной влажности не более 60 % в течение 14 суток. Далее семена измельчали в кофемолке «Kitfort» и просеивали через сито 0,5 мм. Из каждого образца отбирали по 30 мг вещества и помещали в кварцевую пробирку диаметром 4 мм. ЭПР-спектры образцов регистрировали с использованием спектрометра ESR70-03 XD/2 (Минск, Беларусь) на микроволновой полосе X. Частота СВЧ составляла 9,4 ГГц.

Для повторных учетов (через 28 дней, 3 и 6 месяцев) образцы хранили в этих же пробирках в течение всего срока измерений. Эксперименты проводили в трех повторностях, по три пробирки на каждую повторность.

Параметры ЭПР-спектрометра во время регистрации были следующими: середина поля – 3350 Э; диапазон поля – 1000 Э; частота модуляции – 100 кГц; модуляция – 4 Э; мощность СВЧ – 50 мВт; коэффициент усиления – 50; время снятия спектра – 600 с.

G-фактор – параметр, который позволяет установить спин электрона и определить свойства парамагнитного центра. Его определяли по формуле:

$$h\nu = g\mu_B B$$

где h – постоянная Планка; ν – СВЧ-частота X-диапазона; μ_B – магнетон Бора; B – выбранная точка магнитного поля (Тл).

Результаты анализировали с использованием Microsoft Excel 2022. Для каждой точки измерений рассчитывали среднее значение и стандартную ошибку. Статистическую значимость различий между облученными образцами и контролем, а также между опытными группами, полученными при различных энергиях (100 и 120 кэВ) и при одинаковых дозах, оценивали с при-

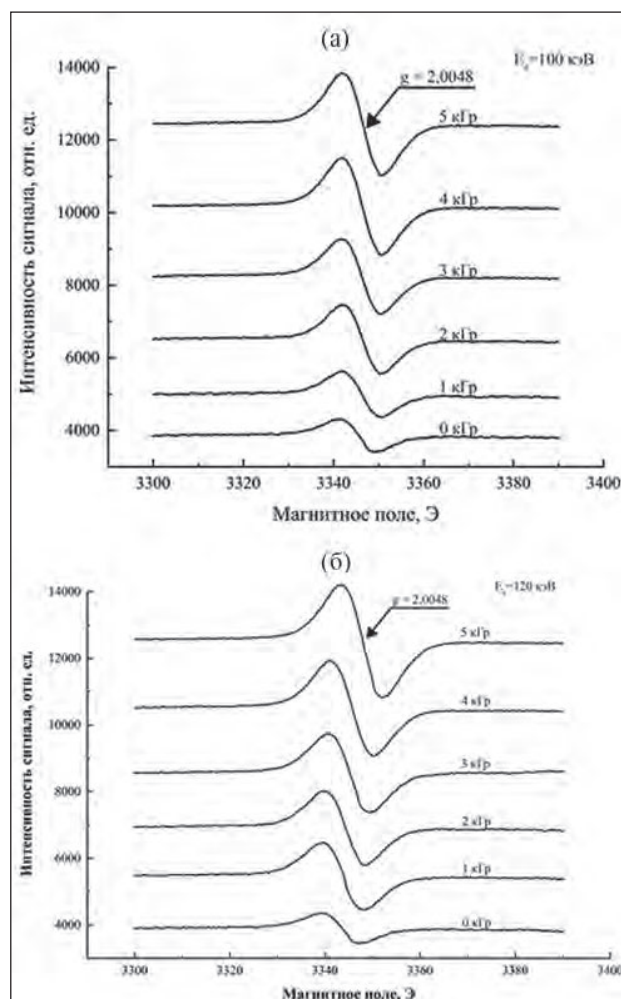


Рис. 1. ЭПР-спектры образцов семян пшеницы, зарегистрированные спустя 14 дней после облучения электронами: а) энергия 100 кэВ; б) энергией 120 кэВ.

менением t-критерия Стьюдента. Уровень значимости принимали равным $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение. Результаты анализа ЭПР-спектров семян пшеницы, полученных через 14 дней после радиационной обработки, демонстрируют увеличение интенсивности сигнала прямо пропорционально поглощенной дозе. Этот факт свидетельствует о перспективности использования ЭПР-спектрометрии для идентификации облученных семян пшеницы. Следует отметить, что контрольный образец также демонстрировал наличие слабого сигнала, обусловленного естественным фоновым уровнем свободных радикалов. Отмечена зависимость между энергией электронов и количеством образующихся свободных радикалов. В частности, амплитуда сигнала образца, облученного дозой 1 кГр при энергии электронов 100 кэВ, составляла 1260 отн. ед., а образца, облученного той же дозой, но при энергии электронов 120 кэВ, – 2190 отн. ед. (рис. 1). Увеличение амплитуды сигнала с ростом энергии электронов зарегистрировано для всех исследованных образцов. Это, вероятно, связано с увеличением проникающей способности электронов при повышении их энергии, что приводит к образованию свободных радикалов в более глубоких слоях зерна пшеницы. Известно [6], что глубина проникновения низкоэнергетического излучения с энергией 100 кэВ составляет 0,1 мм (100 мкм), 120 кэВ – 0,15 мм (150 мкм), это подтверждает выявленную закономерность увеличения интенсивности ЭПР-сигнала при повышении энергии электронов из-за образования свободных радикалов в более глубоких слоях зерна. Значение g-фактора для всех образцов оставалось стабильным и составляло 2,0048, что указывает на наличие углерод-центрированных радикалов.

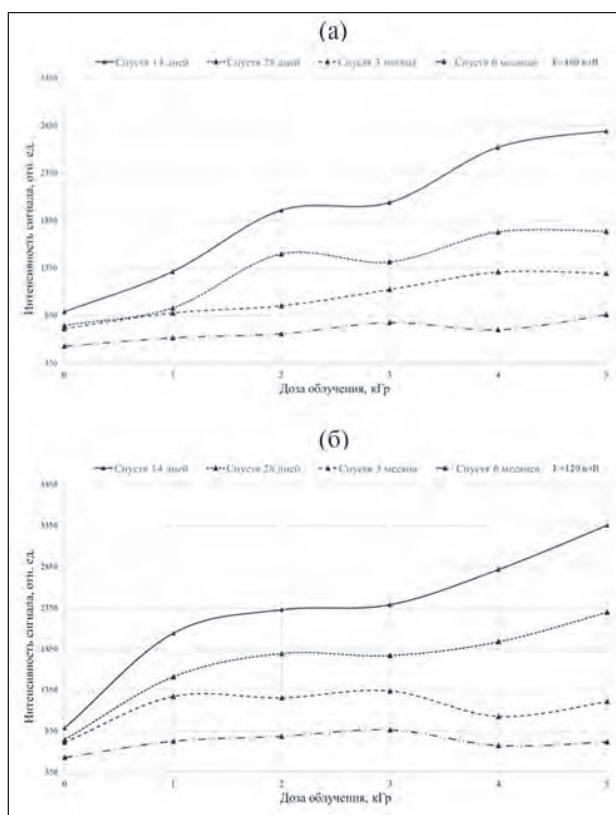


Рис. 2. Кинетика распада свободных радикалов в образцах пшеницы, облученных электронами, с течением времени: а) энергия 100 кэВ ; б) энергия 120 кэВ .

Для образцов, подвергнутых воздействию электронов с энергией 100 кэВ, спустя 14 дней после облучения в дозах 1...5 кГр средняя интенсивность сигнала варьировала от $892 \pm 15,4$ до $2793,7 \pm 3,8$ отн. ед., демонстрируя отчетливую дозозависимую закономерность. В дальнейшем наблюдали постепенное снижение интенсивности, обусловленное распадом свободных радикалов, индуцированных ионизирующим излучением. Через 28 дней регистрируемая интенсивность уменьшилась в среднем на 16...38 % в зависимости от дозы облучения, что соответствовало диапазону значений от $746,7 \pm 4,2$ до $1739 \pm 4,2$ отн. ед. В последующие месяцы скорость затухания сигнала замедлилась, что свидетельствует о дифференцированной кинетике распада радикалов различной природы. Через 3 месяца интенсивность снизилась до $715,7 \pm 7,4$... $1295,3 \pm 5,2$ отн. ед., что эквивалентно дополнительному ослаблению сигнала на 5...25 %, по сравнению с предыдущим этапом наблюдений. По истечении 6 месяцев она достигла $530,7 \pm 6,5$... $862,7 \pm 1,8$ отн. ед., отражая снижение на 26...33 % относительно данных трехмесячного периода (рис. 2). Общее снижение интенсивности сигнала спустя 6 месяцев, по сравнению с 14-и дневным периодом для образцов, облученных электронами с энергией 100 кэВ, составило 41...69 % в зависимости от дозы облучения. Во всех случаях различия между облученными образцами и контролем были статистически значимыми ($p \leq 0,05$).

Аналогичные закономерности отмечены и для образцов, облученных электронами с энергией 120 кэВ. Однако, как было отмечено ранее, на 14-е сутки интенсивность ЭПР-сигнала в этой группе оказалась несколько выше и находилась в диапазоне $892 \pm 15,4$... $3357 \pm 7,8$ отн. ед. в зависимости от дозы, что обусловлено увеличением глубины проникновения электронов и формированием большего количества радикалов в структуре зерна. К 28-у дню снижение составило 16...32 %, а интенсивность соответствовала диапазону $746,7 \pm 4,2$... $2298,7 \pm 9,6$ отн. ед. Далее темпы затухания сигнала несколько замедлились, что отразилось в снижении интенсивности через 3 месяца до $715,7 \pm 7,4$... $1209,7 \pm 24,3$ отн. ед. Это эквивалентно ослаблению сигнала на 5...47 %, по сравнению с предыдущим этапом. Спустя 6 месяцев интенсивность составила $530,7 \pm 6,5$... $720,7 \pm 2,2$ отн. ед., что отражает уменьшение на 26...41 %, по сравнению с трехмесячными данными (см. рис. 2). Общее снижение интенсивности сигнала спустя 6 месяцев относительно 14-и дневного периода для образцов, облученных электронами с энергией 120 кэВ, составило 41...78 % в зависимости от дозы облучения. Во всех случаях различия между облученными образцами и контролем были статистически значимыми ($p \leq 0,05$).

Сопоставление результатов, полученных при различных энергиях облучения, демонстрирует, что на ранних этапах (14...28 дней) интенсивность сигнала при 120 кэВ была достоверно выше, чем при 100 кэВ. Разница в зависимости от дозы через 14 дней составляла от 8 до 55 %, через 28 дней – от 12 до 62 % ($p \leq 0,05$ для всех доз). Особенно заметное усиление интенсивности сигнала при 120 кэВ наблюдали в интервале доз 1...3 кГр. Помимо эффекта от увеличения глубины проникновения электронов в структуру зерна, это также свидетельствует о повышенной эффективности генерации стабильных радикальных форм в группе, облученной при 120 кэВ. Однако на поздних сроках хранения (3 и 6 месяцев) различия между двумя сериями становились менее выраженными. Через 3 месяца превосходство 120 кэВ

при дозах 1...3 кГр все еще сохранялось (разница составляла 15...44 %, $p \leq 0,05$), но для высоких доз (4...5 кГр) оно нивелировалось. Через 6 месяцев различия были незначительными или даже в отдельных случаях наблюдали большее затухание сигнала в группе 120 кэВ, что, вероятно, связано с ускоренной релаксацией радиационно-индуцированных радикалов при более глубоком проникновении электронов. Это указывает на схожие кинетические закономерности деструкции парамагнитных центров в обоих вариантах облучения на поздних этапах.

В ходе регистрации сигнала на протяжении всего эксперимента все образцы находились в кварцевых пробирках с крышкой в атмосферном воздухе и при комнатной температуре. Подобный режим хранения мог способствовать ускоренному распаду радиационно-индуцированных радикалов из-за влияния кислорода и отсутствия герметичной среды. Даже в контрольных образцах, не подвергавшихся облучению, регистрировали постепенное снижение интенсивности сигнала – с $892 \pm 15,4$ отн. ед. на 14-е сутки до $530,7 \pm 6,5$ отн. ед. через 6 месяцев. Это, вероятно, связано с распадом природных стабильных радикалов, уже присутствующих в структуре зерна до начала эксперимента. Фоновый ЭПР-сигнал в контрольной группе мог быть обусловлен воздействием ультрафиолетового и коротковолнового солнечного излучения в период вегетации растения, что способствовало накоплению фотохимически-индуцированных свободных радикалов в клеточных структурах. Кроме того, возможным источником сигнала служит естественное радиационное фоновое излучение окружающей среды, а также процессы окислительно-восстановительного характера в составе биоматериала – в частности, самопроизвольное образование свободных радикалов в результате окисления липидов и других компонентов при хранении. Совокупность этих факторов могла сформировать исходный уровень сигнала в контрольных образцах, который демонстрировал тенденцию к снижению интенсивности с течением времени.

Такие результаты согласуются с ранее опубликованными данными [10], указывающими на аналогичную динамику изменения ЭПР-сигнала во времени в облученных органических матрицах. Авторами представлен общий вид спектров радиационно-индуцированного сигнала ЭПР после облучения образцов пшеницы в дозах от 1 до 27 кГр низкоэнергетическим пучком электронов с энергией 500 кэВ. Характер спектров схож с результатами, полученными в нашей работе, хотя энергия низкоэнергетических электронов была гораздо ниже – 100...120 кэВ. Кинетику распада радикалов в условиях эксперимента прослеживали спустя полгода наблюдений.

Особенность обработки низкоэнергетическим излучением – формирование высокой поглощенной дозы только в поверхностных слоях зерна пшеницы. При этом ростовые показатели (энергия прорастания, всхожесть, длина ростка и корешка) не нарушаются, поскольку зародыш семени занимает малую площадь в нижней части спинной стороны зерновки и количество импульсов низкоэнергетических электронов в зародыше меньше, чем в самой зерновке [6, 7].

Выводы. Результаты исследований свидетельствуют о наличии потенциала у использования спектрометрии электронного парамагнитного резонанса в качестве метода выявления факта облучения семян пшеницы в диапазоне доз от 1 до 5 кГр при энергии электронов 100 и 120 кэВ, что подтверждает линейная зависимость интенсивности сигнала от поглощенной дозы. Снижение

различий между сигналами образцов с разными дозами в течение времени ограничивает применение метода для точного дозиметрического контроля. Спустя 6 месяцев после облучения интенсивность сигнала в зависимости от дозы уменьшилась на 41...69 % (100 кэВ) и 41...78 % (120 кэВ), по сравнению с данными, полученными на 14-е сутки после облучения, что необходимо учитывать при идентификации факта облучения продукции спустя продолжительный период после процесса радиационной обработки.

Сравнение результатов при энергиях 100 и 120 кэВ показало, что на ранних этапах (14 и 28 суток) во всех дозовых группах интенсивность сигнала при 120 кэВ была статистически достоверно ($p \leq 0,05$) выше, что связано с большей глубиной проникновения электронов и, как следствие, более выраженным эффектом радиационного воздействия. Разница при отдельных дозах достигала 55 %. На более поздних сроках (3 и 6 месяцев) различия между сериями частично сохранялись, однако статистические различия наблюдали не во всех дозовых группах. Величина g-фактора, равная 2,0048, указывает на наличие в исследуемых образцах углерод-центрированных радикалов.

Кинетика затухания сигнала ЭПР носит двухфазный характер. В первые 14...28 дней после облучения происходит его интенсивное снижение, достигающее в зависимости от дозы облучения 16...38 % (100 кэВ) и 16...32 % (120 кэВ), по сравнению с результатами, зафиксированными на 14 день после, что связано с распадом короткоживущих радикалов. В последующий период скорость затухания снижается и спустя 3 месяца интенсивность сигнала уменьшается в среднем на 4...25 % (100 кэВ) и 4...47 % (120 кэВ), по сравнению с предыдущим этапом наблюдений, что свидетельствует о формировании более стабильных радикальных форм, сохраняющихся в течение длительного времени. По истечении 6 месяцев интенсивность сигнала уменьшилась на 26...33 % (100 кэВ) и 26...41 % (120 кэВ) отн. ед. относительно данных трехмесячного периода.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена в рамках государственного задания по Программе деятельности Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (проект 5ф6.1).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. *FAO. Moving forward on food loss and waste reduction / FAO – The State of Food and Agriculture 2019. – Rome: FAO, 2019. 182 p. ISBN 978-92-5-131789-1. URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/11f9288f-dc78-4171-8d02-92235b8d7dc7/content> (дата обращения: 04.03.2025). doi: 10.4060/CA6030EN.*
2. *Spence N., Hill L., Morris J. How the global threat of pests and diseases impacts plants, people, and the planet // Plants, People, Planet. 2020. Vol. 2. No. P. 5–13. doi: 10.1002/ppp3.10088.*
3. *Козьмин Г. В., Гераськин С. А., Санжарова Н. И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.*

4. Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. *Wholesomeness of irradiated food. Technical report Series 659*. Geneva: World Health Organization, 1981. 34 p.
5. Закладной Г. А. Радиационная дезинсекция зерна монография. М.: Центр подготовки специалистов, 2020. 150 с.
6. Предпосевная обработка семян яровой пшеницы импульсным электронным пучком в атмосфере / С. Ю. Дорошкевич, К. П. Артемов, Н. Н. Терещенко и др. // *Химия высоких энергий*. 2021. Т. 55. № 4. С. 326–332. doi: 10.31857/S0023119321040069.
7. Действие предпосевного электронного излучения на развитие проростков ячменя и активность ферментов и фитогормонов / Н. Н. Лой, Н. И. Санжарова, Е. А. Казакова и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2023. № 2. С. 21–24. doi: 10.31857/S2500262723020059.
8. Zanardi E., Caligiani A., Novelli E. New insights to detect irradiated food: an overview // *Food Analytical Methods*. 2018. Vol. 11. No. 1. P. 224–235. doi: 10.1007/s12161-017-0992-1.
9. Guzik G. P., Michalik J. European inter-comparison studies as a tool for perfecting irradiated food detection methods // *Nukleonika*. 2021. Vol. 66. No. 3. P. 91–97. doi: 10.2478/nuka-2021-0013.
10. Electron paramagnetic resonance signal in wheat seeds irradiated with low-energy electron beam / R. A. Vazirov, A. A. Narkhova, E. N. Vazirova, et al. // *Radiation Physics and Chemistry*. 2023. Vol. 208. Article 110934. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X23001792?via%3Dihub> (дата обращения: 04.03.2025). doi: 10.1016/j.radphyschem.2023.110934.

Поступила в редакцию 07.03.2025

После доработки 24.03.2025

Принята к публикации 15.04.2025

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 элементарном анализе приводить только усредненные данные.
6. Используемая литература приводится в порядке очередности упоминания, в тексте – цифровые ссылки в квадратных скобках. Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. Доля ссылок на источники старше 10 лет не должна превышать 30 % списка литературы, доля ссылок на публикации в журналах из ядра РИНЦ за последние 8 лет должна составлять не менее 50 % списка литературы. Желательны ссылки на журналы, входящие в 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 (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.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-63275 от 6 октября 2015 г.,
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Подписано к печати 26.05.2025. Дата выхода в свет 09.06.2025. Формат 60 × 88 ⅛.
Усл. печ. л. 9,0. Уч.-изд. л. 10,8. Тираж 79 экз. Заказ 821. Цена свободная.

Учредитель: Российская академия наук

Издатель: Российская академия наук, 119991 Москва, Ленинский просп., 14
Исполнитель по контракту № 4У-ЕП-020-2-25 ФГБУ «Издательство «Наука»
121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
Отпечатано в ФГБУ «Издательство «Наука»
121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Журналы РАН, выходящие в свет на русском языке

- Автоматика и телемеханика
 Агрохимия
 Азия и Африка сегодня
 Акустический журнал
 Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы
 Астрономический журнал
 Биологические мембраны
 Биология внутренних вод
 Биология моря
 Биоорганическая химия
 Биофизика
 Биохимия
 Ботанический журнал
 Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук
 Вестник древней истории
 Вестник Российской академии наук
 Вестник российской сельскохозяйственной науки
 Водные ресурсы
 Вопросы истории естествознания и техники
 Вопросы ихтиологии
 Вопросы языкознания
 Вулканология и сейсмология
 Высокомолекулярные соединения. Серия А
 Высокомолекулярные соединения. Серия Б
 Высокомолекулярные соединения. Серия С
 Генетика
 Геология рудных месторождений
 Геомагнетизм и аэрономия
 Геоморфология и палеогеография
 Геотектоника
 Геохимия
 Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология
 Государство и право
 Дефектоскопия
 Дифференциальные уравнения
 Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления
 Доклады Российской академии наук. Науки о жизни
 Доклады Российской академии наук. Науки о Земле
 Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки
 Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах
 Журнал аналитической химии
 Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова
 Журнал вычислительной математики и математической физики
 Журнал неорганической химии
 Журнал общей биологии
 Журнал общей химии
 Журнал органической химии
 Журнал прикладной химии
 Журнал физической химии
 Журнал эволюционной биохимии и физиологии
 Журнал экспериментальной и теоретической физики
 Записки Российского минералогического общества
 Зоологический журнал
 Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа
 Известия Российской академии наук. Механика твердого тела
 Известия Российской академии наук. Серия биологическая
 Известия Российской академии наук. Серия географическая
 Известия Российской академии наук. Серия литературы и языка
 Известия Российской академии наук. Серия физическая
 Известия Российской академии наук. Теория и системы управления
 Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана
 Известия Российской академии наук. Энергетика
 Известия Русского географического общества
 Исследование Земли из космоса
 Кинетика и катализ
 Коллоидный журнал
 Координационная химия
 Космические исследования
 Кристаллография
 Латинская Америка
 Лёд и Снег
 Лесоведение
 Литология и полезные ископаемые
 Мембраны и мембранные технологии
 Металлы
 Микология и фитопатология
 Микробиология
 Микроэлектроника / Russian Microelectronics
 Молекулярная биология
 Нейрохимия
 Неорганические материалы
 Нефтехимия
 Новая и новейшая история
 Общественные науки и современность
 Общество и экономика
 Океанология
 Онтогенез
 Палеонтологический журнал
 Паразитология
 Петрология
 Письма в Астрономический журнал
 Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики
 Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования
 Почвоведение
 Приборы и техника эксперимента
 Прикладная биохимия и микробиология
 Прикладная математика и механика
 Проблемы Дальнего Востока
 Проблемы машиностроения и надежности машин
 Проблемы передачи информации
 Программирование
 Психологический журнал
 Радиационная биология. Радиоэкология
 Радиотехника и электроника
 Радиохимия
 Расплавы
 Растительные ресурсы
 Российская археология
 Российская история
 Российская сельскохозяйственная наука
 Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова
 Русская литература
 Русская речь
 Сенсорные системы
 Славяноведение
 Современная Европа
 Социологические исследования
 Стратиграфия. Геологическая корреляция
 США & Канада: экономика, политика, культура
 Теоретические основы химической технологии
 Теплофизика высоких температур
 Успехи современной биологии
 Успехи физиологических наук
 Физика Земли
 Физика и химия стекла
 Физика металлов и металловедение
 Физика плазмы
 Физикохимия поверхности и защита материалов
 Физиология растений
 Физиология человека
 Химическая физика
 Химия высоких энергий
 Химия твердого топлива
 Цитология
 Человек
 Экология
 Экономика и математические методы
 Электрохимия
 Энтомологическое обозрение
 Этнографическое обозрение
 Ядерная физика