

ISSN 2500-2627

Номер 6

Ноябрь - Декабрь 2023



РОССИЙСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ НАУКА

www.sciencejournals.ru

Научно-теоретический журнал



Растениеводство, защита и биотехнология растений

- Розенцвет О. А., Богданова Е. С., Рубцов С. Л., Бакунов А. Л., Милехин А. В., Нестеров В. Н.**
Физиолого-биохимические признаки засухоустойчивости растений картофеля 3
- Косолапов В. М., Думачева Е. В., Сайфутдинова Л. Д.**
Селекция люцерны изменчивой на создание интенсивных сортов с высокой кормовой продуктивностью: результаты и перспективы 9
- Шуплецова О. Н., Товстик Е. В., Щенникова И. Н.**
Изменение содержания полифенолов в растениях ячменя на стрессовых почвенных фонах 15
- Дубовик Д. В., Дубовик Е. В., Шумаков А. В., Кривошеев С. И.**
Экологическая пластичность, урожайность и качество зерна различных сортов сои в условиях Курской области 20
- Юсова О. А., Николаев П. Н., Васюкевич В. С.**
Фотосинтетическая активность как фактор формирования урожайности и качества нового зернофуражного сорта овса Иртыш 33 25
- Шаболкина Е. Н., Шевченко С. Н., Анисимкина Н. В.**
Аминокислотный состав белков пленчатого и голозерного овса 29
- Волкова Г. В., Яхник Я. В.**
Чувствительность возбудителя сетчатой пятнистости листьев ячменя (*Pyrenophora teres* Drechsler) к фунгицидам 33
- Путилина Л. Н., Лазутина Н. А.**
Изменение технологического качества и продуктивности сахарной свёклы в результате обработки вегетирующих растений фунгицидами 38

Земледелие и мелиорация

- Савин И. Ю., Блохин Ю. И., Чинилин А. В.**
Методология оперативного мониторинга состояния посевов на основе технологий интернета вещей 43
- Усенко В. И., Гаркуша А. А., Литвинцева Т. А., Дерянова Е. Г., Щербакова А. А., Кобзева И. А.**
Урожай яровой пшеницы при комплексном агротехнологическом воздействии в условиях различного увлажнения юга Западной Сибири 47

Зоотехния и ветеринария

- Бисембаев А. Т., Амерханов Х. А., Юлдашбаев Ю. А., Касенов Ж. М., Жали С. Т., Чиндалиев А. Е., Баймуканов Д. А., Демин В. А.**
Результаты индексной оценки живой массы крупного рогатого скота казахской белоголовой и герефордской породы 55
- Сафонов В. А., Ермилова Т. С., Черницкий А. Е.**
Зависимость скорости роста ремонтных тёлочек от их обеспеченности микроэлементами во внутриутробный период 59
- Баркова О. Ю., Старикова Д. А., Чистякова И. В.**
Корреляционный анализ уровня экспрессии генов PRM1, STK35 и IFT27 с показателями качества семени быков голштинской породы 63

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

- Шахов В. А., Пушко В. А., Бойко И. Г., Герасименко В. В., Учкин П. Г.**
Совершенствование процесса дозирования ультрадисперсных частиц при вибрационно-электромеханическом смешивании 67

Crop Production, Plant Protection and Biotechnology

- Rozentsvet O. A., Bogdanova E. S., Rubtsov S. L., Bakunov A. L., Milekhin A. V., Nesterov V. N.**
Physiological and biochemical features of drought resistance of potato plants 3
- Kosolapov V. M., Dumacheva E. V., Sajfutdinova L. D.**
Selection of alfalfa variegated on creation of intensive varieties with high fodder productivity: results and prospects 9
- Shupletsova O. N., Tovstik E. V., Shchennikova I. N.**
Reaction of barley varieties on the content of polyphenols on stress soil backgrounds 15
- Dubovik D. V., Dubovik E. V., Shumakov A. V., Krivosheev S. I.**
Ecological plasticity, yield and grain quality of various soybean varieties under the conditions of Kursk Region 20
- Yusova O. A., Nikolaev P. N., Vasyukevich V. S.**
Photosynthetic activity – as a factor in the formation of yield and quality of the new grain fodder oat variety Irtys 33 25
- Shabolkina E. N., Shevchenko S. N., Anisimkina N. V.**
Amino acid composition of proteins of hulled and naked oats 29
- Volkova G. V., Yakhnik Ya. V.**
Sensitivity of the causative agent of net blotch of barley (*Pyrenophora teres* Drechsler) to fungicides 33
- Putilina L. N., Lazutina N. A.**
Change of sugar beet technological quality and productivity as a result of vegetating plants treatment with fungicides 38

Farming and Amelioration

- Savin I. Yu., Blokhin Yu. I., Chinilin A. V.**
Methodology of operational monitoring of crop status based on the internet of things technologies 43
- Usenko V. I., Garkusha A. A., Litvintseva T. A., Deryanova E. G., Shcherbakova A. A., Kobzeva I. A.**
Spring wheat harvest under complex agrotechnological influence in conditions of various humidification of the south of Western Siberia 47

Animal Science and Veterinary Medicine

- Bissembayev A. T., Amerkhanov Kh. A., Yuldashbayev Yu. A., Kasenov J. M., Zhali S. T., Chindaliev A. E., Baimukanov D. A., Demin V. A.**
Carrying out an index assessment of the live weight of cattle of the kazakh white-headed and hereford breed 55
- Safonov V. A., Ermilova T. E., Chernitskiy A. E.**
Growth rate dependence on micronutrient provision in replacement heifers during the intrauterine period 59
- Barkova O. Yu., Starikova D. A., Chistyakova I. V.**
Correlation analysis of the PRM1, STK35 and IFT27 level of expression genes with the quality of native and deposited seed of holsting bulls 63

Mechanization, Electrification, Automation and Digitalization

- Shakhov V. A., Pushko V. A., Boyko I. G., Gerasimenko V. V., Uchkin P. G., Popov I. V.**
Improving the process of dosing ultrafine particles with vibration-electromechanical mixing 67

Растениеводство, защита и биотехнология растений

УДК 633.491+57.045+574/577

DOI: 10.31857/S2500262723060017 EDN: NNAHSP

ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТИ РАСТЕНИЙ КАРТОФЕЛЯ*

О. А. Розенцвет¹, доктор биологических наук, **Е. С. Богданова¹**, кандидат биологических наук,
С. Л. Рубцов², **А. Л. Бакунов²**, **А. В. Милехин²**, кандидаты сельскохозяйственных наук,
В. Н. Нестеров¹, кандидат биологических наук

¹Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
 Институт экологии Волжского бассейна РАН,
 445003, Тольятти, ул. Комзина, 10
 E-mail: olgarozen55@mail.ru

²Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
 Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. Н. М. Тулайкова,
 446254, Безенчук, ул. Карла Маркса, 41

Исследования проводили с целью определения взаимосвязей между показателями ксероморфности листьев и урожайности растений картофеля в условиях недостаточного увлажнения и повышенного температурного режима для использования в селекции или для создания модели сорта. Эксперименты выполняли в 2021–2022 гг. в Самарской области. Объектами исследования служили 24 сорта картофеля. Критерием ксероморфности были выбраны число и размеры устьиц на единице площади листа. Исследуемые сорта разделили по числу устьиц на две группы (по n=12). В первой группе средняя величина этого показателя составила 26 тыс. шт./см² листа, во второй – 35 тыс. шт. (F=41, p=0,03). Более развитые структурные черты ксероморфности и накопление определенных типов метаболитов во второй группе сортов привело к увеличению урожая, по сравнению с первой, в 1,6 раз (F=9, p=0,004). Растения второй группы характеризовались большим числом клеток мезофилла на единице площади листа (584 тыс. шт./см² против 557 тыс. шт.), повышенным содержанием фосфолипидов (36 мг/г сухой массы против 31 мг/г), сухой массы (0,19 г/г сырой массы против 0,17 г/г) и отношением мембранных липидов к мембранным белкам (1,4 ед. против 1,2). В менее ксероморфной первой группе растений уровень окислительного стресса, оцениваемый по продуктам перекисного окисления липидов, составил 0,050 мкм/г сырой массы и был на 12 % выше, чем у более ксероморфной (F=6, p=0,08). Выявленная положительная сопряженность между урожайностью и характеристиками ксероморфности генотипов свидетельствует о перспективности использования этого критерия в селекции картофеля.

PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL FEATURES OF DROUGHT RESISTANCE OF POTATO PLANTS

O. A. Rozentsvet¹, **E. S. Bogdanova¹**, **S. L. Rubtsov²**, **A. L. Bakunov²**,
A. V. Milekhin², **V. N. Nesterov¹**

¹Samara Federal Research Scientific Center RAS,
 Institute of Ecology of the VolgaBasin RAS,
 445003, Togliatti, str. Komzina 10
 E-mail: olgarozen 55@mail.ru

²Samara Federal Research Scientific Center RAS,
 Samara Scientific Research Agriculture Institute Named after N. M. Tulajkov,
 446254, Bezenchuk, str. K. Marx, 41

The purpose of the study is to identify the relationship between drought resistance indicators and the yield of potato plants under unfavorable conditions. A xeromorphic leaf structure is considered a diagnostic sign of plant drought resistance. The objects of the study were 24 potato varieties. Planting of seed, pre-planting tillage, harvesting and crop recording were carried out in the period 2020–2022 on the territory of the Samara Research Institute of Agriculture – a branch of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Growing conditions for 2021 and 2022 characterized by elevated temperatures and insufficient moisture. The number and size of stomata per unit leaf area were chosen as the criterion for xeromorphism. The studied varieties were divided into two groups (n=12 each) according to the number of stomata. In the first group, the average number of stomata was 26 thousand pcs./cm² of leaf, and in the second group – 35 thousand pcs. (F=41, p=0.03). More developed structural features of xeromorphism and the accumulation of certain types of metabolites in the second group of varieties led to a 1.6 times greater yield than in the first less xeromorphic group (F=9, p=0.004). The second group was characterized by a large number of mesophyll cells per unit leaf area (584 thousand pieces/cm² versus 557 thousand pieces), a high content of phospholipids (36 mg/g dry weight versus 31 mg/g), dry weight (0.19 vs. 0.17 g/g wet weight) and the ratio of membrane lipids to membrane proteins (1.4 vs. 1.2). In the less xeromorphic group of plants, the level of oxidative stress, assessed by LPO products, was 0.050 μM/g fresh weight and was 12 % higher than in the more xeromorphic group (F=6, p=0.08). The revealed positive correlation between yield and xeromorphic genotypes indicates the prospects of using this criterion in potato breeding or creating a variety model.

Ключевые слова: белки, водный обмен, мезоструктура листа, ксероморфность, мембраны, пигменты, устьица, урожайность.

Key words: proteins, water exchange, leaf mesostructure, xeromorphism, membranes, pigments, stomata, productivity.

* работа поддержана грантом РФФИ № 23–26–10020.

В связи с изменением климата картофель все чаще выращивают в районах, подверженных засухе. Неглубокая корневая система делает культуру одной из самых чувствительных к этому экологическому фактору [1]. Засуха сильно тормозит ключевые физиологические и биохимические процессы, что приводит к снижению продуктивности растений и потере урожая клубней. В частности, она замедляет рост надземной массы картофеля, уменьшает продолжительность цикла развития, количество и размер клубней [2]. Уровень снижения урожайности считают основным критерием устойчивости картофеля к этому стрессовому фактору [3].

Засуха характеризуется длительным или кратковременным бездождевым периодом, повышенной температурой воздуха, дефицитом насыщения влагой воздуха, что вызывает усиление испарения и транспирации у растений [4]. В результате происходит обезвоживание и перегрев, снижение продуктивности, а иногда и гибель растения. Применительно к картофелю при прогнозируемом дефиците осадков возможно снижение урожайности на 26...32 % [5]. Так, засуха 2010 г. в Центральном и Приволжском федеральных округах России, в которых традиционно производят более 60 % картофеля, привела к уменьшению его производства примерно на 30 % [6].

Засухоустойчивость – способность генотипов стабильно сохранять обменные процессы в растениях при неблагоприятных условиях развития (водный и/или температурный стрессы) [7]. Оптимальная температура почвы в период образования клубней для большинства европейских сортов картофеля составляет 17 °С, воздуха – 17...20 °С, оптимальное количество осадков – 40...80 мм в месяц, особенно в период цветения [3]. Для оценки засухоустойчивости культуры используют морфологические, структурные или физиологические показатели листьев (водоудерживающая и пролинообразующая способность листьев, спонтанная сверхслабая хемилюминесценция растений и др.) [3].

Важным диагностическим признаком засухоустойчивости растений считают ксероморфную структуру листа [7, 8], а характерным физиологическим признаком – устьичную проводимость листьев. Чем больше число устьиц, тем выше ксероморфность вида (сорта) [9]. Ранее было установлено, что основной рост надземной биомассы и формирование клубней приходились на июнь и июль [10]. В период активного цветения урожайность клубней на одно растение положительно коррелировала с числом устьиц на единице площади листа и фотосинтетическими пигментами в расчете на сухую массу листьев [10, 11, 12]. Кроме того, отмечена связь урожайности сортов картофеля в засушливых условиях с полевой вирусостойчивостью [13]. Однако вопрос о зависимости урожайности от засухоустойчивости остается открытым.

Устойчивость к факторам среды, включая засуху, тесно связана с основными метаболическими процессами растений, характеризующими их потенциальную функциональную активность. Например, количество пигментов в листьях отражает фотосинтетическую функцию растений, состав клеточных мембран (липидов и белков) характеризует эффективность каталитических и транспортных процессов. Перекисное окисление липидов (ПОЛ) – один из первых ответов растений на неблагоприятные воздействия [10].

Цель исследования – выявить взаимосвязь показателей ксероморфности листьев и урожайности

растений картофеля в условиях недостаточного увлажнения и повышенного температурного режима для использования в селекции или создания модели сорта.

Методика. Объектами исследования были листья 24 сортов картофеля (*Solanum tuberosum*) различного генетического происхождения – Августин, Барин, Брусника, Варяг, Галактика, Грант, Дебют, Жигулевский (стандарт), Казачок, Калибр, Красавчик, Краса Мещеры, Кумач, Нарымская ночка, Сердолик, Северное сияние, Сигнал, Сиверский, Сириус, Сударыня, Третьяковка, Удача, Утро, Эликсред. Эксперименты проводили в 2021–2022 гг. на базе Самарского научно-исследовательского института сельского хозяйства – филиала Самарского научного центра (Самарская область, 53°03' N, 49°25' E).

Посадку проводили на двух рядковых делянках, ширина междурядий – 60 см, расстояние между растениями – 60 см, по 50 растений на делянку. Повторность четырехкратная. Посадку осуществляли во второй декаде мая. Предшественник – яровая пшеница, картофель выращивали без внесения удобрений и орошения. Почва опытного участка – чернозём террасовый, обыкновенный, малогумусный, среднетощный, тяжелосуглинистый со следующей агрохимической характеристикой: рН_{KCl} – 6,8 (ГОСТ 26483-85); гидролитическая кислотность – 0,7 мг-экв./100 г почвы (ГОСТ 26212-91); N-NO₃ – 42,9 мг/кг почвы (ГОСТ 26951-86); P₂O₅ и K₂O – 166,7 и 115,0 мг/кг почвы соответственно (ГОСТ 26204-91); содержание гумуса – 5,71 % (ГОСТ 26213-91).

Метеоусловия периода вегетации картофеля в 2021–2022 гг. отличались повышенным температурным режимом и недостаточным увлажнением. В 2021 г. среднемесячная температура воздуха превышала 20 °С во все три летние месяца, в 2022 г. – в июле и августе. По количеству выпавших осадков более благоприятным для растений картофеля был 2022 г. (табл. 1). Однако август этого года характеризовался повышенным температурным режимом и отсутствием осадков.

Табл. 1. Среднемесячные значения температуры воздуха и количества осадков в период вегетации картофеля (метеорологическая станция Безенчук, Самарская область)

Месяц	Среднемесячная температура воздуха, °С	Сумма осадков, мм
2021 г.		
Июнь	22,0	68,6
Июль	23,2	31,0
Август	24,2	5,0
2022 г.		
Июнь	18,6	63,0
Июль	21,3	65,0
Август	22,7	0,0

Для исследования использовали полностью сформированные листья с десяти растений каждого сорта, случайно выбранных в период полного цветения в первой половине дня. Из усредненной массы боковых долей листа параллельно составляли три навески массой 0,1...0,5 г в зависимости от вида анализа и хранили в жидком азоте. На продольных парадермальных срезах листьев, предварительно зафиксированных в 3,5 %-ном глутаровом альдегиде (рН=7,5), подсчитывали число устьиц на 1 см² нижней поверхности листа, измеряли их длину и выражали в мкм. Подсчет числа палисадного и губчатого мезофилла проводили в суспензии после предварительной мацерации клеток [14]. Размеры клеток определяли с использованием автоматизированного анализатора изображений Simagis Mesoplant (ООО «СИАМС», Россия).

Удельную плотность поверхности листа (УППЛ, мг/см²) определяли, как отношение сухой массы (m, мг) к площади поверхности листа (S, см²). Содержание сухой массы листьев измеряли после высушивания до постоянной массы при температуре 60 °С и выражали в мг на 1 г сырой массы. Относительное содержание воды (ОСВ) рассчитывали по формуле:

$$OCB = (m1 - m3) / (m2 - m3) \cdot 100\%$$

где m1 – сырая масса, г; m2 – масса при полном тургоре после гидратации в течение 3-х ч, г; m3 – сухая масса, г [15].

Интенсивность процессов ПОЛ в тканях растений определяли по содержанию малонового диальдегида после реакции с тиобарбитуровой кислотой, используя спектрофотометр («ПромЭкоЛаб ПЭ3000 УФ», Россия) [16].

Определение содержания пигментов и мембранных белков (МБ) в растительном материале, а также экстракцию и анализ основных групп и классов липидов осуществляли согласно действующим методикам [16, 17].

Каждый вид анализа проводили в трех биологических и трех аналитических повторностях. На рисунках результаты представлены в виде средних значений (Mean) параметра для группы сортов, их стандартных ошибок (SE), максимальных и минимальных значений (Max...Min).

Для того чтобы установить возможную связь морфологических и функциональных параметров листьев с урожайностью, сорта разделены на две группы по числу и размерам устьиц у растений в годы с повышенной стрессовой нагрузкой (2021 и 2022 гг.). В первую группу (n=12) вошли сорта с меньшим числом устьиц, во вторую группу (n=12) – сорта с большим числом устьиц, включая стандарт. Достоверность различий между группами сортов определяли методом дисперсионного анализа. Для выявления взаимосвязи между урожайностью разных сортов картофеля и функционально-структурными па-

раметрами листьев использовали метод PCA (principal component analysis) [18]. Расчеты выполняли, используя программы Statistica 6.0, Microsoft Excel 2007, Past 3, Canoco for Windows 4.5 и Statgraphics Centurion XVI.

Результаты и обсуждение. Число устьиц на единицу площади листа растений картофеля варьировало от 19 до 40 тыс. шт. в зависимости от сорта и года вегетации. Длина устьиц при этом менялась в пределах от 20 мкм до 30 мкм. К первой группе с меньшим числом устьиц были отнесены сорта Грант, Кумач, Сигнал, Августин, Калибр, Удача, Казачок, Краса Мещеры, Барин, Нарымская ночка, Северное сияние, Третьяковка. Ко второй, более ксероморфной группе – Эликсред, Дебют, Сударыня, Сердолик, Брусника, Варяг, Сириус, Красавчик, Галактика, Утро, Жигулевский, Сиверский (n=12). Среднее по группам число устьиц на 1 см² листа составляло соответственно 26 тыс. шт. и 35 тыс. шт. Различия между группами по количеству устьиц были статистически достоверны (F=41, p=0,03). При этом чем большее число устьиц приходилось на единицу площади листа, тем, как правило, они были меньше по размеру (рис. 1 а).

Устьичная проводимость регулирует поглощение CO₂ и потерю воды при транспирации [19]. В наших экспериментах генотипы с повышенной ксероморфностью (рис. 1 с, d), то есть с большим числом устьиц, отличались повышенными показателями содержания сухой массы (0,17 и 0,19 г/г сырой массы, соответственно) при меньшем относительном содержании воды (70 против 64 % соответственно) (F=7, p=0,03).

Известно, что при ксероморфизме формируется определенный тип структуры ткани, который характеризуется большим количеством мелких клеток [7]. Такой тип строения листа позволяет растениям легче переносить напряжение, возникающее при сжатии клеток в процессе обезвоживания [9]. У растений с большим числом устьиц и меньшим содержанием воды величина УППЛ составляла 6,4 мг/см², что было ниже в 1,3 раза, чем у образцов с меньшим числом устьиц (табл. 2). Анализ поперечного среза листьев исследованных генотипов показал, что их мезофилл имеет дорсовентральный тип строения, разделенный на палисадную и губчатую паренхиму. Клетки палисадной паренхимы расположены в один слой. Для ксероморфных сортов характерно большее число клеток в расчете на единицу площади листа (584 тыс. шт. против 557 тыс. шт.), но меньший их объем (28 × 10³ мкм³ против 35 × 10³ мкм³). При этом доля мезофилла в тканях листа у более ксероморфных растений была на 9 % выше, чем у менее ксероморфных. Полученные результаты согласуются с известными данными о том, что засухоустойчивым сортам и видам, в отличие от неустойчивых, свойственна мелкоклеточность [7, 8].

2. Структурные характеристики листьев картофеля с разной степенью ксероморфности (2021–2022 гг.)

Параметр	I*	II
УППЛ, г/см ²	6,4±0,3	5,0±0,5**
Толщина листа, мкм	242,5±2,2	250,0±3,7
Общее количество фотосинтезирующих клеток в единице площади листа, тыс./см ²	557,8±11,7	584,0±9,2**
Объем клеток палисадной паренхимы, 10 ³ мкм ³	35,0±3,7	28,0±1,5**
Доля мезофилла в тканях листа, %	55,0±0,9	60,0±1,2**

*I – группа сортов картофеля с менее выраженной ксероморфностью, II – группа сортов картофеля с более выраженной ксероморфностью.
** – отличия от I группы достоверны при p ≤ 0,05.

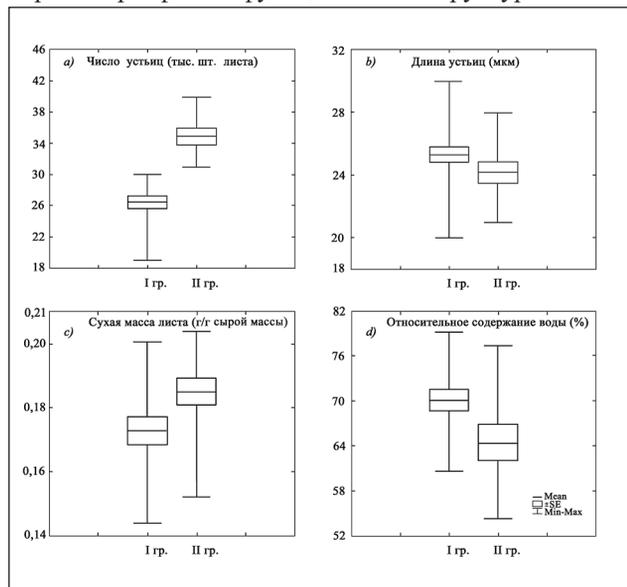


Рис. 1. Морфо-физиологические показатели листьев картофеля в двух группах растений, различающихся по ксероморфности (2021–2022 гг.): а) число устьиц, б) длина устьиц, в) содержание сухой массы, д) относительное содержание воды (здесь и на рисунке 2 и 3: \square – средние значения параметра ± стандартная ошибка (SE); \perp – максимальные и минимальные значения).

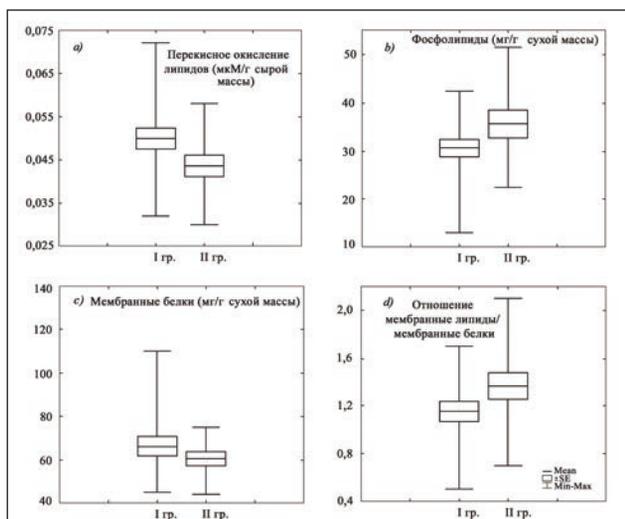


Рис. 2. Уровень перекисного окисления липидов (а), фосфолипидов (б), содержание фосфолипидов мембранных белков (с), соотношение мембранные липиды/мембранные белки (д) в листьях картофеля с разной степенью ксероморфности (2021–2022 гг.).

Одно из негативных проявлений засухи – окислительный стресс, вызываемый повышенным образованием различных видов активных форм кислорода (АФК) [20]. Для оценки их действия определяли количество продуктов ПОЛ в листьях. В первой, менее ксероморфной, группе растений уровень ПОЛ был равен 0,050 мкМ/г сырой массы (рис. 2 а), что на 12 % выше, чем во второй ($F=6, p=0,08$). Это может свидетельствовать о меньшей способности генотипов первой группы противостоять окислительному стрессу. Обнаружена также разница в содержании фосфолипидов (ФЛ), представляющих собой структурный элемент большинства клеточных мембран. В первой группе величина этого показателя составляла 31 мг/г сухой массы (рис. 2 в), во второй – на 16 % больше ($F=5, p=0,05$). По содержанию белков различий между группами не установлено, однако их отношение к содержанию мембранных липидов (МЛ/МБ) во второй

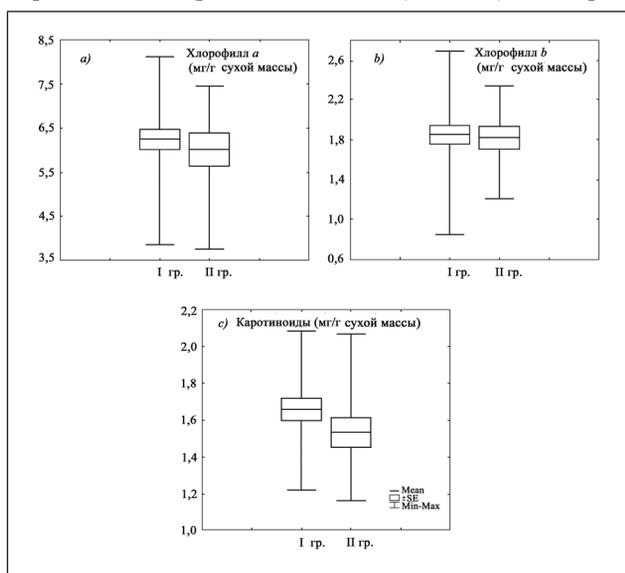


Рис. 3. Содержание хлорофилла а (а), хлорофилла b (б) и каротиноидов (с) в листьях картофеля с разной степенью ксероморфности (2021–2022 гг.).

группе также было выше, чем в первой, на 17 % ($F=5, p=0,04$). С усилением черт ксероморфности растений картофеля отмечена тенденция к увеличению доли липидов в мембранах, по сравнению с белками (рис. 2 с, д). Видимо с этим связана и большая площадь поверхности мембран в клетках растений с большей ксероморфностью.

С первичной продуктивностью сельскохозяйственных культур обычно положительно сопряжена концентрация хлорофиллов в листьях [21]. В наших экспериментах достоверных различий по содержанию хлорофиллов и каротиноидов между разными группами растений не выявлено (рис. 3 а...с). Суммарный уровень хлорофиллов а и b в среднем составил 8 мг/г сухой массы, каротиноидов – 1,6 мг/г сухой массы. Можно предположить, что ксероморфность не зависит от количества пигментов. Само по себе содержание зеленых пигментов в листьях может влиять на продуктивность только при прочности хлорофилл-белковых комплексов, независимо от условий окружающей среды. Поэтому поддержание функционального состояния растений в целом и стабильной работы фотосинтетического аппарата, в частности, в условиях засухи, может быть связано не только с определенной структурой листа и количеством пигментов, но и с накоплением определенных типов метаболитов. В частности, у ксероморфных растений выявлено большее содержание ФЛ. Основную их часть, как правило, составляет фосфатидилхолин. Этот тип липидов участвует в синтезе холина – предшественника глицин-бетаина [22]. Накопление глицин-бетаина способствует поддержанию водного баланса клетки и тургорного давления, тем самым обеспечивается эффективность работы фотосинтетического аппарата независимо от количественного уровня пигментов [23].

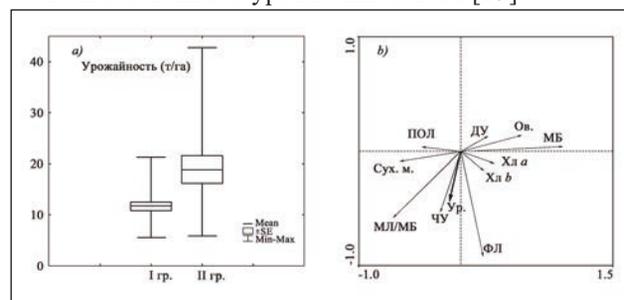


Рис. 4. Показатели урожайности генотипов картофеля, различающихся по ксероморфности (а) и взаимосвязь урожайности с физиолого-биохимическими параметрами листьев (б): ДУ – длина устьиц, МБ – мембранные белки, МЛ/МБ – соотношение мембранные липиды/мембранные белки, Ов. – оводненность листьев, ПОЛ – перекисное окисление липидов, Суx. м. – сухая масса листа, Ур. – урожайность, ФЛ – фосфолипиды, Хл а, b – хлорофилл а, b, ЧУ – число устьиц (2021–2022 гг.).

Таким образом, растения, разделенные по степени ксероморфности, различались не только по числу и размерам устьиц, но и по параметрам мезоструктуры листьев, клеточных мембран и водного обмена. Результаты анализа урожайности растений (рис. 4 а) свидетельствуют, что более развитые структурные черты ксероморфности и накопление определенных типов метаболитов во второй группе сортов привели в условиях 2021–2022 гг. к ее увеличению, по сравнению с первой менее ксероморфной группой, в 1,6 раз ($F=9, p=0,004$). Использование метода РСА позволило оценить наиболее вероятную связь средневзвешенных характеристик каждого параметра с урожайностью

(рис. 4 б). Векторы на графике характеризуют направление и силу влияния соответствующих параметров. Однонаправленность векторов указывает на положительную корреляцию, которая тем сильнее, чем ближе расположены векторы один к другому. Противоположные направления векторов свидетельствуют об отрицательной взаимосвязи между соответствующими характеристиками, а угол 90° – об очень низкой корреляции параметров [18].

Направление вектора урожайности сортов картофеля в условиях 2021–2022 гг. совпадало с направлениями векторов таких физиолого-биохимических характеристик листа, как число устьиц, содержание фосфолипидов и соотношение МЛ/МБ.

Выводы. В целом в результате исследований установлено, что урожайность картофеля напрямую зависит от состояния листовой массы в период вегетации, а именно, ксероморфная структура листьев увеличивает устойчивость к засухе и способствует формированию повышенной урожайности картофеля. Более развитые структурные черты ксероморфности и накопление определенных типов метаболитов в растениях привело в условиях 2021–2022 гг. к увеличению урожая, по сравнению с менее ксероморфной группой, в 1,6 раз ($F=9, p=0,004$). Более ксероморфные генотипы характеризовались повышенным числом устьиц (35 тыс. шт./см² против 26 тыс. шт./см²) и клеток (584 тыс. шт./см² против 557 тыс. шт./см²) на единице площади, содержанием фосфолипидов (36 мг/г сухой массы против 31 мг/г), сухой массой (0,19 г/г сыр. массы против 0,17 г/г) и отношением мембранных липидов к мембранным белкам (1,4 против 1,2). У растений менее ксероморфной группы, уровень окислительного стресса, оцениваемый по продуктам ПОЛ, составил 0,050 мкМ/г сырой массы и был на 12 % выше, чем у более ксероморфных ($F=6, p=0,08$). Выявленная положительная сопряженность между урожайностью и ксероморфными генотипами свидетельствует о перспективности использования этого критерия в селекции картофеля или при разработке модели сорта.

Литература.

- Zarzyńska K., Boguszewska-Mankowska D., Nosalewicz A. Differences in size and architecture of the potato cultivars root system and their tolerance to drought stress // *Plant Soil Environmental*. 2017. Vol. 63. P. 159–164. doi: 10.17221/4/2017-PES.
- Field screening for variation of drought tolerance in *Solanum tuberosum* L. by agronomical, physiological and genetic analysis / R. Schafleitner, R. Gutierrez, R. Espino, et al. // *Potato Research*. 2007. Vol. 50. P. 71–85. doi: 10.1007/s11540-007-9030-9.
- Potato response to drought stress: Physiological and growth basis / T. Gervais, A. Creelman, X.-Q. Li, et al. // *Frontiers Plant Sciences*. 2021. Vol. 12. Article 698060. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2021698060/full> (дата обращения: 13.04.2023). doi: 10.3389/fpls.2021.698060.
- Кагермазов А. М., Хачидогов А. В. Механизмы засухоустойчивости кукурузы // *Инновации и продовольственная безопасность*. 2018. № 2 (20). С. 62–65. doi: 10.31677/2311-0651-2018-0-2-62-65.
- Climate change impact on global potato production / R. Raymundo, S. Asseng, R. Robertson, et al. // *European Journal Agronomy*. 2018. Vol. 100. P. 87–98. doi: 10.1016/j.eja.2017.11.008.
- The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe / D. Barriopedro, E. M. Fischer, J. Luterbacher, et al. // *Science*. 2011. Vol. 332. (6026). P. 220–224. doi: 10.1126/science.1201224.
- Ксероморфные признаки листьев *Liriodendron tulipifera* L. (Magnoliaceae) в засушливом климате Центральной Азии / Н. Г. Акинъшина, Г. М. Дусчанова, А. А. Азизов и др. // *Вестник московского университета. Серия 16. Биология*. 2020. Т. 75. № 4. С. 251–257.
- Панфилова О. В., Голяева О. Д. Физиологические особенности адаптации сортов и отбор форм сортоины красной к засухе и повышенным температурам // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. № 5. С. 1056–1064. doi:10.15389/agrobiology.2017.5.1056rus.
- Оценка засухоустойчивости озимой мягкой пшеницы в условиях модельной засухи / А. В. Алабушев, Е. В. Ионова, В. А. Лиховидова и др. // *Земледелие*. 2019. № 7. С. 35–37. doi:10.31367/2079-8725-2018-59-5-29-31.
- Продуктивность и динамика морфологических и физиолого-биохимических параметров картофеля в условиях засушливого климата / О. А. Розенцвет, Е. С. Богданова, В. Н. Нестеров и др. // *Доклады Российской Академии наук. Науки о жизни*. 2021. Т. 497. С. 143–147. doi:10.31857/S2686738921020232.
- Physiological and biochemical parameters of leaves for evaluation of the potato yield / O. Rozentsvet, E. Bogdanova, V. Nesterov, et al. // *Agriculture*. 2022. Vol. 12. P. 757. doi:10.3390/agriculture12060757.
- Морфо-физиологические детерминанты формирования урожая картофеля в условиях дефицита почвенной влаги / А. Л. Бакунов, Н. Н. Дмитриева, С. Л. Рубцов и др. // *Известия РАН. Серия биологическая*. 2023. № 3. С. 321–331. URL: <https://www.sciencejournals.ru/view-article/?j=izvbio&y=2023&v=0&n=3&a=IzvBio2270001Bogdanova> (дата обращения: 13.04.2023). doi: 10.31857/S1026347022700019/
- Факторы, определяющие формирование урожайности картофеля в условиях недостаточного увлажнения / А. Л. Бакунов, Н. Н. Дмитриева, С. Л. Рубцов и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2023. № 2. С. 25–29. doi: 10.31857/S2500262723020060.
- Quantitative mesophyll parameters rather than whole-leaf traits predict response of C3 steppe plants to aridity / L. A. Ivanova, P. K. Yudina, D. A. Ronzhina, et al. // *New Phytologist*. 2018. Vol. 217. No. 2. P. 558–570. doi: 10.1111/nph.14840.
- Влияние 24-эпибрассинолида на водный обмен отличающихся по засухоустойчивости сортов пшеницы при осмотическом стрессе / М. В. Безрукова, Г. Р. Кудояров, А. Р. Лубянова и др. // *Физиология растений*. 2021. Т. 68. № 2. С. 161–169. doi:10.31857/S0015330321010048.
- Seasonal dynamics of functional parameters of wintergreen steppe relict *Globaliaripunctata* Lapeyr / E. Bogdanova, L. Ivanova, P. Yudina, et al. // *Flora* 2022. Vol. 289. Article 152037. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0367253022000342> (дата обращения: 13.04.2023). doi: 10.1016/j.flora.2022.152037.
- Protein measurement with the Folin phenol reagent / O. H. Lowry, N. J. Rosebrough, N. J. Farr, et al. // *Journal Biological Chemistry*. 1951. Vol. 193. No. 1. P. 265–275. doi: 10.1016/S0021-9258(19)52451-6.

18. TerBraak C. J. F. *Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis* // *Ecology*. 1986. Vol. 67. No 5. P. 1167–1179. doi: 10.2307/1938672.
19. Физиолого-биохимические характеристики микропобегов чая (*Camelliasinensis L.*) в условиях *in vitro*: норма, осмотический стресс, влияние кальция / Л. С. Малюкова, Т. Л. Нечаева, М. Ю. Зубова и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2020. Т. 55. № 5. С. 970–980. doi: 10.15389/agrobiology.2020.5.970rus.
20. deCarvalho M. H. C. *Drought stress and reactive oxygen species* // *Plant Signaling Behavior*. 2008. Vol. 3 No. 3. P. 156–165. doi: 10.4161/psb.3.3.5536.
21. Plich J., Boguszewska-Mankowska D., Marczewski W. *Relations between photosynthetic parameters and drought-induced tuber yield decrease in Katahdin-derived potato cultivars* // *Potato Res.* 2020. Vol. 63. No. 4. P. 463–477. doi: 10.1007/s11540-020-09451-3.
22. Жуков А. В. *О Качественном составе липидов мембран растительных клеток* // *Физиология растений*. 2021. Т. 68. № 2. С. 206–224. doi: 10.31857/S001533032101022X.
23. Ashraf M., Foolad M. R. *Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance* // *Environmental and Experimental Botany*. 2007. Vol. 59. P. 206–216. doi: 10.1016/j.envexpbot.2005.12.006.

Поступила в редакцию 25.07.2023

После доработки 22.08.2023

Принята к публикации 13.10.2023

СЕЛЕКЦИЯ ЛЮЦЕРНЫ ИЗМЕНЧИВОЙ НА СОЗДАНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ СОРТОВ С ВЫСОКОЙ КОРМОВОЙ ПРОДУКТИВНОСТЬЮ: РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ*

В. М. Косолапов, доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН,
Е. В. Думачева, доктор биологических наук, Л. Д. Сайфутдинова

Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии им. В. Р. Вильямса,
141055, Московская обл., Лобня, ул. Научный городок, корп. 1
E-mail: dumacheva63@mail.ru

Исследования проводили с целью оценки урожайности сухого вещества (СВ) селекционных образцов люцерны изменчивой, полученных многократным отбором биотипов, которые обладают высокой плодovitостью в год посева («малолетние образцы» – МЛ-образцы), в сравнении с исходными селекционными сортами для выбора лучших из них. Работу выполняли в 2019–2023 гг. в условиях Белгородской области. Почва – чернозём типичный с содержанием гумуса (по Тюрину) – 4,8 %, $pH_{\text{сол}}$ – 6,6, содержание P_2O_5 и K_2O (по Чирикову) – 122 и 180 мг/кг соответственно. Исследования выполняли в трех закладках (2019–2023 гг.) с рендомизированным расположением делянок, повторность – пятикратная. Делянки двурядные длиной 3,5 м с шириной междурядий 30 см. Многократным отбором из сортов люцерны Белгородская 86, Красноярская 1 и Красноярская 2 созданы МЛ-образцы Б-86 МЛ, К-1 МЛ и К-2 МЛ, которые отличаются от исходных генотипом быстрым развитием в первые годы жизни. МЛ-образцы превосходили по урожаю СВ исходные сорта в год посева в среднем за 2019–2021 гг. на 32,1...36,0 % ($p < 0,05$), на второй год жизни в среднем за 2020–2022 гг. – на 16,9...22,5 % ($p < 0,05$). Наибольшей урожайностью СВ характеризовалась популяция К-2 МЛ – в год посева она составила 490...553 г/м² (2019–2021 гг.), на второй год жизни – 799...939 г/м² (2020–2022 гг.). Одновременно на четвертый год жизни сбор СВ у МЛ-образцов резко снижался (в среднем за 2022–2023 гг.). У образца Б-86 МЛ он составил 56,5 % от уровня сорта Белгородская 86, у К-1 МЛ – 56,1 % от сорта Красноярская 1 и у К-2 МЛ – 54,5 % сорта Красноярская 2. Изученные МЛ-образцы перспективны для создания сортов интенсивного типа с использованием в течение не более трех лет жизни.

SELECTION OF ALFALFA VARIEGATED ON CREATION OF INTENSIVE VARIETIES WITH HIGH FODDER PRODUCTIVITY: RESULTS AND PROSPECTS*

V. M. Kosolapov, E. V. Dumacheva, L. D. Sajfutdinova

Federal Williams Research Center of Forage Production & Agroecology,
141055, Moskovskaya obl., Lobnya, ul. Nauchnygorodok, korp. 1
E-mail: dumacheva63@mail.ru

The research was conducted in 2019–2023 in Belgorod region to assess the dry matter (DM) yield of breeding samples of alfalfa variegated, obtained by repeated selection of biotypes with high fertility in the year of sowing («juvenile samples» – JS-samples), in comparison with the original breeding varieties to select the best ones. Soil – typical chernozem with humus content (according to Tyurin) – 4.8 %, pH_{sol} – 6.6, P_2O_5 and K_2O content (according to Chirikov) – 122 and 180 mg/kg, respectively. The research was carried out in three plots (2019–2023) with a randomised arrangement of plots, the repetition was fivefold. The plots were double rowed with a length of 3.5 m and row spacing width of 30 cm. Multiple selection from alfalfa varieties (Belgorodskaya 86, Krasnoyarskaya 1, Krasnoyarskaya 2) resulted in the creation of JS-samples: B-86 JS, K-1 JS and K-2 JS, which differed from the original varieties by rapid development in the first years of life. JS-samples surpassed the initial varieties by 32.1...36.0 % ($p < 0.05$) in terms of DM yield in the year of sowing on average for 2019–2021, and by 16.9...22.0 % ($p < 0.05$) in the second year of life on average for 2020–2022. – by 16.9...22.5 % ($p < 0.05$). The highest DM B yield was characterised by the K-2 JS-samples, with a yield of 490...553 g/m² in the year of sowing (2019–2021) and 799...939 g/m² in the second life year (2020–2022). At the same time, ML samples sharply reduced DM yield in the fourth year of life (averaged over 2022–2023). Thus, in B-86 JS-samples it was 56.5 % of the variety Belgorodskaya 86, in K-1 JS – 56.1 % of the variety Krasnoyarskaya 1 and in K-2 JS – 54.5 % of the variety Krasnoyarskaya 2. The studied JS-samples are promising for creation of intensive type varieties using grass stands of not more than three years of life.

Ключевые слова: люцерна изменчивая (*Medicago varia* Mart.), урожай сухого вещества, селекция, морфологические признаки, отбор в год посева, дисперсионный анализ.

Key words: *Medicago varia* Mart., dry matter yield, breeding, morphological traits, selection of juvenile forms, analysis of variance

Люцерна – важнейшая кормовая многолетняя культура, широко используемая в животноводстве. Поэтому в современных условиях постоянно разрабатывают технологические приемы увеличения урожайности и качества ее биомассы [1, 2, 3], а также ведут активную селекцию с учетом особенностей регионов возделывания [4, 5].

Селекционная работа с люцерной в мире главным образом направлена на повышение объемов произ-

водства и улучшение качества корма (содержание и переваримость протеина, снижение концентрации антипитательных веществ, а также улучшение морфобиологических свойств, в первую очередь повышение доли листьев и снижение грубости биомассы) [6, 7]. Селектируют люцерну и по признакам семенной продуктивности [8, 9].

Существует ряд причин, значительно замедляющих селекцию этой культуры и снижающих эффективность

*исследования выполнены при поддержке Нацпроекта «Наука и университеты» на создание молодежной лаборатории в рамках Госзадания FGGW-2022-0013 «Разработка теоретических основ ускорения интродукции, селекции и повышения эффективности семеноводства сельскохозяйственных растений на основе оценки сопряженности фундаментальных физиологических процессов».

создания сортов необходимого качества, которые обусловлены полигенным наследованием количественных и качественных признаков, трудностями отбора гибридов и чистых линий, инцухт-депрессией, полиплоидностью культуры, высоким уровнем неаддитивной дисперсии и др. [10, 11, 12]. Особое препятствие – длительный цикл отбора, связанный с многолетним циклом использования люцерны, из-за которого оценка селекционного материала растягивается на несколько лет, длительный период вхождения в генеративную фазу, часто наблюдаемая диспропорция между урожайностью семян и кормовой массы. Селекция проводится в основном по фенотипу с тестированием потомства или без него. Циклы размножения занимают от 3 до 5 лет [2, 13, 14].

Основой ускорения селекционного процесса люцерны могут стать положения теорий репродуктивных стратегий г- и К- отборов Маклиода-Пианка (селекция на преобладание рудеральных (г-отбор) или конкурентных (К-отбор) форм), а также конкурентных CRS-стратегий Грайма, которые обосновывают возможность направленного отбора у видов со смешанной стратегией в сторону рудеральности, стресс-толерантности или конкурентоспособности [15, 16].

В исследованиях, проведенных с видом *Medicago varia* Mart., были получены положительные результаты с закреплением в потомстве свойств, характерных для стресс-толерантной и конкурентной стратегии растений. В процессе отбора на провокационном фоне отмечена элиминация из популяций малолетних и неустойчивых форм. Выделены устойчивые биотипы с высоким экологическим потенциалом, конкурентоспособностью в злаково-бобовых травостоях [8]. На основе этих биотипов создан новый селекционный материал, отличный от исходных популяций, как по морфологическим, так и по биохимическим свойствам. Результаты исследований были использованы в практической селекции при создании новых сортов [17, 18].

Положения теорий репродуктивных стратегий г- и К-отборов, а также стратегий Грайма можно использовать и в обратной селекции (по типу г-отбора) с выделением быстрорастущих и быстро созревающих форм, жизненная стратегия которых направлена на формирование максимальной семенной продуктивности в первые годы жизни. На основе этой концепции отработаны практические приемы укоренной селекции *M. varia*. Показана возможность сокращения сроков размножения люцерны с получением семян в год посева. Установлено, что биотипы, показывающие высокую семенную продуктивность в год посева, формируют наибольший урожай семян в целом. Отбор наиболее продуктивных биотипов позволяет создавать селекционные популяции – возможные доноры и источники признаков высокой семенной продуктивности люцерны [19] и потенциальный исходный материал для суперинтенсивных сортов [20]. При этом сорта люцерны должны обеспечивать создания больших объемов корма требуемого качества в сочетании с достаточно высокой урожайностью семян, что остается одной из самых больших проблем в селекции культуры во всем мире [21, 22, 23].

В связи с изложенным, необходимо изучить влияние отбора биотипов с высокой семенной продуктивностью в год посева (фактически, направленного г-отбора), на кормовую продуктивность созданных в процессе его реализации новых популяций и селекционного материала люцерны, в сравнении с исходными сортами и селекционными образцами.

Цель исследования – оценка урожайности сухого вещества и морфо-биологических свойств селекционных

образцов люцерны изменчивой (*M. varia*), созданных путем многократного отбора биотипов, плодоносящих в год посева, в сравнении с исходными селекционными сортами, для выбора лучших из них.

Методика. Исходный материал для селекции люцерны изменчивой (*M. varia*) был создан в предыдущих многолетних исследованиях [8, 17, 19]. Схема селекционного процесса была направлена на непрерывный отбор биотипов с высокой семенной продуктивностью в год посева в течение девяти поколений.

Исходные формы (генерация g₀) были созданы в 2000 г. путем сбора семян в год посева трех селекционных образцов:

сорт Белгородская 86;

селекционный образец ППЛ 2/12 (с 2016 г. сорт Краснояружская 1), созданный методом поликросса при скрещивании отборов из сортов Белгородская 86, Ladak, Mark II и местных популяций люцерны изменчивой, произрастающих на меловых лощинах;

селекционный образец ППЛ 5/32 (с 2016 г. сорт Краснояружская 2), выведенный методом поликросса при скрещивании отборов из сортов Белгородская 86, местная из Италии (к-5558), Eurore, Ярославна.

Выбор в качестве объектов исследований именно этих образцов обусловлен известностью их происхождения и понятной схемой селекции.

В процессе дальнейшей селекционной работы в 2000–2018 гг. были проведены отборы биотипов с высокой семенной продуктивностью в год посева в девяти генерациях:

g₁ – 2000 г., в малом стационарном сортоиспытании (научное селекционно-семеноводческое предприятие ООО «Белтравы», Белгородская область);

g₂...g₄ – 2003, 2005, 2007 гг., в конкурсных сортоиспытаниях (научное селекционно-семеноводческое предприятие ООО «Белтравы», Белгородская область);

g₅ – 2009 г., в межстационарном конкурсном сортоиспытании (ЗАО «Краснояружская зерновая компания», Белгородская область);

g₆...g₉ – 2011, 2014, 2017, 2018 гг., при размножении на изолированных участках (ЗАО «Краснояружская зерновая компания», Ботанический сад Белгородского государственного исследовательского университета «НИУ БелГУ», семеноводческое предприятие ИП «С. А. Мавродин»).

В результате на основе использования зародышевой плазмы исходных сортов Белгородская 86, Краснояружская 1 и Краснояружская 2 были сформированы три селекционных образца с рабочим названием «малолетние образцы» (МЛ-образцы): Б-86 МЛ, К-1 МЛ, К-2 МЛ. Схема опытов предусматривала сравнительные испытания отобранных популяций с исходными сортами, принятыми за контроль.

Полевые исследования проводили в 2019–2023 гг. на селекционно-семеноводческом участке ИП «С. А. Мавродин» (с. Драгунское, Белгородский район, Белгородская область) в рамках совместных научных исследований при подготовке кадров высшей научной квалификации учеными Белгородского государственного национального исследовательского университета (НИУ «БелГУ») и Федерального научного центра кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса (ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»).

В периоды вегетации с температурой более 10 °С в годы исследований складывались различные метеосуровья. В наиболее засушливом 2019 г. выпало 288,6 мм осадков, или 79,7 % от среднееголетних значений, при ГТК=0,79. В 2020 г. их сумма составила 302,4 мм (83,5 %

от нормы) с ГТК=0,99. В 2021 г. выпало минимальное количество осадков за период исследований 273,2 мм (75,4 % от нормы), однако благодаря более низким среднемесячным температурам величина ГТК была близка к единице (ГТК=0,98). Вегетационные периоды 2022 и 2023 гг. характеризовались большим количеством осадков. В 2022 г. при ГТК=1,38 их сумма была равна 399,6 мм, что составило 110,4 % от нормы. Самым влажным оказался 2023 г., когда за вегетационный период выпало 420,1 мм осадков (116,0 % от нормы), а ГТК был равен 1,5 при среднемесячных величинах этих показателей соответственно 362 мм и ГТК=1,12.

Почва опытного участка – чернозём типичный со следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса (по Тюрину) – 4,7...5,0 %, рН_{кон.} – 6,5...6,8 ед., содержание P₂O₅ и K₂O (по Чирикову) – 120...125 мг/кг и 170...190 мг/кг соответственно.

Исследования выполняли в трех закладках, методом полной рендомизации – 2019 г., 2020 г. и 2021 г. по стандартным методикам [24]. Срок использования травостоев закладки 2019 и 2020 гг. – 4 года, 2021 г. – 3 года. Растения размещали на двурядных делянках длиной 3,5 м с шириной междурядий 30 см. Расстояние между делянками – 50 см. Повторность – пятикратная. Стандарт – сорт Белгородская 86. Посев осуществляли однорядной ручной сеялкой с нормой высева 100 шт. всхожих семян на 1 погонный метр.

Предшественник – чистый пар. Обработка почвы – вспашка на глубину 20...22 см, предпосевная культивация – на 3...4 см, после которого проводили предпосевное прикатывание. Удобрения и химические препараты на селекционных посевах не использовали.

Учет зеленой массы выполняли поделочно со скашиванием травостоя вручную 2 раза за сезон в фазе бутонизации на уровне 2 см от уровня почвы. Для определения содержания сухого вещества (СВ) зеленую массу высушивали в сушильном шкафу при температуре

105 °С. Содержание общего протеина измеряли в растительных образцах, высушенных при температуре 75 °С. Обработку урожайных данных осуществляли методом двухфакторного дисперсионного анализа (фактор А – генотип исходного сортообразца, фактор В – влияние отбора (сравнение МЛ-образцов с соответствующим исходным сортом). За влияние условий года были приняты повторения в таблице дисперсионного анализа [25].

На отдельных растениях оценивали следующие морфологические признаки: длина генеративного стебля, см (30 растений); длина и ширина центрального листочка тройчатого листа в среднем ярусе, см (90 растений); соотношение длины к ширине листа; облиственность, %. Такие учеты проводили только в первом укосе [26].

Различия между морфологическими признаками оценивали с использованием t-критерия, сравнивая попарно созданные МЛ-образцы и исходные сорта. Это позволило оценить достоверность влияния на них проведенного селекционного отбора. Силу влияния факторов на результативные признаки рассчитывали методом Снедекора [27].

Результаты и обсуждение. Все МЛ-образцы в первый и второй годы жизни достоверно превосходили по высоте стеблей растения исходных сортов в среднем за 2019–2021 гг. – на 7,8...10,1 см, за 2020–2022 гг. – на 12,7...17,2 см при $p < 0,05$ (табл. 1). На третий год жизни травостоев отмеченная тенденция сохранилась. Растения селекционного образца Б-86 МЛ достоверно превысили сорт Белгородская 86 по высоте на 8,8 см; образца К-1 МЛ Красноярскую 1 – на 4,4 см (при $p < 0,05$). При этом достоверной разницы между вариантами К-2 МЛ и Красноярская 2 не установлено. На четвертый год жизни высота всех изученных малолетних селекционных образцов была достоверно ($p < 0,05$) меньше, чем у исходных сортов, на 22...25 см.

В первые три года жизни МЛ-образцы отличались большей облиственностью, по сравнению с исходными сортами: в первый год жизни – на 6,6...10,5 % ($p < 0,05$),

Табл. 1. Морфометрические показатели сортов и селекционных образцов в различные годы жизни

Генотип	Длина стебля, см		Облиственность, %		Длина листа, см		Ширина листа, см		Соотношение ширина/длина листа	
	$M \pm m^*$	t_f	$M \pm m$	t_f	$M \pm m$	t_f	$M \pm m$	t_f	$M \pm m$	t_f
Первый год жизни (среднее за 2019–2021 гг.)										
Белгородская86 (к-1)	78,1±3,0		44,7±1,2		2,7±0,1	3,15	1,4±0,1	3,57	0,51±0,02	3,37
Б-86 МЛ	85,9±1,6	2,48	51,3±1,2	3,80	4,0±0,4		2,4±0,3		0,60±0,01	
Красноярская 1(к-2)	78,0±2,4		46,7±1,2		2,7±0,1	7,60	1,4±0,1	9,27	0,52±0,02	2,53
К-1 МЛ	88,1±1,9	2,36	54,2±1,1	4,56	4,4±0,2		2,6±0,1		0,60±0,03	
Красноярская 2(к-3)	76,9±2,7		43,9±1,1		2,9±0,1	3,52	1,4±0,1	3,83	0,50±0,01	8,39
К-2 МЛ	86,8±2,6	2,58	54,4±1,2	6,36	4,2±0,4		2,4±0,2		0,57±0,01	
Второй год жизни (среднее за 2020–2022 гг.)										
Белгородская86 (к-1)	92,4±1,4		52,9±1,3		3,5±0,2	2,22	1,7±0,3	2,05	0,50±0,07	0,80
Б-86 МЛ	105,1±0,6	9,67	58,8±0,6	4,08	4,3±0,3		2,5±0,2		0,58±0,07	
Красноярская 1(к-2)	100,6±1,5		54,0±0,5		3,3±0,1	12,02	1,7±0,1	9,16	0,51±0,01	3,35
К-1 МЛ	120,2±3,3	6,44	59,0±0,8	5,30	5,0±0,1		2,8±0,1		0,56±0,01	
Красноярская 2 (к-3)	106,6±3,0		51,5±0,4		2,8±0,1	5,41	1,4±0,1	5,91	0,49±0,02	4,25
К-2 МЛ	123,8±3,2	6,50	55,3±0,8*	3,79	4,8±0,4		2,7±0,2		0,56±0,01	
Третий год жизни (среднее за 2021–2023 гг.)										
Белгородская86 (к-1)	96,2±1,5		53,0±1,8		3,5±0,2	1,37	2,2±0,1	0,58	0,64±0,03	0,97
Б-86 МЛ	105,0±2,0	6,34	55,9±1,2	1,39	3,1±0,2		2,3±0,1		0,74±0,10	
Красноярская 1(к-2)	102,4±1,6		54,7±0,9		3,4±0,1	1,31	2,0±0,1	2,05	0,59±0,05	2,65
К-1 МЛ	106,8±0,5	6,54	57,5±1,0	2,09	3,1±0,2		2,4±0,1		0,75±0,04	
Красноярская 2 (к-3)	108,9±1,5		51,7±0,4		3,1±0,1	0,24	1,8±0,1	3,71	0,58±0,02	4,99
К-2 МЛ	112,7±0,9	1,38	56,7±0,8	5,51	3,1±0,1		2,3±0,1		0,76±0,03*	
Четвертый год жизни (среднее за 2022–2023 гг.)										
Белгородская86 (к-1)	79,2±2,5		52,9±1,0		2,0±0,1	2,83	1,3±0,1	0,32	0,68±0,05	1,79
Б-86 МЛ	54,2±2,2	7,56	52,3±1,0	0,37	1,6±0,1		1,3±0,1		0,81±0,06	
Красноярская 1(к-2)	71,7±6,3		55,7±0,9		1,9±0,1	4,91	1,4±0,1	3,14	0,73±0,05	2,23
К-1 МЛ	49,7±2,3	3,26	52,5±0,6	3,03	1,2±0,1		1,1±0,1		0,88±0,04	
Красноярская 2 (к-3)	76,8±2,5		51,1±0,7		1,6±0,1	4,02	1,1±0,1	0,42	0,74±0,01	2,84
К-2 МЛ	52,7±1,0	8,98	51,6±0,8	0,42	1,1±0,1		1,1±0,1		1,00±0,09	
t_{05}	2,00		2,00		1,96		1,96		1,96	

*M – средняя, m – ошибка средней, t_f – фактическое значение t-критерия, t_{05} – критические значения t-критерия Стьюдента при $p < 0,05$.

во второй – на 3,8...5,9 % ($p < 0,05$). На третий год жизни между образцом Б-86 МЛ и сортом Белгородская 86 существенных различий по величине этого показателя не установлено при аналогичной тенденции, а у образцов К-1 МЛ и К-2 МЛ достоверное превосходство над контрольными составило соответственно 2,8 % и 5,0 % ($p < 0,05$). В посевах четвертого года жизни различия между контрольными вариантами и МЛ-образцами не установлено.

В целом наши данные согласуются с результатами других авторов, в исследованиях которых селекция родительских форм, направленная на повышение урожайности зеленой массы, основывалась на фенотипическом отборе по соотношению листьев и стеблей с последующим генотипическим отбором по урожайности [6, 10]. В первую очередь это касается признака облиственности, который характеризуется высокой степенью геномной предсказуемости, обусловленной тесной сопряженностью между фенотипической и генотипической составляющей, что делает такой признак особенно ценным для селекции на кормовую продуктивность [7, 28].

Исследования морфологических свойств, от которых зависит площадь листьев, показали, что у МЛ-образцов в первые два года жизни они были крупнее, чем у исходных сортов. В первый год жизни травостоя (в среднем за 2019–2021 гг.) длина листьев МЛ-образцов была больше ($p < 0,05$), чем у контрольных сортов, на 1,3...1,7 см, ширина – на 1,0...1,2 см. На второй год жизни различия составляли соответственно 0,8...2,0 см и 0,8...1,3 см. Наиболее крупными листьями характеризовался селекционный образец К-2 МЛ.

При оценке соотношения ширины к длине листьев, можно отметить тенденцию формирования у МЛ-образцов листьев широколанцетной формы, ближе к овальной. У растений исходных сортов она была ближе к ланцетной. В среднем за 2019–2021 гг. соотношение ширина : длина листьев в первый год жизни у МЛ-образцов находилось на уровне 0,57...0,60, у растений исходных сортов – 0,50...0,52. На второй год жизни люцерны растения всех селекционных образцов имели более крупные листья с явным превосходством у МЛ-образцов, у которых длина варьировала от 4,3 до 5,0 см, ширина – от 2,5 до 2,8 см, что достоверно ($p < 0,05$) больше, чем у контрольных сортов соответственно на 0,8...2,0 см и 0,8...1,3 см.

На четвертый год жизни тенденция изменилась. На растениях МЛ-образцов отмечали формирование достоверно более мелких, чем у исходных сортов, листьев с длиной меньше на 0,4...0,7 см и шириной на одном уровне (в пределах 1,1...1,3 см). Кроме того, отмечена тенденция формирования листьев округлой формы (соотношение ширины к длине в пределах 0,81...1,00). Возможно, такой эффект связан с поражением МЛ-образцов вирусно-микоплазменной инфекцией, вредоносность которой выше для более облиственных растений. Это согласуется с результатами предыдущих исследований, проведенных в этой же зоне, в которых вирусно-микоплазменной инфекцией в большей степени поражались продуктивные высокобелковые сорта [23].

По литературным данным формирование сухого вещества – сложный признак, наследуемость которого варьирует от умеренной до низкой (доля генотипически обусловленной изменчивости в общей изменчивости признака равна 0,15...0,30 ед.). Несмотря на значительные достижения в селекции на продуктивность, схемы отбора по этому признаку требуют доработки к конкретным условиям возделывания сортов [12].

Табл. 2. Урожайность сухого вещества, г/м²

Сорт, селекционный образец	Период исследований и годы жизни травостоев			
Первый год жизни				
	2019 г.	2020 г.	2021 г.	в среднем
Белгородская-86 (к-1)	244	314	300	286
Б-86 МЛ	358	401	407	389
Краснояржская 1(к-2)	331	375	368	358
К-1 МЛ	462	491	507	487
Краснояржская 2 (к-3)	350	396	425	390
К-2 МЛ	490	501	553	515
НСР ₀₅	45	36	46	25
Второй год жизни				
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	в среднем
Белгородская-86 (к-1)	523	530	584	546
Б-86 МЛ	646	632	728	669
Краснояржская 1(к-2)	706	695	675	692
К-1 МЛ	851	751	824	809
Краснояржская 2 (к-3)	729	725	712	722
К-2 МЛ	939	799	894	877
НСР ₀₅	74	48	55	70
Третий год жизни				
	2021 г.	2022 г.	2023 г.	в среднем
Белгородская-86 (к-1)	515	554	845	638
Б-86 МЛ	482	514	717	571
Краснояржская 1(к-2)	565	656	918	713
К-1 МЛ	519	613	733	622
Краснояржская 2 (к-3)	534	665	980	726
К-2 МЛ	489	609	817	638
НСР ₀₅	15	29	51	86
Четвертый год жизни				
	2022 г.	2023 г.	в среднем	
Белгородская-86 (к-1)	276,8	321	-	299
Б-86 МЛ	195	172	-	184
Краснояржская 1(к-2)	298,2	326	-	312
К-1 МЛ	203	191	-	197
Краснояржская 2 (к-3)	225,4	342	-	284
К-2 МЛ	168	183	-	176
НСР ₀₅	52	85	-	108

В наших исследованиях установлены статистически значимые ($p < 0,05$) различия по урожайности СВ между МЛ-образцами и исходными сортами в различные годы жизни травостоев. Все МЛ-образцы достоверно превосходили исходные контрольные сорта в год посева в среднем за 2019–2021 гг. по урожаю СВ на 32,1...36,0 %, во второй год жизни в среднем за 2020–2022 гг. – на 16,9...22,5 %. Наибольшую продуктивность СВ в этот период обеспечивал селекционный образец К-2 МЛ, урожайность которого в среднем за два года пользования (2019–2022 гг.) составила 696 г/м² (табл. 2).

На третий год жизни ситуация изменилась. Достоверных различий между сбором СВ популяции Б-86 МЛ и исходным сортом не установлено. В то же время МЛ-образцы К-1 МЛ и К-2 МЛ значительно уступали контрольным вариантам в среднем за 2021–2023 гг. соответственно на 13,8...14,6 %.

Наибольшее снижение урожайности СВ у МЛ-образцов отмечено на четвертый год жизни. В среднем за 2022–2023 гг. у селекционного образца Б-86 МЛ она составила 61,5 % от величины этого показателя у сорта Белгородская 86; у образца К-1 МЛ – 63,1 % от Краснояржской 1; у образца К-2 МЛ – 61,9 % от Краснояржской 2.

Дисперсионный анализ результативного признака «урожайность СВ» в различные годы использования травостоев в 2019–2023 гг. свидетельствует о значимом влиянии основных факторов «генотип исходного сорта» и «влияние отбора» в первые три года жизни (табл. 3). Достоверного влияния взаимодействия факторов не выявлено. Сила влияния фактора «генотип исходного сорта» на результативный признак «урожайность СВ в первый год жизни» в среднем за 2019–2023 гг. была достоверной ($h^2_A = 36,2\%$), во второй год использо-

Табл. 3. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа и сила влияния факторов на урожайность СВ люцерны изменчивой

Урожайность СВ	Источник вариации	D	n-1	s ²	F _φ	F _{0.05}	h ² _x
В первый год жизни (2019–2021 гг.)	общее	117911	17	-	-	-	100,0
	влияние условий года	9530	2	-	-	-	8,1
	случайное	1911	10	191	-	-	1,6
	генотип исходного сорта (A)*	42739	2	21369	111,8	4,1	36,2
	влияние отбора (B)*	63156	1	63156	330,5	5,0	53,6
Во второй год жизни (2020–2022 гг.)	A×B	575	2	287	1,5	4,1	0,5
	общее	223261	17	-	-	-	100,0
	влияние условий года	8397	2	-	-	-	3,8
	случайное	15421	10	1542	-	-	6,9
	генотип исходного сорта (A*)	120146	2	60073	39,0	4,1	53,8
На третий год жизни (2021–2023 гг.)	влияние отбора (B)*	78031	1	78031	50,6	5,0	35,0
	A×B	1267	2	633	0,4	8,8	0,6
	общее	399236	17	-	-	-	100,0
	влияние условий года	324816	2	-	-	-	81,4
	случайное	23032	10	2303	-	-	5,8
На четвертый год жизни (2022–2023 гг.)	генотип исходного сорта (A)*	20563	2	10282	4,5	4,1	5,2
	влияние отбора (B)*	30289	1	30289	13,2	5,0	7,6
	A×B	536	2	268	0,1	8,8	0,1
	общее	208905	11	-	-	-	100,0
	влияние условий года	11894	1	-	-	-	5,7
	случайное	16945	5	3389	-	-	8,1
	генотип исходного сорта (A)	1809	2	905	0,3	9,0	0,9
	влияние отбора (B)*	178169	1	178169	52,6	6,6	85,3
	A×B	87	2	44	0,0	9,0	0,0

D – сумма квадратов отклонений (девианта); s² – дисперсия; n-1 – число степеней свободы; h²_x – сила влияния на резульативный признак; * – влияние достоверно при p<0,05.

вания травостоев она увеличивалась, занимая в среднем за 2020–2022 гг. наибольшую долю в общей дисперсии резульативного признака «урожайность СВ во второй год жизни» (h²_A=53,8 %). Несмотря на небольшую долю участия «условий года» в резульативном признаке «урожайность СВ на третий год жизни» (h²_A=5,2 %) в среднем за 2021–2023 гг. нулевую гипотезу его влияния необходимо отвергнуть (F_φ/F₀₅=1,1). К четвертому году жизни влияние генотипа было недостоверным (F_φ<F₀₅).

Значительное влияние во все годы использования травостоев оказывал фактор «влияние отбора». Сила его воздействия на резульативный признак «урожайность СВ» варьировала от минимально достоверной (h²_B=7,6 %) на третий год жизни травостоев в среднем за 2021–2023 гг. до максимальной в травостоях четвертого года жизни в среднем за 2022–2023 гг. (h²_B=85,3 %). Полученные результаты подтверждают рабочую гипотезу об эффективности использовании теории жизненных стратегий Грайма и г-отбора для создания селекционного материала люцерны изменчивой с рядом положительных свойств кормовой продуктивности в первые годы жизни.

Выводы. Использование многократного отбора из трех сортов люцерны (Белгородская 86, Краснояружская 1, Краснояружская 2) биотипов с высокой семенной продуктивностью в год посева позволило создать селекционные образцы (МЛ-образцы), которые достоверно (p<0,05) превосходят исходные сорта в год посева по урожаю СВ на 32,1...36,0 %, во второй год жизни – на 16,9...22,5 %. Наибольший сбор сухого вещества отмечен у селекционного образца К-2 МЛ: в год посева – 490...553 г/м², на второй жизни травостоев – 799...939 г/м².

Вместе с тем, все созданные селекционные МЛ-образцы характеризуются резким снижением кормовой продуктивности на четвертый год использования травостоев: в среднем за 2022–2023 гг. сбор СВ у образца Б-86 МЛ составил 56,5 % от уровня исходного сорта Белгородская 86; у К-1 МЛ – 56,1 % от сорта Краснояружская 1 и у К-2 МЛ – 54,5 % от сорта Краснояружская 2.

Изученные селекционные образцы перспективны для создания сортов суперинтенсивного типа с использованием травостоев в течение не более трех лет жизни.

Литература.

1. Тимошкин О. А. Урожайность и биологическая эффективность возделывания смешанных посевов люцерны изменчивой и костреца безостого // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 7. С. 12–18.
2. Чернявских В. И. Продуктивность бобовых трав и их травосмесей со злаками на черноземе карбонатном эродированном в условиях юго-запада ЦЧР // *Кормопроизводство*. 2009. № 9. С. 16–19.
3. Приемы повышения семенной продуктивности люцерны / Ш. М. Абасов, М. Ш. Гаплаев, М. Ш. Абасов и др. // *Земледелие*. 2021. № 7. С. 40–43.
4. Результаты изучения нового сорта люцерны изменчивой Сударьяна / С. А. Игнатъев, А. А. Регидин, К. Н. Горюнов и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 8. С. 25–29.
5. Володина И. А., Марунова Л. К. Изучение комбинационной способности сортопопуляций люцерны изменчивой (*Medicago varia* L.) для успешной селекции в условиях Среднего Поволжья // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. № 3 (55). С. 86–95.
6. Annicchiarico P. Alfalfa forage yield and leaf/stem ratio: Narrow-sense heritability, genetic correlation, and parent selection procedures // *Euphytica*. 2015. Vol. 205. P. 409–420. doi: 10.1007/s10681-015-1399-y.
7. Genomic Prediction for 25 Agronomic and Quality Traits in Alfalfa (*Medicago sativa*) / C. Jia, F. Zhao, X. Wang, et al. // *Front. Plant Sci*. 2018. Vol. 9. Article 1220. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.01220/full> (дата обращения 17.10.2023). doi: 10.3389/fpls.2018.01220.
8. Думачева Е. В., Чернявских В. И. Влияние способа возделывания люцерны гибридной на семенную продуктивность потомства первого поколения на карбонатных почвах Центрально-Чернозёмного региона // *Кормопроизводство*. 2014. № 2. С. 23–25.
9. Косолапов В. М., Чернявских В. И., Костенко С. И. Развитие современной селекции и семеноводства кормовых культур в России // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021. Т. 25. № 4.

- C. 401–407. doi: 10.18699/VJ21.044.
10. Genomic prediction for canopy height and dry matter yield in alfalfa using family bulks / M. H. M. L. Andrade, J. P. Acharya, J. Benevenuto, et al. // *The Plant Genome*. 2022. Vol. 15. Article e20235. URL: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tpg2.20235> (дата обращения 17.10.2023). doi: 10.1002/tpg2.20235.
 11. The History of Domestication and Selection of Lucerne: A New Perspective from the Genetic Diversity for Seed Germination in Response to Temperature and Scarification / W. Ghaleb, L. Q. Ahmed, A. J. Escobar-Gutierrez, et al. // *Front. Plant Sci.* 2021. Vol. 11. Article 578121. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.578121/full> (дата обращения 17.10.2023). doi: 10.3389/fpls.2020.578121.
 12. Breeding Alfalfa (*Medicago sativa* L.) Adapted to Subtropical Agroecosystems / J. P. Acharya, Y. Lopez, B. T. Gouveia, et al. // *Agronomy*. 2020. Vol. 10. No. 5. Article 742. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/5/742> (дата обращения 17.10.2023). doi: 10.3390/agronomy10050742.
 13. Achievements and Challenges in Improving Temperate Perennial Forage Legumes / P. Annicchiarico, B. Barrett, E. Ch. Brummer, et al. // *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2015. Vol. 34. No. 1–3. P. 327–380. doi: 10.1080/07352689.2014.898462.
 14. Annicchiarico P., Pecetti L. Comparison among nine alfalfa breeding schemes based on actual biomass yield gains // *Crop Science*. 2021. Vol. 61. P. 2355–2370. doi: 10.1002/csc.2.20464.
 15. Миркин Б. М., Усманов И. Ю., Наумова Л. Г. Типы стратегий растений: место в системах видовых классификаций и тенденции развития // *Журн. общ. биол.* 1999. Т. 60. № 6. С. 581–595.
 16. Grime J. P. Vegetation classification by reference to strategies // *Nature*. 1974. Vol. 250. No. 5461. P. 26–31. doi: 10.1038/250026a0.
 17. Чернявских В. И. Рекуррентная селекция как основа повышения продуктивности люцерны в Центрально-Чернозёмном Регионе // *Кормопроизводство*. 2016. № 12. С. 40–44.
 18. Косолапов В. М., Чернявских В. И. Достижения ФНЦ «ВИК имени В. Р. Вильямса» в изучении кормовых растений // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2023. № 1. С. 34–38. doi: 10.31857/2500-2082/2023/1/34-38.
 19. Селекция и семеноводство люцерны и других трав: моногр. / И. К. Ткаченко, Н. А. Сурков, В. И. Чернявских и др. Белгород: Крестьянское дело, 2005. 392 с.
 20. Думачева Е. В., Чернявских В. И. Биологический потенциал бобовых трав в естественных сообществах эрозийных агроландшафтов Центрального Черноземья // *Кормопроизводство*. 2014. № 4. С. 8–11.
 21. Legume Seed Production Meeting Market Requirements and Economic Impacts / B. Boelt, B. Julier, D. Karagic, et al. // *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2015. Vol. 34. No. 1–3. P. 412–4427. doi: 10.1080/07352689.2014.898477.
 22. Development of a Model, Selection and Evaluation of the Source Material for the Plant Breeding of Alfalfa Varieties with Increased Seed Productivity / G. T. Ualiyeva, U. M. Sagalbekov, M. E. Baidalin, et al. // *OnLine Journal of Biological Sciences*. 2022. Vol. 22. No. 1. P. 139–148. doi: 10.3844/ojbsci.2022.139.148.
 23. Экологическое изучение сортообразцов люцерны различного географического происхождения в условиях юга Среднерусской возвышенности / М. А. Тормозин, В. И. Чернявских, Л. Д. Сайфутдинова и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2023. № 1. С. 20–24.
 24. Методические указания по изучению коллекции многолетних кормовых трав / сост.: П. А. Лубенец, А. И. Иванов, Ю. И. Кириллов и др. Л.: ВИР, 1979. 42 с.
 25. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: (С основами статистической обработки результатов исследований). М.: Книга по Требованию, 2012. 352 с.
 26. UPOV TG/6/4 «Guidelines For The Conduct Of Tests For Distinctness, Homogeneity And Stability (*Medicago sativa* L. & *Medicago X varia* Martyn)». Original: English/anglais/englisch Date/Datum: 1988–10–21. URL: https://www.upov.int/edocs/tgdocs/en/tg006_04.pdf (дата обращения: 18.10.2023).
 27. Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: Высш. школа, 1990. 352 с.
 28. Тормозин М. А., Чернявских В. И. Реализация продуктивного потенциала популяций *Medicago varia* Mart. в условиях среднего Урала // *Кормопроизводство*. 2022. № 10. С. 18–22. doi: 10.31857/S2500262723010040.

Поступила в редакцию 05.10.2023
 После доработки 21.10.2023
 Принята к публикации 10.11.2023

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПОЛИФЕНОЛОВ В РАСТЕНИЯХ ЯЧМЕНЯ НА СТРЕССОВЫХ ПОЧВЕННЫХ ФОНАХ

О. Н. Шуплецова, доктор биологических наук, Е. В. Товстик, кандидат биологических наук,
И. Н. Щенникова, доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН

Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого,
610007, Киров, ул. Ленина, 166 а
E-mail: olga.shuplecova@mail.ru

С целью оценки стрессоустойчивости генотипов изучали влияние почвенных стрессоров на содержание полифенольных веществ в зерне, соломе, корнях ячменя (*Hordeum vulgare* L.) различных сортов с дифференциацией по происхождению (отечественная и зарубежная селекция) и способам получения (гибридизация и клеточная селекция). Растения выращивали в вегетационных сосудах с дерново-подзолистой почвой в естественных условиях до созревания семян. Схема опыта включала следующие варианты: избыточное содержание кадмия (Cd^{2+} 6,4 мг/кг); повышенная кислотность ($pH_{KCl}=4,8$); смоделированная засуха в межфазный период выход в трубку – колошение; без стрессовой нагрузки при $pH_{KCl}=6,5$ (контроль). Содержание полифенолов в пересчете на галловую кислоту определяли спектрофотометрическим методом. Суммарное накопление полифенолов в зерне в условиях засухи (9,18...11,13 мг/г) и в присутствии избытка Cd^{2+} в почве (9,07...9,10 мг/г) превосходило величину этого показателя в контроле на 2,5...14,8 % и 2,8...8,5 % соответственно. На кислой почве количество полифенолов в зерне достоверно уменьшилось, по сравнению с контролем, у всех отечественных сортов ячменя, созданных на кислых почвах или на кислых селективных средах *in vitro*, у Витрум – на 16,1 %, Родник Прикамья – на 11,8 %. У сортов зарубежной селекции (Зазерский 85, Triumph и Tallon) в кислых условиях величина этого показателя наоборот возрастала на 2,2...4,8 %. Большая часть полифенолов находилась в связанном состоянии. Их свободная фракция распределялась по органам (% от общего количества в растении) следующим образом: солома (41,4...49,1) > корни (32,4...42,5) > зерно (15,6...22,6). Среди изучаемых стрессоров повышенная кислотность в большей степени способствовала увеличению накопления свободных полифенолов, относительно контроля, в первую очередь в корнях: у сортов и регенерантов селекции Федерального аграрного научного центра Северо-Востока – на 19,0 %; зарубежной селекции – на 35,7 %.

REACTION OF BARLEY VARIETIES ON THE CONTENT OF POLYPHENOLS ON STRESS SOIL BACKGROUNDS

O. N. Shupletsova, E. V. Tovstik, I. N. Shchennikova

Federal Agrarian Scientific Center of the North-East of N. V. Rudnitsky,
610007, Kirov, ul. Lenina, 166 a
E-mail: olga.shuplecova@mail.ru

In order to assess the stress resistance of genotypes, we studied the influence of soil stressors on the content of polyphenolic substances in grain, straw, and roots of barley (*Hordeum vulgare* L.) of various varieties with differentiation by origin (domestic and foreign selection) and methods of production (hybridization and cell selection). The plants were grown in vegetative tanks with sod-podzolic soil in natural conditions until the seeds ripened. The experimental design included the following options: with excess cadmium (Cd^{2+} 6.4 mg/kg); increased acidity ($pH_{KCl}=4.8$); simulated drought in the interphase period, emergence into the tube – earing; without stress load at $pH_{KCl}=6.5$ (control). The content of polyphenols in terms of gallic acid was determined by the spectrophotometric method. The total accumulation of polyphenols in grain under drought conditions (9.18...11.13 mg/g) and in the presence of excess Cd^{2+} in the soil (9.07...9.10 mg/g) exceeded the control by 2.5...14.8 % and 2.8...8.5 %, respectively. On acidic soil, compared with the control, the amount of polyphenols in grain significantly decreased in all domestically bred barley varieties that underwent selection on acidic soils or selection on acidic selective media *in vitro*, in Vitrum – by 16.1 %, Rodnik Prikamye – by 11.8 %. In varieties of foreign selection (Zazersky 85, Triumph and Tallon), under acidic conditions, the value of this indicator, on the contrary, increased by 2.2...4.8 %. Most of the polyphenols were in a bound state. The distribution of free fraction polyphenols among organs (% of the total amount in the plant) was revealed: straw (41.4...49.1) > roots (32.4...42.5) > grain (15.6...22.6). Among the stressors studied, increased acidity contributed to a greater extent to the increase in the relative accumulation of free polyphenols and most significantly in the roots – in varieties and regenerants of the selection of the Federal Agrarian Research Center of the North-East by 19.0 %; foreign selection – by 35.7 %.

Ключевые слова: полифенолы, сорт, ячмень (*Hordeum vulgare* L.), регенерант, почвенный фон, кадмий, повышенная кислотность, засуха.

Key words: polyphenols, variety, barley (*Hordeum vulgare* L.), regenerant, soil background, cadmium, high acidity, drought.

В природной среде факторы, действующие на живые организмы, постоянно изменяются. В условиях нестабильного климата отмечают усиление прежде всего абиотических стрессоров [1]. Экологические проблемы усугубляются на фоне роста населения и интенсификации сельского хозяйства [2]. Эти предпосылки актуализируют необходимость создания адаптивных сортов сельскохозяйственных культур [3]. Для их выведения, наряду с традиционными методами, используют биотехнологические приемы, в частности клеточную селекцию, что повышает генетическое разнообразие селекционного

материала и расширяет спектр генотипов с желаемыми хозяйственно ценными признаками. В качестве биохимических маркеров стрессового состояния растений все чаще рассматривают фенольные соединения [4, 5], одна из важнейших функций которых – участие в защите от окислительного стресса благодаря выраженной антиоксидантной активности. Окислительный стресс при этом может быть вызван засухой [6], засолением [7], ионной токсичностью [8] и прочими факторами.

Природные фенольные соединения, в том числе полифенолы (ПФ) – продукты вторичного метаболиз-

ма растений [9]. В организм человека ПФ поступают, в основном, с пищей и имеют важное значение в профилактике и лечении многих заболеваний [10].

На сегодняшний день содержание и активность антиоксидантов фенольной природы достаточно подробно изучены в овощах и фруктах. Зерновые культуры в этом отношении исследованы в меньшей степени. Вместе с тем измерение концентрации ПФ в зерне различных культурных злаков особенно важно с точки зрения определения стрессоустойчивости генотипов, а также их пищевой и медицинской ценности. Кроме того, некоторые высокоактивные фенольные соединения присутствуют только в цельном зерне [9].

Антиоксиданты фенольной природы, как в свободном, так и в связанном состоянии, обнаружены в зерне ячменя, ржи, пшеницы, риса, овса, кукурузы [11] и представлены, в основном, фенольными кислотами, флавоноидами и лигнанами. Следует отметить, что на биосинтез ПФ в растительной ткани оказывает влияние не только генотип растений, но и условия их произрастания [12, 13]. Например, выявлено повышение их содержания в листьях и зерне пшеницы при солевом стрессе [14, 15], в зерне – при температурном стрессе [16]. При кадмиевом стрессе (20 мг/кг почвы) содержание хлорофилла, каротиноидов в листьях ячменя снижалось, а флавоноидов, антоцианов и других фенольных веществ – увеличивалось [17]. Установлено повышение концентрации фенолов в зерне ячменя в условиях засухи, что негативно влияло на качество солода, вкус и стабильность пива [18].

Среди абиотических факторов, особое внимание уделяют тяжелым металлам. По данным Россельхознадзора в результате обследования 14257,7 тыс. га пахотных угодий на предмет выявления загрязнения почв солями кадмия, выявлено 27,7 тыс. га с его содержанием выше предельно допустимой концентрации [19]. Наряду с технологическими выбросами, в почвы агроценозов кадмий может поступать в результате широкого использования удобрений на основе фосфатов, содержащих этот элемент в виде естественной примеси в фосфатной породе [20, 21]. Наибольший уровень кадмия отмечен в подзолистых и дерново-подзолистых почвах (0,7...1,3 мг/кг и выше) [22], наиболее характерных для Нечерноземной зоны РФ. Попадая в пищевые цепи, этот элемент становится опасным для человека как из-за токсического действия, так и по причине длительного периода выведения из организма [23].

На сегодняшний день влияние повышенной кислотности почв, основного стрессора, снижающего урожайность ячменя, и повышенного содержания кадмия в дерново-подзолистых кислых почвах, на содержание фенолов в тканях этой культуры практически не изучено.

Цель исследований – определить влияние почвенных стрессоров (избыточное содержание кадмия, повышенная кислотность и засуха) на содержание полифенольных веществ в растениях ячменя различных сортов для оценки потенциальной стрессоустойчивости генотипов и пищевой ценности зерна.

Методика. Работу проводили в Федеральном аграрном научном центре (ФАНЦ) Северо-Востока (г. Киров). Объектами изучения служили 9 сортов ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.):

сорта различного эколого-географического происхождения, созданные методом гибридизации – Новичок, Родник Прикамья, Дина, Зазерский 85, Triumph, Tallon; сорта-регенеранты, индуцированные от различных исходных генотипов в каллусной культуре на селективных средах *in vitro*: Форвард и Витрум (отбор на среде с 40 мг/л Al^{3+} , рН=3,8), Бионик (двухстадийный отбор

с 40 мг/л Al^{3+} , рН=3,8 и 15 %-ным полиэтиленгликолем в качестве осмотика).

Изучаемые сорта были распределены на 3 группы по признакам «происхождение» – селекция ФАНЦ Северо-Востока (сорта гибридного происхождения, регенеранты) и зарубежная селекция (табл. 1).

Табл. 1. Характеристика сортов ячменя, используемых в исследованиях

Сорт	Происхождение	Критерий отбора
Селекция ФАНЦ Северо-Востока (сорта)		
Родник Прикамья	Россия	стандарт
Новичок		алюмо- и кислотоустойчивость
Дина		скороспелость, кислотоустойчивость
Селекция ФАНЦ Северо-Востока (регенеранты)		
Форвард	Россия	алюмо- и кислотоустойчивость
Бионик		устойчивость к засухе, алюмо- и кислотоустойчивость
Витрум		алюмо- и кислотоустойчивость
Зарубежная селекция (сорта)		
Зазерский 85	Беларусь	высокая урожайность
Triumph	Дания	
Tallon	Австралия	

В рамках вегетационного опыта проводили сравнительный анализ содержания ПФ в структурных органах ячменя, выращенного на почвенных фонах: с избыточным кадмием (Cd^{2+} 6,4 мг/кг почвы); повышенной кислотностью ($pH_{KCl}=4,8$) и засухой.

В вегетационные сосуды размером 1,5×1,3×0,3 м, наполненные почвой, высевали по 35 зерен, после всходов в эксперименте оставляли по 30 растений каждого генотипа и выращивали в естественных условиях до получения семенного потомства. Площадь питания растений составляла 4×15 см². В течение вегетационного периода осуществляли полив водопроводной водой по мере пересыхания почвы. Содержание полифенолов определяли в зерне, соломе и корнях после созревания семян.

Для создания стрессовых фонов использовали дерново-подзолистую почву, близкую по основным физико-химическим характеристикам и относящуюся к одной категории обеспеченности элементами питания, но отличающуюся по уровню кислотности (табл. 2). Кислым фоном служила почва с естественным уровнем $pH_{KCl}=4,8$ (сильнокислая реакция среды). Для создания кадмиевого фона за месяц до посева, в почву вносили раствор ацетата этого элемента. По данным атомно-абсорбционной спектроскопии содержание его подвижных соединений в почве в результате модельного загрязнения составило 6,4±0,5 мг/кг.

Табл. 2. Основные характеристики почвы

Показатель	Номер ГОСТа	Вариант опыта (почвенный фон)		
		кадмиевый	засуха	контроль
pH_{KCl}	26483-85	6,50±0,10	4,80±0,10	4,80±0,10
$C_{орг}, \%$	26213-91	2,50±0,30		2,00±0,20
$NO_3^-, \text{мг/кг}$	26488-85	1,7±0,5		1,10±0,30
$P_2O_5, \text{мг/кг}$	P 54650-2011	50±10		35±6

Моделирование засухи, которая обеспечивалась прекращением полива и пленочным укрытием от атмосферных осадков, исключая парниковый эффект, начинали в фазе «выход в трубку» (42-е сутки эксперимента). Время создания этого стресса соответствовало межфазному вегетационному периоду растений – от выхода в трубку до колошения.

Влияние стрессовых почвенных факторов на накопление ПФ оценивали в сравнении с фоном без стрессовой нагрузки (контроль). Отсутствие кадмия

в почве контрольного фона подтверждали результатами атомно-абсорбционной спектроскопии.

Содержание ПФ определяли спектрофотометрическим методом по ГОСТ Р 55488–2013. В качестве стандарта использовали галловую кислоту. Суммарное содержание ПФ измеряли в щелочных извлечениях из зерна. В качестве экстрагента использовали раствор гидроксида натрия (2 н). Щелочные экстракты нейтрализовали соляной кислотой (3 М). Экстрагирование свободных ПФ из растительных тканей осуществляли 70 %-ным раствором этанола при температуре 5 °С в течение 16 ч [24]. Соотношение сырье : экстрагент составляло 1:100. Количество связанных ПФ в зерне определяли по разности между их суммарным содержанием в щелочных извлечениях и содержанием свободных ПФ в этанольных экстрактах.

Статистическую обработку экспериментальных данных осуществляли методом дисперсионного анализа, используя пакет прикладных программ *Microsoft Excel 2013* и *AGROS*. В таблицах и на рисунке приведены средние значения из 9 аналитических повторений и их квадратичные отклонения, различия значимы при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. В представленных исследованиях основное внимание уделяли количественной оценке ПФ в зерне ячменя исследуемых генотипов. Растения наиболее активно накапливали ПФ (суммарное количество) при выращивании в условиях засухи (9,18...11,13 мг/г, в среднем по генотипам 9,60 мг/г; достоверно выше контроля у сортов Форвард, Новичок, Зазерский 85), и в присутствии избытка ионов кадмия в почве (9,07...9,10 мг/г, в среднем 9,05 мг/г; достоверно выше контроля у сортов Новичок, Зазерский 85), что

Табл. 3. Содержание полифенольных веществ в зерне ячменя при выращивании в различных почвенных условиях, мг/г сухой фитомассы

Фракция полифенолов	Почвенный фон			
	контроль	кадмиевый	кислый	засуха
Форвард				
Суммарное	8,85±0,13	9,07±0,32	8,34±0,91	9,39±0,26*
Свободные	4,42±0,61	2,09±0,10*	2,15±0,01*	2,46±0,07*
Связанные	4,43	6,98	6,19	6,93
Бионик				
Суммарное	8,89±0,39	9,09±0,33	8,91±0,07	10,22±1,34
Свободные	4,49±0,45	2,39±0,16*	2,47±0,15*	2,48±0,05*
Связанные	4,4	6,7	6,44	7,74
Витрум				
Суммарное	9,06±0,14	9,10±0,07	7,61±0,61*	9,31±1,06
Свободные	2,74±0,03	2,39±0,08*	2,51±0,01*	2,33±0,26*
Связанные	6,32	6,71	5,1	6,98
Новичок				
Суммарное	8,48±0,34	9,29±0,04*	8,50±0,26	9,18±0,39*
Свободные	2,32±0,07	2,09±0,11*	2,36±0,16	2,09±0,07*
Связанные	6,16	7,2	6,14	7,09
Родник Прикамья				
Суммарное	9,05±0,11	9,12±0,39	7,99±0,49*	10,63±0,98
Свободные	2,64±0,07	2,09±0,10	2,25±0,14	2,79±0,18
Связанные	6,41	7,03	5,7	7,84
Дина				
Суммарное	9,31±0,22	9,37±0,14	8,65±0,93	11,13±1,35*
Свободные	2,00±0,28	1,98±0,01	2,31±0,13	2,55±0,02*
Связанные	7,31	7,39	6,34	8,58
Зазерский 85				
Суммарное	7,78±0,01	8,42±0,56*	8,37±0,66	10,13±0,15*
Свободные	2,04±0,03	2,01±0,15	2,18±0,06*	2,46±0,01
Связанные	5,74	6,41	6,19	7,67
Triumph				
Суммарное	8,81±0,74	8,89±0,39	8,96±0,24	8,34±0,16
Свободные	2,41±0,01	2,01±0,11*	2,09±0,04*	2,43±0,14
Связанные	6,40	7,88	6,57	5,91
Tallon				
Суммарное	8,26±0,75	9,08±0,16	8,46±0,15	8,14±0,67
Свободные	2,27±0,11	1,90±0,01*	1,94±0,16*	1,95±0,07
Связанные	5,99	7,18	6,52	6,19

*различия с контролем достоверны при $P > 0,95$.

превышало контроль на 2,5...14,8 % и 2,8...8,5 % соответственно (табл. 3). Исключением были сорта Triumph и Tallon, для которых на фоне засухи отмечали тенденцию снижения величины этого показателя, по сравнению с контролем, на 5,4 и 1,5 % соответственно. На кислой почве наблюдали уменьшение содержания фенольных соединений у сортов ячменя селекции ФАНЦ Северо-Востока (достоверно у сортов Витрум – на 16,1 %, Родник Прикамья – на 11,8 %), характеризующихся кислотостойкостью, приобретенными в результате селекции на кислых дерново-подзолистых почвах или отбора на кислых селективных средах *in vitro*. У сортов зарубежной селекции (Зазерский 85, Triumph и Tallon) в таких условиях величина этого показателя имела тенденцию к повышению, относительно контроля, на 2,2...4,8 %.

Фенольные соединения присутствовали в зерне как в свободном, так и в связанном состоянии. Исследования показали значительные изменения баланса фракций «свободная / связанная форма» в зависимости от сорта и условий произрастания. Так, количество свободных полифенольных веществ в растительных образцах изменялось в диапазоне 1,98...4,49 мг/г, связанных – 4,42...8,58 мг/г. Большая часть ПФ в зерне находилась в связанном состоянии. Такое структурирование, как известно, может затруднять процессы усвоения этих компонентов макроорганизмами и, в конечном итоге, снижать пищевую ценность зерновой продукции. Наличие избыточного кадмия или повышенная кислотность почвенного раствора, в основном, негативно сказывались на содержании свободных ПФ в зерне. Если в контрольных условиях их доля в общем количестве составляла 30,3...50,6 %, то в упомянутых стрессовых условиях – 20,2...27,3 % (см. табл. 3).

Согласно результатам дисперсионного анализа (табл. 4), суммарное количество и содержание связанной фракции ПФ в зерне в значительной мере зависело от среды выращивания (38,5 % и 48,1 % соответственно), тогда как уровень свободной фракции в равной степени определялся генотипом (26,9 %) и средой (26,0 %).

Для определения активности синтеза фенольных

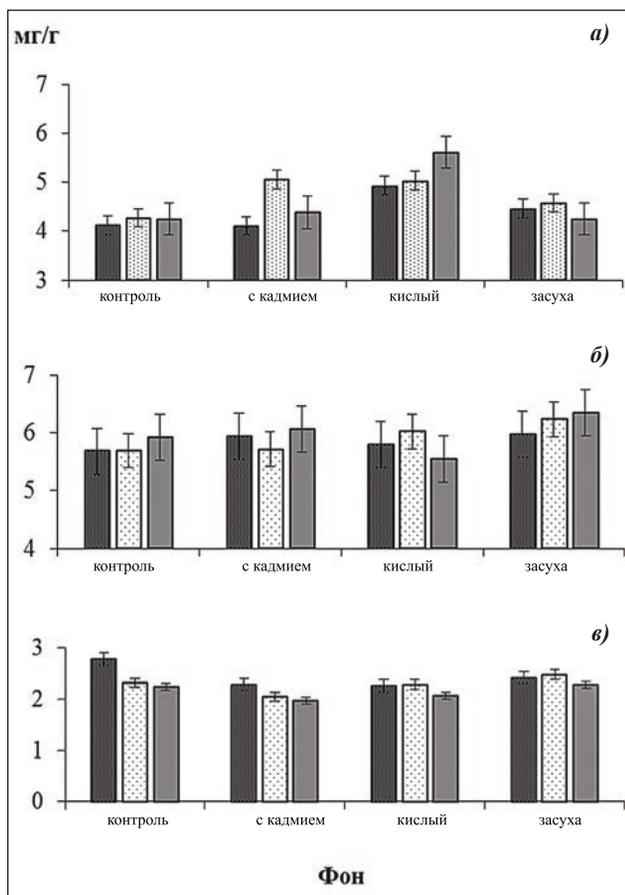
Табл. 4. Влияние факторов на накопление полифенолов в зерне

Фракция полифенолов	Генотип (фактор А)	Фон (фактор В)	Взаимодействие факторов (А × В)
Суммарное количество	12,1	38,5	11,0
Свободные	26,9	26,0	9,6
Связанные	9,8	48,1	6,7

соединений в различных органах растений проводили сравнительный анализ содержания свободных ПФ как наиболее мобильной фракции в корнях, соломе и зерне. Их распределение по органам изменялось в следующих пределах (% от общего количества в растении): солома (41,4...49,1) > корни (32,4...42,5) > зерно (15,6...22,6).

Повышенная кислотность почвы активизировала накопление свободных ПФ в корнях у всех групп исследуемых генотипов: сорта и регенеранты селекции ФАНЦ – на 19,0 %; зарубежной селекции – на 35,7 %. Аналогичный эффект оказывал кадмий, но только для сортов гибридного происхождения ФАНЦ (на 24,6 %). Различия по величине этого показателя между группами генотипов на контрольном фоне и в условиях засухи носили недостоверный характер (см. рисунок).

Накопление ПФ в соломе варьировало в пределах 5,23...7,73 мг/г в зависимости от генотипа (см. рисунок). Наибольшие различия с контролем наблюдали у групп зарубежных сортов (в среднем по генотипам) – в условиях засухи превышение на 7,1 %, на кислом фоне – снижение



Содержание свободных полифенолов в корнях (а), соломе (б), зерне (в) ячменя исследуемых генотипов:
 ■ – регенераты селекции ФАНЦ Северо-Востока;
 □ – сорта селекции ФАНЦ Северо-Востока;
 ▨ – сорта зарубежной селекции.

на 6,5 %. Следует отметить, что у сортов этой группы на кислом фоне концентрация ПФ в соломе находилась на уровне величины этого показателя в корнях.

Содержание свободных ПФ в зерне на различных почвенных фонах имело более стабильный характер, по сравнению с корнями и соломой. У сортов, не прошедших отбор *in vitro* в культуре изолированной ткани, величина этого показателя практически не менялась в зависимости от условий произрастания, тогда как у регенерантов уровень свободных ПФ в зерне на всех стрессовых фонах снижался, по сравнению с контролем, на 11,1...17,9 %.

Если считать активизацию биосинтеза фенольных соединений в растительной ткани показателем стрессированности растений, полученные результаты вполне согласуются с направлениями селекции исследуемых генотипов.

Выводы. Среди изучаемых стрессоров повышенная кислотность почв в большей степени увеличивала различия между группами сортов, дифференцированными по происхождению. Изменение суммарного количества ПФ в зерне, относительно контроля, носило в большинстве случаев недостоверный характер. Однако отмечена тенденция к повышению величины этого показателя на кадмиевом и засухливых фонах у всех исследуемых сортов; на кислом фоне – у сортов зарубежной селекции, тогда как у сортов ФАНЦ Северо-Востока она снижалась (достоверно у Витрум – на 16,1 %, Родник Прикамья – на 11,8 %).

Условия произрастания генотипов также влияли на баланс свободных и связанных форм ПФ. Отмечена достоверная сортоспецифичность по накоплению свободной фракции, как показателя, более чувствительного к внешним воздействиям. Более активно ПФ накапливались в соломе, чем в корнях (в среднем в 1,2 раза меньше) и зерне (в среднем в 2,4 раза меньше). Изучение характера распределения свободных ПФ по органам растений показало значительные сортовые колебания по их содержанию в корнях, наиболее остро реагирующих на почвенные стрессоры. Повышенная кислотность почвы активизировала накопление свободных ПФ в корнях у всех групп исследуемых генотипов, однако в большей степени у сортов зарубежной селекции (на 35,7 %, по сравнению с контролем). Уровень ПФ в корнях сортов селекции ФАНЦ на фоне с повышенной кислотностью почвы (на 19,0 % больше, по сравнению с контролем), свидетельствует о меньшем окислительном стрессе, что, вероятно, обусловлено их селекцией на кислых почвах (сорта гибридного происхождения) или отбором на кислых селективных средах *in vitro* (регенеранты).

Литература.

1. Nexus on climate change: Agriculture and possible solution to cope future climate change stresses / A. Shahzad, S. Ullah, A. A. Dar, et al. // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 12. No. 28. P. 14211–14232. doi: 10.1007/s11356-021-12649-8.
2. Arzani A., Ashraf M. Smart Engineering of Genetic Resources for Enhanced Salinity Tolerance in Crop Plants // *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2016. Vol. 3. No. 35. P. 146–189. doi: 10.1080/07352689.2016.1245056.
3. Шуплецова О. Н., Щенникова И. Н. Результаты использования клеточных технологий в создании новых сортов ячменя, устойчивых к токсичности алюминия и засухе // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016. Т. 20. № 5. С. 623–628. doi: 10.18699/VJ16.183.
4. Investigation of phenolic compounds with antioxidant activity in barley and oats affected by variation in growing location / Sh. Rao, A. B. Santhakumar, K. A. Chinkwo, et al. // *Cereal Chemistry*. 2020. Vol. 4. No. 97. P. 772–782. doi: 10.1002/cche.10291.
5. Role and regulation of plants phenolics in abiotic stress tolerance: an overview / M. I. Naikoo, M. I. Dar, F. Raghib, et al. // In book: *Plant Signaling Molecules*. Elsevier (Woodhead Publishing), 2019. Ch. 9. P. 157–168. doi: 10.1016/B978-0-12-816451-8.00009-5.
6. Аллагулова Ч. Р., Ласточкина О. В. Снижение уровня окислительного стресса в растениях пшеницы под влиянием эндофитных бактерий в условиях засухи // *Экобиотех*. 2020. Т. 3. № 2. С. 129–134. doi: 10.31163/2618-964X-2020-3-2-129-134.
7. Sirin S., Aslim B. Determination of antioxidant capacity, phenolic acid composition and antiproliferative effect associated with phenylalanine ammonia lyase (PAL) activity in some plants naturally growing under salt stress // *Proceedings*. 2017. Vol. 1. No. 1. Article 1035. URL: <https://www.mdpi.com/2504-3900/1/10/1035> (дата обращения: 01.03.2023). doi: 10.3390/proceedings1101035.
8. Guo T. R., Zhang G. P., Zhang Y. H. Physiological changes in barley plants under combined toxicity of aluminum, copper and cadmium // *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2007. Vol. 2. No. 57. P. 182–188. doi: 10.1016/j.colsurfb.2007.01.013.
9. Functional Properties of Polyphenols in Grains and Effects of Physicochemical Processing on Polyphenols / S. Tian, Y. Sun, Z. Chen, et al. // *Journal of Food Quality*. 2019. Article 2793973. URL: <https://www.hindawi>.

- com/journals/jfq/2019/2793973/ (дата обращения: 01.03.2023). doi: 10.1155/2019/2793973.
10. Рихтер А. А., Горина В. М. Полифенолы тканей плодов косточковых культур в профилактике некоторых заболеваний человека // Плодоводство. 2018. Т. 30(1). С. 273–283.
 11. Журлова Е. Д., Бондаренко А. В., Базильский Д. А. и др. Содержание свободных и связанных полифенолов злаковых и бобовых культур // Grain Products and Mixed Fodder's. 2017. Vol. 17. No. 2. P. 14–18.
 12. Influence of Abiotic Stress Factors on the Antioxidant Properties and Polyphenols Profile Composition of Green Barley (*Hordeum vulgare* L.) / P. L. Kowalczewski, D. Radzikowska, E. Ivanisova, et al. // International Journal of Molecular Sciences. 2020. Vol. 21. No. 2. Article 397. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/21/2/397> (дата обращения: 01.06.2023). doi: 10.3390/ijms21020397.
 13. Study of resistance of spring barley genotypes to zinc and cadmium / R. A. Alybaeva, U. A. Shilmanova, Z. A. Inelova, et al. // Eurasian Journal of Ecology. 2019. V. 59. No. 2. P. 60–68. doi: 10.26577/EJE.2019.v59.i2.05.
 14. Kiani R., Arzani A., Maibod S. A. M. M. Polyphenols, Flavonoids, and Antioxidant Activity Involved in Salt Tolerance in Wheat, *Aegilops cylindrica* and Their Amphidiploids // Frontiers in Plant Science. 2021. Vol. 12. URL <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2021.646221/full> (дата обращения: 01.06.2023). doi: 10.3389/fpls.2021.646221.
 15. Effects of sprouting and salt stress on polyphenol composition and antiradical activity of einkorn, emmer and durum wheat / F. Stagnari, A. Galieni, S. D'egidio, et al. // Italian Journal of Agronomy. 2018. Vol. 4. No. 11. doi: 10.4081/ija.2017.848.
 16. Effect of the time and temperature of germination on the phenolic compounds of *Triticum aestivum*, *L.* and *Panicum miliaceum*, *L.* / D. Ceccaroni, V. Alfeo, E. Bravi, et al. // Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie. 2020. Vol. 8. No. 127. Article 109396. URL: <https://www.agronomy.it/index.php/agro/article/view/848> (дата обращения: 01.06.2023). doi: 10.1016/j.lwt.2020.109396.
 17. Supplemental Effects of Biochar and Foliar Application of Ascorbic Acid on Physio-Biochemical Attributes of Barley (*Hordeum vulgare* L.) under Cadmium-Contaminated Soil / S. Yaseen, S. F. Amjad, N. Mansoor, et al. // Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 16. Article 9128. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/16/9128> (дата обращения: 01.06.2023). doi: 10.3390/su13169128.
 18. Identification of the gene network modules highly associated with the synthesis of phenolics compounds in barley by transcriptome and metabolome analysis / Z. Han, M. Ahsan, M. F. Adil, et al. // Food Chemistry. 2020. Vol. 323. Article 126862. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030881462030724X?via%3Dihub> (дата обращения: 01.06.2023). doi: 10.1016/j.foodchem.2020.126862.
 19. Проблемы деградации и восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения в России / под ред. А. В. Гордеева, Г. А. Романенко. М.: Росинформагротех, 2008. 67 с.
 20. Cadmium pollution from phosphate fertilizers in arable soils and crops: an overview / A. G. Nino-Savala, Z. Zhuang, X. Ma, et al. // Frontiers of Agricultural Science and Engineering. 2019. Vol. 6. No. 4. P. 419–430. doi: 10.15302/J-FASE-2019273.
 21. Селюкова С. В. Тяжелые металлы в агроценозах // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 8. С. 85–93. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10815.
 22. Термодинамическое состояние кадмия и свинца в почвах каштаново-солонцового комплекса / А. П. Ендовицкий, В. П. Калинин, В. Б. Ильин и др. // Агрохимия. 2008. № 9. С. 59–65.
 23. Фазлыева А. С., Даукаев Р. А., Каримов Д. О. Влияние кадмия на здоровье населения и способы профилактики его токсических эффектов // Медицина труда и экология человека. 2022. № 1 (29). С. 220–235. doi: 10.24411/2411-3794-2022-10115.
 24. Шеромов А. М., Товстик Е. В., Шуплецова О. Н. Валидация методики определения полифенолов в зерне ячменя // Съезд общества физиологов растений России «Биология растений в эпоху глобальных изменений климата: тезисы докладов. Уфа: УИБ УФИЦ РАН, 2023. С. 395.

Поступила в редакцию 14.07.2023
 После доработки 25.08.2023
 Принята к публикации 10.10.2023

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ПЛАСТИЧНОСТЬ, УРОЖАЙНОСТЬ И КАЧЕСТВО ЗЕРНА РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ СОИ В УСЛОВИЯХ КУРСКОЙ ОБЛАСТИ

Д. В. Дубовик, доктор сельскохозяйственных наук, **Е. В. Дубовик**, доктор биологических наук, **А. В. Шумаков**, **С. И. Кривошеев**, кандидаты сельскохозяйственных наук

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

Исследования проводили с целью отбора наиболее перспективных для условий Курской области сортов сои по результатам оценки их экологической адаптивности, урожайности и качества зерна. Работу выполняли на черноземе типичном мощном тяжелосуглинистом в 2020–2022 гг. Изучали 26 сортов сои из 5 селекционных центров. За период вегетации сои ГТК в 2020 г. был равен 0,78, в 2021 г. – 1,20, в 2022 г. – 1,33. Наибольшей экологической пластичностью ($b_i=2,01\dots2,91$) характеризовались сорта Фарта, Киото, Аванта, Спарта, Кофу, Зуша, Шатиловская 17, Кассиди, урожайность которых составляла 2,17...2,64 т/га, наименьшей – сорт Бара ($b_i=0,44$, урожайность – 1,90 т/га). В условиях Курской области все изучаемые сорта демонстрировали высокую экологическую стабильность ($S_i^2=0,01\dots0,65$), наибольшей она была у сортов Элана и Арлета ($S_i^2=0,01$). По гомеостатичности сортов лучшими были сорта Бара (Нот=14,29), Опус (Нот=10,70), Ирбис (Нот=8,58) и Баргузин (Нот=7,65). По показателю агрономической стабильности все изучаемые сорта пригодны для выращивания в Курской области ($A_s>70\%$). Наибольшей величиной этого показателя ($A_s=98,7\dots97,1\%$) характеризовались сорта Бара, Опус, Ирбис и Баргузин. В среднем за годы исследований среди раннеспелых сортов самую высокую урожайность сформировала Нордика (2,54 т/га), наименьшую – Казачка (1,93 т/га). У сортов среднеранней группы спелости наиболее высокий сбор семян отмечен у сорта Кофу (2,61 т/га). Урожайность остальных сортов этой группы спелости (Зуша, Славия, Киото, Кассиди и Амадеус) была ниже на 0,19...0,48 т/га. У ранних сортов самое высокое содержание белка в зерне отмечено у сорта Хана (45,9%), в среднеранней группе – у сорта Амадеус (45,6%). В целом для условий Курской области можно рекомендовать ранние сорта Нордика, Хана, Опус, Осмонь (урожайность 2,34...2,54 т/га), среднеранние сорта – Киото, Кофу (2,42...2,61 т/га), для ранней уборки – ультраскороспелый сорт Бара.

ECOLOGICAL PLASTICITY, YIELD AND GRAIN QUALITY OF VARIOUS SOYBEAN VARIETIES UNDER THE CONDITIONS OF KURSK REGION

D. V. Dubovik, E. V. Dubovik, A. V. Shumakov, S. I. Krivosheev

*Federal Agricultural Kursk Research Center,
305021, Kursk, ul. Karla Marksa, 70b,
E-mail: dubovikdm@yandex.ru*

The purpose of the research is to select the most promising soybean varieties for the conditions of the Kursk region, based on the results of an assessment of their environmental stability and plasticity, the level of yield and grain quality. The research was carried out in a field experiment on typical heavy-loamy chernozem (Kursk Region, Kursk District) in 2020–2022. 26 soybean varieties from 5 breeding centers were studied. During the growing season of soybeans, the HTC in 2020 amounted to 0.78, 2021 – 1.20, 2022 – 1.33. It was found that the varieties Farta, Kyoto, Avanta, Sparta, Kofu, Zusha, Shatilovskaya 17, Cassidy ($b_i=2.01-2.91$) were characterized by the greatest ecological plasticity at a yield level of 2.17...2.64 t/ha, and the Bar variety ($b_i=0.44$) was the least, the yield is 1.90 t/ha. Under the conditions of the Kursk region, all the studied varieties demonstrate high ecological stability ($S_i^2=0.01-0.65$) – Elana and Arleta were the most stable ($S_i^2=0.01$). According to the homeostaticity of the varieties, the best were Bara (Hom=14.29), Opus (Hom=10.70), Irbis (Hom=8.58) and Barguzin (Hom=7.65). According to the indicator of agronomic stability, all the studied varieties are suitable for production under the conditions of Kursk Region ($A_s>70\%$). The varieties Bara, Opus, Irbis and Barguzin had the greatest agronomic stability ($A_s=98.7-97.1\%$). On average, over the years of research, among the early-ripening varieties, the highest yield was formed by the Nordic (2.54 t/ha), the lowest by the Cossack (1.93 t/ha). In varieties of medium-early ripeness, the highest grain yield is observed in the Kofu variety (2.61 t/ha). The yield of the other varieties of this group of ripeness (Zusha, Slavia, Kyoto, Cassidy and Amadeus) was lower than that of Kofu by 0.19-0.48 t/ha. In early varieties, the highest protein content in grain was in the Hana variety (45.9%), in the middle early group – from 45.6% in the Amadeus variety. For the conditions of the Kursk region, early varieties of Nordica, Hana, Opus, Osmon are recommended (yield 2.34... 2.54 t/ha), medium-early varieties – Kyoto, Kofu (2.42...2.61 t/ha), for early harvesting – ultra-ripe Bar variety.

Ключевые слова: соя (*Glycine max*), сорт, экологическая пластичность и стабильность, гомеостатичность, агрономическая стабильность, урожайность, белок.

Key words: soybeans (*Glycine max*), variety, ecological plasticity and stability, homeostaticity, agronomic stability, yield, protein.

На сегодняшний день соя (*Glycine max*) стала ведущей зернобобовой культурой в России. Интерес сельхозтоваропроизводителей к ее выращиванию обусловлен высоким спросом на растительный белок [1]. Как известно, содержание белка в сое гораздо выше, чем у других зернобобовых культур, и может достигать 50%. Кроме того, семена сои содержат достаточно большое количество жиров (до 30%), что дополнительно делает ее ценной масличной культурой

[2]. В России площадь посевов сои значительно выросла благодаря высокой пластичности этой культуры к климатическим условиям, а также появлению новых раннеспелых сортов [3].

Значительное расширение производства сои произошло в Центрально-Черноземном регионе, на долю которого приходится 82% посевов в Центральном федеральном округе [4]. Курская область входит в число лидеров по производству сои. Начиная с 2010 г., посевные

площади этой культуры неуклонно растут и за последние 12 лет увеличились в 7,5 раза. В 2022 г. в Курской области соя занимала 312,3 тыс. га, что составляет 15 % от площади всех посевов [5]. Однако такое расширение сопровождается сокращением посевов других, не менее важных, культур и поэтому имеет ограниченный потенциал, особенно в региональном масштабе. Наиболее перспективный путь увеличения валовых сборов продукции – повышение урожайности путем освоения современных технологий возделывания [6, 7].

Сорт – биологическая основа любой агротехнологии. При правильном выборе он может обеспечить до 50 % прироста урожайности [8]. Наряду с высокой потенциальной продуктивностью, сорт должен быть адаптивным к стрессовым погодным условиям (жара,

засуха, заморозки), обладать устойчивостью к патогенам [9], устойчивостью к полеганию и растрескиванию бобов, дружностью созревания [10, 11, 12].

Цель исследований – отбор наиболее перспективных сортов сои для условий Курской области по результатам оценки параметров экологической адаптивности, уровня урожайности и качества зерна.

Методика. Работу выполняли в полевом опыте в ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр» (Курская область, Курский район, п. Черемушки) в 2020–2022 гг. Изучали 26 сортов сои, 5 селекционных центров (табл. 1).

Все исследуемые сорта внесены в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию, большинство из них районированы

Табл. 1. Краткая характеристика изучаемых сортов сои

Сорт	Краткая характеристика сорта
ФГБНУ Федеральный научный центр зернобобовых и крупяных культур	
Зуша	среднеранний, полудетерминантный, вегетационный период – 110 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 18,8 ц/га, максимальная – 37,5 ц/га, белок – 33,6 %, жир – 24,4 %
Осмонь	ранний, индетерминантный, вегетационный период – 110 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 20 ц/га, максимальная – 35,5 ц/га, белок – 31,7 %, жир – 22,9 %
Шатиловская 17	ранний, индетерминантный, вегетационный период – 105 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 24,4 ц/га, максимальная – 36,5 ц/га, белок – 37,0 %, жир – 21,5 %
ФГБНУ Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта»	
Баргузин	ранний, индетерминантный, вегетационный период – 110 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 23,9 ц/га, максимальная – 38,2 ц/га, белок – 35,3 %, жир – 22,0 %
Пума	ранний, детерминантный, вегетационный период – 103 дня, средняя урожайность в ЦЧР – 20,2 ц/га, максимальная – 41,4 ц/га, белок – 36,8 %, жир – 21,6 %
Вита	ранний, индетерминантный, вегетационный период – 111 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 22,6 ц/га, максимальная – 32,6 ц/га, белок – 34,8 %, жир – 21,8 %
Лири	ранний, индетерминантный, вегетационный период – 95 дней, средняя урожайность – 17,7 ц/га, максимальная – 28,3 ц/га, белок – 36,7 %, жир – 23,9 %
Славия	среднеранний, индетерминантный, вегетационный период – 108 дней, средняя урожайность – 13,6 ц/га, максимальная – 27,2 ц/га, белок – 37,4 %, жир – 23,0 %
Олимпия	ранний, индетерминантный, вегетационный период – 110 дней, средняя урожайность – 14,1 ц/га, максимальная – 30,7 ц/га, белок – 34,2 %, жир – 24,8 %
Ирбис	среднеранний, детерминантный, вегетационный период – 130 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 11,6 ц/га, максимальная – 35,0 ц/га, белок – 37,8 %, жир – 21,3 %
ООО Компания «СОКО»	
Бара	ультраскороспелый, полудетерминантный, вегетационный период – 90 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 26,4 ц/га, максимальная – 37,8 ц/га, белок – 40,6 %, жир – 22,7 %
Аванта	ранний, индетерминантный, вегетационный период – 106 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 22,8 ц/га, максимальная – 34,6 ц/га, белок – 35,9 %, жир – 22,0 %
Спарта	ранний, детерминантный, вегетационный период – 101 день, средняя урожайность – 16,5 ц/га, максимальная – 28,6 ц/га, белок – 38,0 %, жир – 21,1 %
Элана	ранний, индетерминантный, вегетационный период – 107 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 27,2 ц/га, максимальная – 43,6 ц/га, белок – 34,6 %, жир – 21,1 %
Уника	ранний, детерминантный, вегетационный период – 109 день, средняя урожайность в ЦЧР – 27,0 ц/га, максимальная – 42,1 ц/га, белок – 34,4 %, жир – 22,2 %
Арлета	ранний, индетерминантный, вегетационный период – 107 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 18,4 ц/га, максимальная – 38,9 ц/га, белок – 37,6 %, жир – 24,4 %
Фарта	ранний, индетерминантный, вегетационный период – 108 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 25,4 ц/га, максимальная – 41,0 ц/га, белок – 33,2 %, жир – 21,0 %
ФГБНУ Федеральный Ростовский аграрный научный центр	
Казачка	ранний, индетерминантный, вегетационный период – 100 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 21,7 ц/га, максимальная – 44,8 ц/га, белок – 34,0 %, жир – 24,4 %
SEMENCES PROGRAM INC.	
Сибиря	ранний, индетерминантный, вегетационный период – 110 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 22,8 ц/га, максимальная – 44,3 ц/га, белок – 36,1 %, жир – 22,0 %
Хана	ранний, детерминантный, вегетационный период – 120 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 26,3 ц/га, максимальная – 48,5 ц/га, белок – 39,2 %, жир – 20,4 %
Киото	среднеранний, детерминантный, вегетационный период – 125 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 19,8 ц/га, максимальная – 45,4 ц/га, белок – 34,0 %, жир – 24,2 %
Нордика	ранний, индетерминантный, вегетационный период – 115 дней, средняя урожайность – 22,7 ц/га, максимальная – 31,1 ц/га, белок – 40,2 %, жир – 19,7 %
Опус	ранний, детерминантный, вегетационный период – 110 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 19,8 ц/га, максимальная – 43,4 ц/га, белок – 34,6 %, жир – 23,8 %
Кофу	среднеранний, полудетерминантный, вегетационный период – 110 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 21,4 ц/га, максимальная – 44,9 ц/га, белок – 32,9 %, жир – 24,8 %
Кассиди	среднеранний, детерминантный, вегетационный период – 120 дней, средняя урожайность в ЦЧР – 20,5 ц/га, максимальная – 45,6 ц/га, белок – 34,2 %, жир – 23,8 %
Амадеус	среднеранний, индетерминантный, вегетационный период – 123 дня, средняя урожайность в ЦЧР – 26,4 ц/га, максимальная – 42,9 ц/га, белок – 43,0 %, жир – 18,9 %

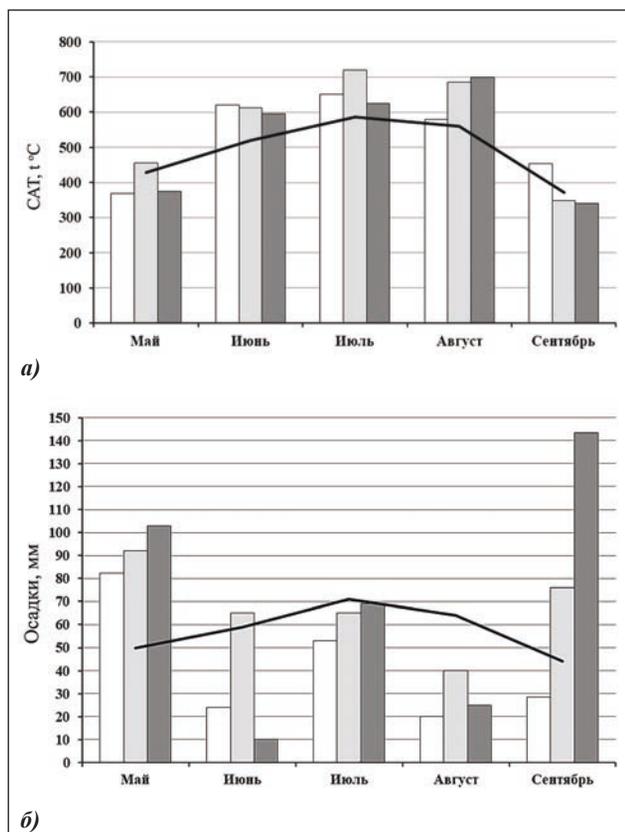


Рис. 1. Метеоусловия периодов вегетации сои в годы проведения исследований: а) сумма активных температур (SAT), б) сумма осадков: □ – 2020 г., ■ – 2021 г., ■ – 2022 г., — — — — — среднеемноголетнее.

в Центрально-Черноземном регионе, исключение составляют сорта Лира, Славия, Олимпия и Спарта, которые районированы по Северо-Кавказскому региону, а также Нордика – по Дальневосточному региону [13].

Показатели экологической адаптивности рассчитывали по урожайности семян сои. Линейная регрессия (b_i), которая характеризует экологическую пластичность сорта, и дисперсию (S_i^2), отражающую стабильность, рассчитывали по методике S. A. Eberhart and B. A. Russel [14, 15]. Так же определяли гомеостатичность (Hom) и коэффициент агрономической стабильности (As) [16].

Погодные условия лет исследований (2020–2022 гг.) были разнообразными. Сумма активных температур (SAT, t°C) в мае в 2021 г. находилась в пределах нормы, а в 2020 и 2022 гг. была ниже среднеемноголетних значений на 59 и 54°C соответственно. За вегетационный период сои, в годы исследований, сумма активных температур превышала среднеемноголетнюю на 167...357°C (рис. 1).

Атмосферные осадки характеризовались неравномерностью выпадения в течение вегетационного периода. Во все годы исследований в мае их сумма превышала среднеемноголетние значения на 32...53 мм.

Почва опытного участка – чернозем типичный мощный тяжелосуглинистый. Среднее содержание гумуса (по Тюрину) в пахотном слое составляло 5,1%, подвижного фосфора и калия (по Чирикову) – 190 и 136 мг/кг соответственно. Реакция почвенной среды слабокислая ($pH_{KCl} = 5,3$ ед.).

Посев сои осуществляли широкорядным способом (ширина междурядий 45 см). В остальном агротехника возделывания была общепринятой для региона. Площадь делянки 108 м², повторность 3-х кратная. Содержание

белка в семенах сои определяли по ГОСТ 10846-91, масла – по ГОСТ ISO 659-2017.

Показатели урожайности и содержания белка обрабатывали методом кластерного анализа в программе Statistica: мера сходства – Евклидово расстояние, метод группировки – метод ближайшего соседа. Статистическую обработку данных осуществляли методами дисперсионного и регрессионного анализов с использованием программ Microsoft Excel и Statistica.

Результаты и обсуждение. Наименее благоприятным для возделывания сои оказался 2020 г. ($I_j = -0,16$), наилучшие условия сложились в 2021 г. ($I_j = 0,15$), в 2022 г. I_j был равен всего 0,02, но в целом погодные условия способствовали росту и развитию изучаемых сортов сои (табл. 2).

Табл. 2. Урожайность сортов сои, индекс условий среды, экологическая пластичность и стабильность

Сорт	Урожайность, т/га			ΣX_i	X_i	b_i	S_i^2
	2020 г.	2021 г.	2022 г.				
Зуша	1,87	2,53	2,11	6,51	2,17	2,53	0,02
Осмонь	2,13	2,27	2,61	7,01	2,34	1,07	0,02
Шатиловская 17	1,81	2,35	2,38	6,54	2,18	2,28	0,13
Баргузин	2,25	2,30	2,17	6,72	2,24	0,59	0,05
Пума	1,99	2,07	1,89	5,95	1,98	0,62	0,04
Вита	1,85	1,87	2,03	5,75	1,92	0,52	0,02
Лира	2,00	2,03	2,27	6,30	2,10	0,62	0,08
Славия	2,21	2,28	2,14	6,63	2,21	0,64	0,06
Олимпия	2,20	2,46	1,94	6,60	2,20	1,15	0,03
Ирбис	1,97	2,01	1,92	5,90	1,97	0,51	0,13
Бара	1,90	1,92	1,87	5,69	1,90	0,44	0,02
Аванта	1,85	2,55	2,52	6,92	2,31	2,82	0,04
Спарта	1,80	2,53	2,26	6,59	2,20	2,82	0,07
Элана	2,08	2,12	2,23	6,43	2,14	0,61	0,01
Уника	1,88	2,15	2,02	6,05	2,02	1,28	0,02
Арлета	1,95	2,09	2,37	6,41	2,14	1,01	0,01
Фарта	1,82	2,54	2,56	6,92	2,31	2,91	0,09
Казачка	1,76	2,21	1,82	5,79	1,93	1,78	0,09
Сибиря	2,34	2,47	2,21	7,02	2,34	0,83	0,04
Хана	2,42	2,65	2,21	7,28	2,43	1,12	0,11
Киото	1,90	2,58	2,78	7,26	2,42	2,86	0,24
Нордика	2,43	2,56	2,62	7,61	2,54	0,98	0,20
Опус	2,30	2,40	2,33	7,03	2,34	0,80	0,19
Кофу	2,43	3,14	2,25	7,82	2,61	2,62	0,07
Кассиди	2,02	2,52	2,13	6,67	2,22	2,01	0,65
Амадеус	1,90	2,38	2,11	6,39	2,13	1,96	0,05
ΣX_j	53,06	60,98	57,45	171,49	57,26		
X_j	2,04	2,35	2,22				
I_j	-0,16	0,15	0,02				
HCp_{05}	0,30	0,32	0,35				

Наибольшей пластичностью ($b_i=2,01...2,91$) отличались сорта Фарта, Киото, Аванта, Спарта, Кофу, Зуша, Шатиловская 17, Кассиди. Они отнесены к группе интенсивных. Пластичность сортов Бара, Баргузин, Пума, Вита, Лира, Славия, Ирбис, Элана, Опус, Сибиря находилась на уровне $b_i=0,44...0,83$, что дает возможность считать их экстенсивными. Сорта Нордика, Арлета, Осмонь, Хана относятся к группе соответствующих условиям выращивания ($b_i=0,98...1,12$). Наибольшей пластичностью ($b_i=2,01...2,91$) отличались сорта Фарта, Киото, Аванта, Спарта, Кофу, Зуша, Шатиловская 17, Кассиди. Они отнесены к группе интенсивных. Пластичность сортов Бара, Баргузин, Пума, Вита, Лира, Славия, Ирбис, Элана, Опус, Сибиря находилась на уровне $b_i=0,44...0,83$, что дает возможность считать их экстенсивными. Сорта Нордика, Арлета, Осмонь, Хана относятся к группе соответствующих условиям выращивания ($b_i=0,98...1,12$).

Все изучаемые сорта в условиях Курской области продемонстрировали довольно высокую экологическую стабильность. Наибольшей величиной этого показателя характеризовались сорта Элана и Арлета ($S_i^2=0,01$). Кроме того, достаточно высоким уровнем экологиче-

Табл. 3. Селекционная ценность и агрономическая стабильность сортов сои

Сорт	Урожайность, т/га (среднее за 2020–2022 гг.)	Ном	As
Зуша	2,17	1,41	84,61
Осмонь	2,34	2,21	89,44
Шатиловская 17	2,18	1,48	85,29
Баргузин	2,24	7,65	97,07
Пума	1,98	4,36	95,45
Вита	1,92	3,72	94,85
Ли́ра	2,10	2,98	92,95
Славия	2,21	6,98	96,83
Олимпия	2,20	1,86	88,18
Ирбис	1,97	8,58	97,71
Бара	1,90	14,29	98,67
Аванта	2,31	1,34	82,84
Спарта	2,20	1,31	83,20
Элана	2,14	5,91	96,38
Уника	2,02	3,01	93,30
Арлета	2,14	2,13	89,99
Фарта	2,31	1,26	81,72
Казачка	1,93	1,52	87,34
Сибиря	2,34	4,21	94,44
Хана	2,43	2,68	90,93
Киото	2,42	1,27	80,94
Нордика	2,54	6,63	96,17
Опус	2,34	10,70	97,81
Кофу	2,61	1,44	81,95
Кассиди	2,22	1,88	88,18
Амадеус	2,13	1,89	88,70
НСР ₀₅	0,23		

ской стабильности (Si^2 от 0,02 до 0,09) отличались сорта Зуша, Баргузин, Пума, Вита, Ли́ра, Славия, Бара, Аванта, Спарта, Уника, Фарта, Казачка, Сибиря, Кофу. Самой низкой она была у сорт Кассиди ($Si^2=0,65$).

Наиболее ценным по гомеостатичности оказался сорт Бара ($Ном=14,29$). Также следует отметить высокую величину этого показателя ($Ном=7,65...10,70$) у сортов Опус, Ирбис и Баргузин (табл. 3).

Согласно расчету агрономической стабильности генотипов, характеризующей их хозяйственную ценность, все изучаемые сорта были пригодными для возделывания в условиях Курской области ($As > 70 \%$). Наибольшей ($As=97,07...98,67 \%$) она была у сортов Бара, Опус, Ирбис и Баргузин (см. табл. 3).

Урожайность сорта зачастую зависит от срок созревания семян. Большинство изучаемых сортов (73 %) отнесены к группе раннеспелых. Среди них наибольшую урожайность формировал сорт Нордика (2,54 т/га). У сортов Осмонь, Аванта, Фарта, Хана и Опус отмечено несущественное снижение величины этого показателя, по сравнению с Нордикой, на 0,11...0,23 т/га. Самое значительное уменьшение урожайности (на 20,5...24,4 %), по отношению к лучшему сорту, установлено для сортов Пума, Вита, Ирбис, Уника и Казачка.

Среди среднеранних наибольшим сбором семян отличался сорт Кофу (2,61 т/га). У остальных сортов этой группы спелости (Зуша, Славия, Киото, Кассиди и Амадеус) урожайность была ниже на 0,19...0,48 т/га.

Отдельно следует отметить ультраранний сорт Бара. Несмотря на наименьшую в опыте урожайность (1,90 т/га), он ценен тем, что служит хорошим предшественником для озимых зерновых культур благодаря раннему сроку уборки. Поскольку его растягивание при возделывании ранних и средних сортов приводит к невозможности посева озимых в оптимальный период [17].

Среди ранних сортов наибольшее содержание белка в семенах отмечено у сорта Хана (45,9 %), наименьшее – у сорта Казачка (38,3 %). У сортов Осмонь, Баргузин, Вита, Ли́ра, Олимпия, Спарта, Элана, Уника, Арлета, Фарта, Сибиря, Нордика величина этого показателя различалась не существенно и варьировала в преде-

лах 40,1...42,0 %. У сортов Шатиловская 17, Пума, Ирбис, Опус содержание белка находилось в пределах 42,7...43,8 % (табл. 4). Величина этого показателя у ультрараннего сорта Бара находилась на уровне 41,8 %, что близко к среднегрупповому значению (41,6 %).

Среди среднеранних сортов максимальное в опыте содержание белка отмечено в семенах сорта Амадеус (45,6 %), минимальное – у сорта Славия (39,6 %). У остальных изучаемых сортов этой группы спелости оно было существенно ниже, чем у сорта Амадеус, на 2,2...5,0 %.

Табл. 4. Качество зерна сортов сои (среднее за 2020–2022 гг.)

Сорт	Содержание белка, %	Содержание масла, %
ФГБНУ ФНЦ ЗБК		
Зуша	42,1	21,0
Осмонь	41,8	21,1
Шатиловская 17	43,0	19,7
ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК		
Баргузин	41,4	20,2
Пума	42,5	20,0
Вита	41,0	19,6
Ли́ра	40,6	19,8
Славия	39,6	19,7
Олимпия	40,4	19,6
Ирбис	42,7	19,3
ООО Компания «СОКО»		
Бара	41,8	21,2
Аванта	39,5	21,3
Спарта	40,3	20,3
Элана	40,5	22,9
Уника	40,3	20,9
Арлета	41,4	20,4
Фарта	40,1	20,2
ФГБНУ ФРАНЦ		
Казачка	38,3	21,0
SEMENCES PROGRAIN INC.		
Сибиря	42,0	19,6
Хана	45,9	16,9
Киото	43,2	19,8
Нордика	41,1	20,0
Опус	43,8	19,0
Кофу	40,6	20,3
Кассиди	43,4	18,9
Амадеус	45,6	18,0
t_{05}	$t_{\phi}=4,22 > t_{st}=2,06$	$t_{\phi}=2,12 > t_{st}=2,06$

Содержание масла в семенах сои снижалось по мере роста количества белка, что закономерно и подтверждается обратной высокой корреляционной связью ($r=-0,71$ $\alpha=0,05$).

По результатам кластерного анализа сорта сои были сгруппированы в два кластера (рис. 2). В первый вошли сорта Зуша, Сибиря, Осмонь, Бара, Пума, Ирбис, Шатиловская 17, Киото, Кассиди, Опус, Хана, Амадеус, Баргузин, Арлета, Вита, Нордика, Кофу, Ли́ра, Элана, Олимпия, Спарта, Уника, Фарта, Славия, Аванта, Казачка.

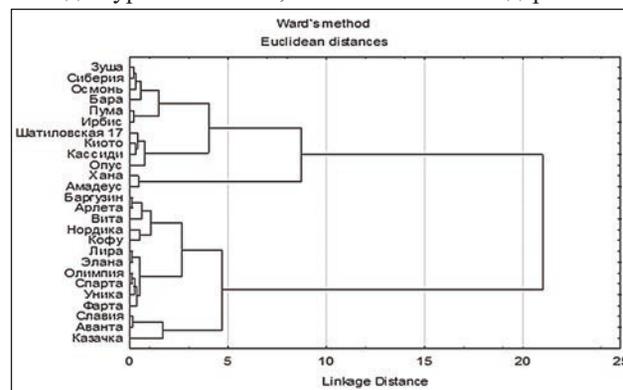


Рис. 2. Кластерный анализ сортов сои по критерию наибольшего сходства урожайности и белка.

белка. Сорты второго кластера (Баргузин, Арлета, Вита, Нордика, Кофу, Лира, Олимпия, Спарта, Уника, Фарта, Славия, Аванта, Казачка) реализуют генетический потенциал продуктивности и содержания белка только при благоприятных факторах внешней среды.

Выводы. В условиях Курской области все изучаемые сорта показывают высокую экологическую стабильность. Наибольшей она была у сортов Элана и Арлета ($S_i^2=0,01$), самой низкой – у сорта Кассиди ($S_i^2=0,65$). Максимальной в опыте экологической пластичностью отличаются сорта Фарта, Киото, Аванта, Спарта, Кофу, Зуша, Шатиловская 17, Кассиди ($b_i=2,01\dots2,91$), наименьшей – сорт Бара ($b_i=0,44$). Самой высокой гомеостатичностью характеризуются сорта Бара ($Hom=14,29$), Опус ($Hom=10,70$), Ирбис ($Hom=8,58$) и Баргузин ($Hom=7,65$). По показателю агрономической стабильности все изучаемые сорта пригодны для выращивания в условиях Курской области ($As>70\%$).

Среди раннеспелых сортов наибольшая урожайность зафиксирована у сорта Нордика (2,54 т/га), самое высокое содержание белка – у сорта Хана (45,9 %). Среди сортов среднеранней спелости наибольшими величинами этих показателей характеризовались соответственно сорта Кофу (2,61 т/га) и Амадеус (45,6 %).

Для возделывания в почвенно-климатических условиях Курской области по оптимальному сочетанию урожайности и содержания белка в зерне из ранних можно рекомендовать сорта Нордика, Хана, Опус, Осмонь (урожайность 2,34...2,54 т/га, содержание белка 41,1...45,9 %), из среднеранних – Киото, Кофу (урожайность 2,42...2,61 т/га, белок 40,6...43,2 %). При необходимости ранней уборки, несмотря на невысокую урожайность (1,90 т/га), целесообразно выращивать ультраскороспелый сорт Бара с содержанием белка в семенах 41,8 %, который созревает в среднем на 20 дней раньше других изученных сортов.

Литература.

1. Evaluation of the performance of advanced generation soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] genotypes using GGE biplot / C. Mukuze, P. Tukamuhabwa, M. Maphosa, et al. // *Journal of Plant Breeding and Crop Science*. 2020. Vol. 12 (3). P. 246–257. doi: 10.5897/JPBCS2020.0905.
2. Влияние погодных-климатических условий на содержание белка и масла в семенах сои на Северном Кавказе / Л. Ю. Новикова, И. В. Сеферова, А. Ю. Некрасов и др. // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018. № 6. С. 708–715. doi: 10.18699/VJ18.414.
3. Фокина Е. М., Титов С. А., Разанцев Д. Р. Агроэкологическая оценка перспективных образцов сои // *Достижения науки и техники АПК*. 2019. Т. 33. № 7. С. 21–23. doi: 10.24411/0235-2451-2019-10705.
4. Обзоры рынка масличных, подсолнечника, масел // *Газета Агро Новости от 24.01.2022 года*. URL: <https://agrobursa.ru/gazeta/podsolnechnik-maslo/2022/01/24/obzorynka-maslichnykh-podsolnechnika-masel.html>. (дата обращения: 31.10.2023).
5. Дериглазова Г. М. Мониторинг возделывания сои в климатических условиях Курской области // *Мелиорация и гидротехника*. 2022. № 4. С. 304–316. doi: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-304-316.
6. Ятчук П. В. Изучение некоторых элементов технологии возделывания перспективных сортов сои // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2023. № 1. С. 59–66. doi: 10.24412/2309-348X-2023-1-59-66.
7. Факторы агротехники, влияющие на формирование урожая и качества зерна сои / Н. Н. Лысенко, С. Н. Петрова, Ю. В. Кузмичева и др. // *Вестник Орловского государственного аграрного университета*. 2017. № 1 (64). С. 19–27.
8. Миленко О. Г. Продуктивность агрофитоценоза сои в зависимости от сорта, норм высева семян и способов ухода за посевами // *Известия ТСХА*. 2019. № 1. С. 170–181.
9. Булатова К. А. Урожайность семян сортов сои разных групп спелости в лесостепной зоне Среднего Поволжья // *Вестник Казанского ГАУ*. 2021. № 4. С. 10–14. doi: 10.12737/2073-0462-2022-10-14.
10. Детерминантный характер роста зернобобовых культур: роль в доместикации и селекции, генетический контроль / Е. А. Крылова, Е. К. Хлесткина, М. О. Бурляева и др. // *Экологическая генетика*. 2020. Т. 18. № 1. С. 43–58. doi: 10.17816/ecogen16141.
11. Тимохин А. Ю., Бойко В. С., Омелянюк Л. В. Продуктивность сои в различных условиях выращивания на юге Западной Сибири // *Земледелие*. 2022. № 6. С. 26–30. doi: 10.24412/0044-3913-2022-6-26-31.
12. Влияние плотности посева сои сорта Кружевница на урожайность и качество семян в условиях юга Приамурья / Г. П. Чепелев, М. П. Михайлова, А. Е. Гретченко и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 8. С. 80–84. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10814.
13. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). М.: ФГБНУ «Росинформатгортех», 2022. 646 с. URL: <https://dachanadvoih.ru/wp-content/uploads/2022/11/gosreestr-rus.pdf> (дата обращения: 31.10.2023).
14. Eberhart S. A., Russel W. A. Stability parameters for comparing varieties // *Crop. Sci.* 1966. Vol. 6. No. 1. P. 36–40.
15. Децына А. А., Илларионова И. В., Щербинина В. О. Расчет параметров экологической пластичности и стабильности масличных сортов подсолнечника селекции ВНИИМК // *Масличные культуры*. 2020. № 3 (183). С. 31–38. doi: 10.25230/2412-608X-2020-3-183-31-38.
16. Белявская Л. Г., Белявский Ю. В., Диянова А. А. Оценка экологической стабильности и пластичности сортов сои // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2018. № 4. С. 42–48. doi: 10.24411/2309-348X-2018-11048.
17. Использование сои в качестве предшественника для яровой и озимой пшеницы на агроземномумосовых глеевых почвах Приморского края / Р. В. Тимошинов, А. Г. Клыкков, Е. Ж. Кушаева и др. // *Вестник ДВО РАН*. 2018. № 3. С. 35–42.

Поступила в редакцию 18.09.2023
После доработки 16.10.2023
Принята к публикации 07.11.2023

ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ И КАЧЕСТВА НОВОГО ЗЕРНОФУРАЖНОГО СОРТА ОВСА ИРТЫШ 33

О. А. Юсова, П. Н. Николаев, В. С. Васюкевич, кандидаты сельскохозяйственных наук

Омский аграрный научный центр,
644012, Омск, просп. Королева, 26
E-mail: yusova@anc55.ru

Исследования проводили с целью оценки влияния фотосинтетической активности нового перспективного сорта овса Иртыш 33 на формирование урожайности и качества зеленой массы. Эксперименты выполняли в 2017–2022 гг. в Западной Сибири. Почва – чернозем обыкновенный, выщелоченный. В 2019 г. наблюдали оптимальную влагообеспеченность (ГТК=1,10), в 2018 г. – избыточное увлажнение (ГТК = 1,39), в 2017, 2020–2022 гг. – засушливые условия (ГТК=0,58–0,77). Объект исследований – новый перспективный сорт Иртыш 33, стандарт – Орион. В среднем за период исследований Иртыш 33 характеризовался более развитым листовым аппаратом с площадью ассимиляционной поверхности в фазе выметывания выше стандарта на 35,5 %, в фазе цветения – на 24,9 %. Массовая доля сухой биомассы нового сорта в указанные сроки была больше, чем у стандарта, соответственно на 14,6 % и 10,2 %, урожайность кормовой массы – на 7,3 и 3,2 т/га. Такие результаты обусловлены, в том числе повышением фотосинтетического потенциала у сорта Иртыш 33, по сравнению со стандартом, на 30 %. Содержание белка в кормовой массе нового сорта в фазе выметывания было больше, чем у стандарта, на 0,4 %, сбор белка – на 1,07 т/га, а массовая доля клетчатки – ниже на 0,7 %. Влияние накопления сухой биомассы на формирование массовой доли клетчатки возрастало от выметывания к цветению с $r=0,515\pm 0,02$ до $r=0,684\pm 0,103$, на урожайность – с $r=0,479\pm 0,008$ до $r=0,602\pm 0,015$, чистой продуктивности фотосинтеза на накопление сухой биомассы – с $r=0,115\pm 0,004$ до $r=0,419\pm 0,017$, на урожайность – с $r=0,460\pm 0,020$ до $r=0,601\pm 0,051$. Средняя прямая степень сопряженности ассимиляционной поверхности листа с массовой долей белка, отмеченная в фазе выметывания ($r=0,640\pm 0,19$), в следующей фазе изменилась на среднюю обратную ($r=-0,508\pm 0,021$).

PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY – AS A FACTOR IN THE FORMATION OF YIELD AND QUALITY OF THE NEW GRAIN FODDER OAT VARIETY IRTYSH 33

O. A. Yusova, P. N. Nikolaev, V. S. Vasyukevich

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

The purpose of the research is to assess the influence of photosynthetic activity of the new promising oat variety Irtysh 33 on the formation of its yield and quality of green mass. The experiments were performed in 2017–2022. The soil of the experimental plots is ordinary leached chernozem with a humus content of 5.7...7.5 %. The experiment was carried out in 4 repetitions. The seeding rate is 4 million viable seeds/ha. The area of the plots is 10 m². The object of research is a new promising oat variety Irtysh 33, the standard variety is Orion. Optimal moisture supply was observed in 2019 (hydrothermal coefficient = 1.10), excess moisture in 2018 (hydrothermal coefficient = 1.39), and dry conditions in 2017, 2020–2022. (hydrothermal coefficient = 0.58–0.77). On average, over the period of research, the variety Irtysh 33 was characterized by a more developed leaf apparatus (35.5 and 24.9 % higher than the standard for leaf surface area in the sweeping and flowering phases, respectively). The new variety was characterized by an increased mass fraction of dry biomass, exceeding the Orion standard by 14.6 % in the heading phase and by 10.2 % in the flowering phase. The Irtysh 33 variety provided photosynthetic potential 30 % higher than the standard. The new variety generated forage yields that were 7.3 and 3.2 t/ha higher than the standard in the heading and flowering phases, respectively. An increased quality of forage mass of the Irtysh 33 variety in the heading phase was also noted – higher than the standard for the mass fraction of protein by 0.4 %, for protein collection by 1.07 t/ha and 0.7 % lower than the standard for the mass fraction of fiber. Indicators of photosynthetic activity had a direct impact on the formation of the yield and quality of green mass of the Irtysh 33 variety, depending on the development phase. From spawning to flowering, the role of accumulation of dry biomass on the formation of the mass fraction of fiber (from $r=0.515\pm 0.02$ to $r=0.684\pm 0.103$, respectively) and yield (from $r=0.479\pm 0.008$ to $r=0.602\pm 0.015$) increased, as well as the role of net productivity of photosynthesis (for the accumulation of dry biomass from $r=0.115\pm 0.004$ to $r=0.419\pm 0.017$; for yield from $r=0.460\pm 0.020$ to $r=0.601\pm 0.051$). The average direct degree of conjugation of the assimilation surface of the leaf with the mass fraction of protein, noted in the sweeping phase ($r=0.640\pm 0.19$), in the next phase changed to the average reverse ($r=-0.508\pm 0.021$).

Ключевые слова: яровой овес (*Avena sativa* L.), сорт, урожайность, зеленая масса, белок, клетчатка.

Key words: spring oats (*Avena sativa* L.), variety, productivity, green mass, protein, fiber.

Согласно данным Росстата, на протяжении последних двух десятилетий происходило значительное снижение площади посевов овса в РФ с 2900 тыс. га в 2010 г. до 2160 тыс. га в 2022 г., или на 25,5 % [1]. В Сибирском Федеральном округе в 2022 г. Омская область по площади посевов это культуры занимала 6-е место (108,1 тыс. га), по валовым сборам – второе (20 %; 140,9 тыс. т). Необходимо отметить, что валовой сбор овса в Омской области

был значительно выше, чем в регионах с большей площадью посевов (Кемеровская, Новосибирская и Томская области, Республика Хакасия). Очевидно, это связано с возделыванием более урожайных сортов, которые считают основным средством производства [2, 3], обеспечивающим стабильно высокую урожайность [4, 5, 6].

Кроме того, овес ценят как поставщик вегетативной массы, используемой в виде сочного корма, сенажа,

сена и др. Поэтому создание укосных и зерноукосных сортов – важнейшее направление селекции культуры [7]. Овес посевной – растение умеренного климата, которое для эффективного поглощения фотосинтетической активной радиации (ФАР) формирует мощный листовой аппарат, способный обеспечивать накопление урожая, не уступающего другим зерновым культурам при меньшей инсоляции [8].

Несмотря на значительный спрос на вегетативную массу в животноводстве, в Госреестр селекционных достижений включено ограниченное количество сортов кормового назначения, в том числе омской селекции Орион, Иртыш 22, Иртыш 33.

Цель исследований – оценка влияния фотосинтетической активности нового перспективного сорта овса Иртыш 33 на формирование его урожайности и качества зеленой массы.

Методика. Эксперименты выполняли в 2017–2022 гг. в Омском аграрном научном центре, расположенном в южной лесостепи Западной Сибири. Почва опытных участков представлена черноземом обыкновенным. Содержание нитратного азота в слое почвы 0...50 см, согласно градации А. Е. Кочергина, было низким (5,7 мг/кг), P₂O₅ и K₂O (по Чирикову) – очень высоким (в среднем за период исследований соответственно 235 мг/кг и 320,0 мг/кг почвы), гумуса (по Тюрину) – от 5,70 до 7,50 %.

Агротехника возделывания – общепринятая для Западно-Сибирского региона. Основная обработка почвы заключалась в послеуборочном лущении стерни и зяблевой вспашке. Весной проводили закрытие влаги путем

боронования и последующую культивацию на глубину 6...8 см. Овес высевали третьей культурой после пара (пшеница–пшеница–пар) сеялкой ССФК-7 на делянках площадью 10 м² (повторность 4-кратная, норма высева 4 млн всхожих семян/га). Уход за посевами включал комплекс таких мероприятий, как уничтожение почвенной корки и борьба с сорняками (путем боронования через 5...6 суток после посева и в фазе трех-четырех листьев). Уборку осуществляли селекционным комбайном Hege-125 в фазе полной спелости.

Объект исследований – новый перспективный сорт овса Иртыш 33, стандарт – Орион. Сорт Иртыш 33 – среднеспелый, продолжительность вегетационного периода 83...87 суток. Основные достоинства: высокая урожайность зеленой массы в сочетании с высокой устойчивостью к пыльной головне. Включен в Госреестр РФ с 2023 г. и допущен к использованию в Западно-Сибирском (10) и Восточно-Сибирском (11) регионах.

Наблюдения, оценки и учеты выполняли согласно методике Федерального исследовательского центра Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР) [9]. Определяли урожайность, содержание белка и клетчатки в зеленой массе [10], площадь листовой поверхности, фотосинтетический потенциал (ФП) и чистую продуктивность фотосинтеза (ЧПФ) [11] в фазы выметывания и цветения. Статистическую обработку результатов проводили по Б. А. Доспехову [12].

Годы исследований характеризовались контрастными погодными условиями (рис. 1). Оптимальную влагообеспеченность наблюдали в 2019 г. (ГТК=1,10); избыточное увлажнение – в 2018 г. (ГТК=1,39); засушливые условия – в 2017, 2020–2022 гг. (ГТК=0,58...0,77). Период вегетации 2017 г. характеризовался повышенными температурами воздуха в мае, июне и августе (+0,6...+3,9 °С к среднемуголетним) и недостатком увлажнения в мае и августе (5,4...26 мм, что ниже нормы на 26,5...84,7 %). В июле отмечен недобор температур (–0,3...–1,6 °С к среднемуголетним) и осадки ливневого характера (на 4...60,5 % превышающие норму). В мае и июне 2018 и 2019 гг. наблюдали превышение нормы по увлажнению (103,1...209,9 %), аналогичную ситуацию отмечали в августе 2018 г. (120,9 %). Повышенными температурами воздуха в 2019 г. характеризовались май и август (+1,9 и +0,4 °С к среднемуголетним), в 2018 г. – июнь (+1,5 °С к норме). Наиболее засушливые условия сложились в 2020–2022 гг. при существенном превышении средних температур воздуха в мае и июне (от +0,5 до +7 °С к норме), июле и августе 2020 и 2021 гг. (+0,6...+1,9 °С к среднемуголетним). Дефицит осадков наблюдали в мае 2020–2022 г. (22...53 % нормы), июне и июле 2020 и 2021 гг. (20,1...84,7 %), августе 2022 г. (76,8 % нормы).

Результаты и обсуждение. При анализе средних данных по обоим сортам (табл. 1) в фазе выметывания отмечена более высокая площадь листовой поверхности растений (167,5 см²/раст.), чем в фазе цветения (147,2 см²/раст.). Величина этого показателя у сорта Иртыш 33 была выше, чем у стандарта Орион, соответственно на 44,7 и 32,6 см²/раст. Изменчивость площади листьев у обоих сортов была значительной (у стандарта Орион 37,3 % в фазе выметывания и 55,1 % в фазе цветения; у сорта Иртыш 33 – 48,1 % и 57,4 % соответственно), что позволяет предположить высокую долю влияния условий возделывания на формирование этого признака.

Сухая биомасса в среднем по исследуемым сортам, напротив, имела тенденцию к нарастанию в фазе цветения (+0,1 г/раст., по отношению к фазе выметывания). Сорт Иртыш 33, аналогично предыдущему показателю, также характеризовался прибавкой к стандарту соот-

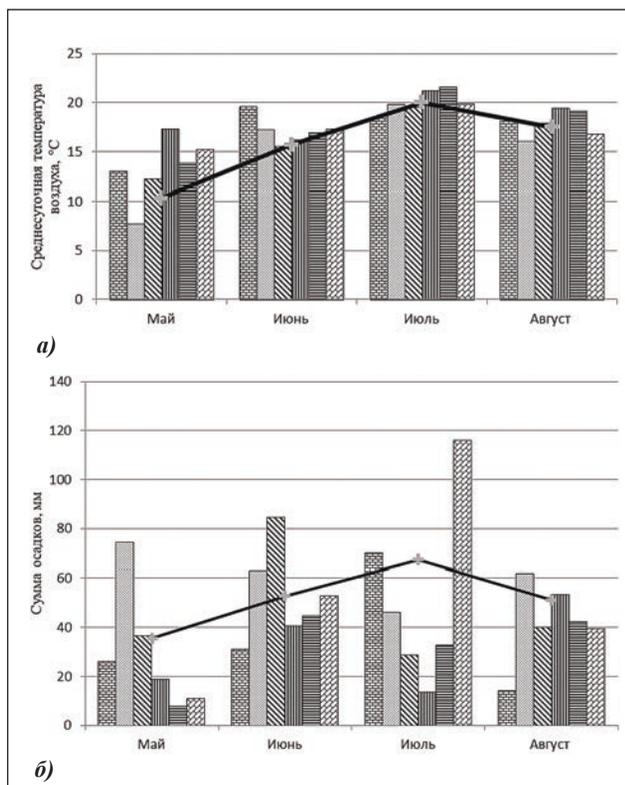


Рис. 1. Метеоусловия вегетационного периода овса в годы проведения исследований (Омская гидрометеорологическая станция): а) среднесуточная температура воздуха; б) сумма осадков: ■ – 2017 г., ■ – 2018 г., ■ – 2019 г., ■ – 2020 г., ■ – 2021 г., ■ – 2022 г., ■ – среднемуголетние данные.

Табл. 1. Характеристика сорта овса Иртыш 33 по ассимиляционной поверхности и накоплению сухой биомассы (среднее за 2017–2022 гг.)

Сорт	Площадь листовой поверхности			Сухая биомасса растения		
	$\bar{x} \pm S_x$, см ² /раст.*	Lim., см ² /раст.	CV, %	$\bar{x} \pm S_x$, г/раст.	Lim., г/раст.	CV, %
Фаза выметывания						
Орион, st.	125,9±18,6	77,1...198,2	37,3	4,1±0,3	3,36...3,50	12,7
Иртыш 33	170,6±31,8	96,6...297,6	48,1	4,7±0,3	3,50...5,66	16,1
НСР ₀₅	10,1			0,4		
Фаза цветения						
Орион, st.	130,9±27,3	67,4...251,2	55,1	4,9±0,3	4,17...5,82	14,5
Иртыш 33	163,5±35,4	79,4...322,4	57,4	5,4±0,5	3,94...7,38	23,0
НСР ₀₅	9,2			0,2		

*здесь и в табл. 2, 3: \bar{x} – среднее значение признака; S_x – абсолютная ошибка; Lim – размах варьирования признака по годам; CV – коэффициент вариации.

ветственно на 0,6 и 0,5 г/раст. Наблюдаемая средняя изменчивость по накоплению сухой биомассы в фазе выметывания у стандарта (CV = 12,7 %), а также в фазах выметывания и цветения у сорта Орион (CV = 16,1 и 14,5 % соответственно) свидетельствует об относительно устойчивом характере накопления сухой биомассы. У сорта Иртыш 33 в фазе цветения наблюдали широкий диапазон варьирования сухой биомассы (Lim = 3,94...7,38 г/раст.) при более значительной изменчивости (CV = 23 %).

Табл. 2. Характеристика сортов овса по фотосинтетической активности и продуктивности в межфазный период выметывание – цветение (среднее за 2017–2022 гг.)

Сорт	Фотосинтетический потенциал			Чистая продуктивность фотосинтеза		
	$\bar{x} \pm S_x$, см ² /раст.×сут.	Lim., см ² /раст.	CV, %	$\bar{x} \pm S_x$, г×см ² /раст.	Lim., г×см ² /раст.	CV, %
Орион, st.	899,2±154,8	505,7...1572,9	44,5	0,013±0,003	0,006...0,023	53,3
Иртыш 33	1175,3±229,7	659,8...2170,0	51,4	0,008±0,002	0,002...0,026	60,0
НСР ₀₅	79,7			0,003		

Интегральный показатель фотосинтеза растений – величина фотосинтетического потенциала (ФП) [13]. У стандартного сорта Орион он находился на уровне 899,2 см²/раст.×сут, что на 276,1 см²/раст.×сут, или 30 % меньше, чем у сорта Иртыш 33 (табл. 2). Чистая продуктивность фотосинтеза (ЧПФ) отражает образование в процессе фотосинтеза органических веществ за вычетом потерь на дыхание [14]. В отличие от ранее рассмотренных критериев, сорт Иртыш 33 по величине этого показателя достоверно уступал стандарту на 0,005 г×см²/раст., или 38 %. Коэффициент вариации ЧПФ и ФП у стандарта Орион была равен соответственно 44,5 % и 53,3 %; у сорта Иртыш 33 – 51,4 и 60,0 %. При этом имеются сведения о том, что ЧПФ может меняться в зависимости от нормы высева [15].

В среднем по сортам зеленая масса овса в фазе выметывания характеризовалась повышенной питательностью: массовая доля белка в этот период составляла 12,7 %, что на 1,1 % выше, чем в фазе цветения (табл. 3). Более высокий сбор белка с единицы площади также отмечен в фазе выметывания (+0,84 т/га по отношению к фазе цветения).

Табл. 3. Характеристика сорта овса Иртыш 33 по урожайности и качеству зеленой массы (среднее за 2017–2022 гг.)

Сорт	Массовая доля белка, %			Сбор белка, т/га	Массовая доля клетчатки, %			Урожайность зеленой массы		
	$\bar{x} \pm S_x$	Lim	CV		$\bar{x} \pm S_x$	Lim	CV	$\bar{x} \pm S_x$, т/га	Lim, т/га	CV, %
Фаза выметывания										
Орион, st.	12,3±1,3	8,1...16,7	25,7	3,74±0,15	30,8±1,3	25,5...34,5	10,4	35,4±6,4	20...54,2	44,3
Иртыш 33	13,1±1,0	9,6...16,3	19,0	4,81±0,21	30,1±1,2	26,5...33,5	9,0	42,7±7,5	24...64,5	43,1
Фаза цветения										
Орион, st.	11,9±0,8	8,8...15,2	17,3	3,38±0,15	27,6±1,5	23,0...31,5	13,6	33,0±4,5	23,6...46,6	33,5
Иртыш 33	11,2±0,8	8,7...13,7	16,8	3,49±0,18	27,3±1,7	20,5...31,0	15,2	36,2±4,1	26,0...48,2	27,8
НСР ₀₅	0,30			0,33	0,6			2,07		

Сорт Иртыш 33 по содержанию белка в зеленой массе в фазе выметывания превосходил стандарт на +0,4 %; в фазе цветения отмечена обратная картина, величина этого показателя у нового сорта была ниже, чем у стандарта, на 0,7 %. Повышенная изменчивость (CV = 25,7 %) массовой доли белка у сорта Орион в фазе выметывания обуславливала формирование более высокой верхней границы содержания белка в его зеленой массе (16,7 %), по сравнению с сортом Иртыш 33 (16,3 %). В остальных случаях изменчивость величина этого показателя была средней (CV = 16,8...19,0 %).

Клетчатка благоприятно влияет на качество продукции крупного рогатого скота. Ее недостаток приводит к накоплению токсинов в организме животного, но избыточное содержание в рационах снижает переваримость кормов [16]. Поэтому необходимо поддерживать баланс концентрации этого компонента в корме. В среднем по сортам в фазе цветения содержание клетчатки составляло 30,5 %, что на 3,0 % ниже, чем в фазе выметывания. Сорт Иртыш 33 характеризовался пониженной концентрацией клетчатки в зеленой массе (на 0,7 %), по отношению к стандарту, как в фазе выметывания, так и в фазе цветения. Изменчивость величины этого показателя в период выметывания была средней (у стандарта – 10,4 %, у сорта Иртыш 33 – 9,0 %), при цветении – значительной (соответственно 13,6 и 15,2 %).

В среднем по исследуемым сортам, урожайность зеленой массы в фазе выметывания составила 39,1 т/га, что на 4,5 т/га, или 11,5 %, выше, чем в фазе цветения. Сбор зеленой массы сорта-стандарта в фазе выметывания находился на уровне 35,4 т/га, в фазе цветения – 33,0 т/га. Урожайность сорта Иртыш 33 достоверно превышала величину этого показателя у стандарта на 7,3 и 3,2 т/га соответственно. Изменчивость признака в обеих фазах была значительной.

По результатам корреляционного анализа данных за 2017–2022 гг. отмечено изменение степени и направления сопряженности показателей ФП и ЧПФ с показателями качества и урожайности зеленой массы, в зависимости от фазы развития (рис. 2). Так, в фазе выметывания отмечена прямая средняя корреляция площади листовой поверхности с накоплением сухой биомассы ($r = 0,417 \pm 0,009$), которая снизилась до слабой отрицательной ($r = -0,175 \pm 0,008$) в фазе цветения, что можно объяснить конкуренцией между этими ростовыми процессами в растении. Площадь листьев в большей мере оказывала влияние на формирование ФП в фазе цветения ($r = 0,464 \pm 0,010$), чем в фазе выметывания ($r = 0,254 \pm 0,005$); противоположную ситуацию наблюдали в паре признаков «площадь листа – ЧПФ» – $r = 0,342 \pm 0,12$ и $0,231 \pm 0,006$ соответственно.

Средняя прямая степень сопряженности ассимиляционной поверхности с массовой долей белка, отмеченная в фазе выметывания ($r = 0,640 \pm 0,19$), в следующей фазе изменилась на среднюю обратную ($r = -0,508 \pm 0,021$). В фазе цветения отмечена отрицательная корреляционная зависимость между содержанием белка и всеми исследуемыми признаками (накопление сухой биомассы, ФП, ЧПФ, урожайность).

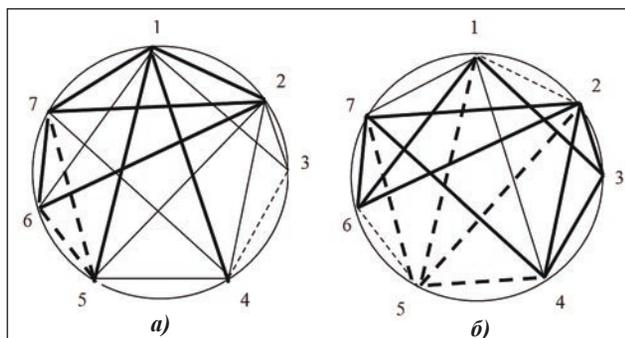


Рис. 2. Сопряженность показателей фотосинтетической активности с показателями урожайности и качества зеленой массы (среднее за 2017–2022 гг.): а) фаза выметывания, б) фаза цветения; 1 – площадь листовой поверхности, 2 – сухая биомасса растения, 3 – фотосинтетический потенциал; 4 – чистая продуктивность фотосинтеза, 5 – содержания белка в зеленой массе, 6 – содержание клетчатки в зеленой массе, 7 – урожайность зеленой массы; — — — — слабая положительная корреляция; - - - - слабая отрицательная корреляция; — · — · — средняя положительная корреляция; - · - · - средняя отрицательная корреляция.

Роль накопления сухой биомассы возростала от выметывания к цветению при формировании таких признаков, как ЧПФ (от $r=0,115\pm 0,009$ до $r=0,601\pm 0,104$ соответственно), массовая доля клетчатки (от $r=0,515\pm 0,023$ до $r=0,684\pm 0,103$) и урожайность (от $r=0,479\pm 0,008$ до $r=0,602\pm 0,015$). Аналогичным образом изменялась роль ЧПФ в формировании урожайности (от $r=0,115\pm 0,004$ до $r=0,419\pm 0,017$) и массовой доли клетчатки (от $r=0,460\pm 0,020$ и $r=0,601\pm 0,051$). Между ФП и ЧПФ также наблюдали изменение степени и направленности связи в процессе роста и развития растений (от $r=-0,282\pm 0,005$ до $r=0,682\pm 0,047$), что может быть вызвано донорно-акцепторными процессами.

Выводы. За период исследований сорт овса пленчатого Иртыш 33 достоверно превосходил стандарт Орион в фазах выметывания и цветения по площади листовой поверхности растений (на 35,5 и 24,9 % соответственно) и накоплению сухой биомассы (на 14,6 и 10,2 %). Фотосинтетический потенциал у нового сорта был больше, чем у стандарта, на 30 %.

Урожайность кормовой массы сорта Иртыш 33 в фазе выметывания превышала величину этого показателя у стандарта на 7,3 т/га, цветения – на 3,2 т/га. При этом массовая доля белка в зеленой массе в фазе выметывания была больше на 0,4 %, сбор белка – на 1,07 т/га, а содержания клетчатки – меньше на 0,7 %.

У сорта Иртыш 33 от выметывания к цветению возрастало влияние накопления сухой биомассы на формирование массовой доли клетчатки (от $r=0,515\pm 0,02$ до $r=0,684\pm 0,103$) и урожайности (от $r=0,479\pm 0,008$ до $r=0,602\pm 0,015$), а также чистой продуктивности фотосинтеза на накопление сухой биомассы (от $r=0,115\pm 0,004$ до $r=0,419\pm 0,017$) и урожайность (от $r=0,460\pm 0,020$ до $r=0,601\pm 0,051$). Средняя прямая степень сопряженности ассимиляционной поверхности листа с массовой долей белка, отмеченная в фазе выметывания ($r=0,640\pm 0,19$), по мере роста и развития растений изменялась на среднюю обратную ($r=-0,508\pm 0,021$).

Литература.

1. Главный межрегиональный центр. Посевные площади, валовые сборы и урожайность сельскохозяйственных культур в Российской Федерации. В 2022 году.

URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/29_cx_predv_2022.xlsx (дата обращения: 01.08.2023 г.).

2. Кардашина В. Е., Николаева Л. С. Агроэкологическая оценка сортов и перспективных линий овса универсального использования // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 5. С. 56–60. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10511.

3. Кардашина В. Е. Сравнительная оценка сортов овса уральской селекции и их родительских форм // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 6. С. 11–14. doi: 10.24411/0235-2451-2021-10602.

4. Асеева Т. А., Трифунтова И. Б. Адаптивная реакция сортов и селекционных линий ярового овса в условиях Среднего Приамурья // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36. № 4. С. 22–28. doi: 10.53859/02352451_2022_36_4_22.

5. Адаптивность сортов ячменя по признаку «масса 1000 зерен» в условиях лесостепи Омской области / О. А. Юсова, П. Н. Николаев, Н. И. Аниськов и др. // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 2. С. 24–28.

6. Оценка продуктивности и адаптивных свойств сортов ярового ячменя в условиях Сибирского Прииртышья / П. В. Поползухин, П. Н. Николаев, Н. И. Аниськов и др. // Земледелие. 2018. № 3. С. 40–43.

7. Кардашина В. Е., Николаева Л. С. Агроэкологическая оценка сортов и перспективных линий овса универсального использования // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 5. С. 56–60.

8. Любимова А. В., Еремин Д. И. Сортные особенности фотосинтетической активности овса посевного тюменской селекции при внесении минеральных удобрений // Аграрный вестник Урала. 2021. № 12. С. 59–76.

9. Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса / сост. И. Г. Лоскутов, О. Н. Ковалева, Е. В. Блинова. Изд. 4-е, доп. и перераб. Санкт-Петербург: Гос. науч. учреждение Всероссийский науч.-исслед. ин-т растениеводства им. Н. И. Вавилова, 2012. 63 с.

10. Пleshков Б. В. Практикум по биохимии растений. М.: Колос, 1985. 256 с.

11. Ничипорович А. А. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах. М.: Изд-во АН СССР, 1965. 170 с.

12. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2011. 350 с.

13. Белкина Р. И., Моисеева К. В., Поляков М. В. Фотосинтетический потенциал и продуктивность сортов яровой пшеницы разных групп спелости в северной лесостепи Тюменской области // Успехи современной науки. 2017. Т. 2. № 4. С. 153–156.

14. Соловьёв С. В. Приемы ухода за посевами и показатели чистой продуктивности фотосинтеза // Альманах современной науки и образования. 2012. № 3. С. 134–136.

15. Сортные технологии яровой мягкой пшеницы на дерново-подзолистых почвах / Н. В. Войтович, П. М. Политыко, Е. Ф. Киселёв и др. // Вестник Брянской ГСХА. 2019. № 5 (75). С. 23–27.

16. Байкалова Л. П., Серебренников Ю. И. Кормовая продуктивность и питательная ценность сортов костреца безостого в Красноярском крае // Вестник КрасГАУ. 2022. № 7 (184). С. 176–185.

Поступила в редакцию 31.08.2023
 После доработки 21.09.2023
 Принята к публикации 24.10.2023

АМИНОКИСЛОТНЫЙ СОСТАВ БЕЛКОВ ПЛЕНЧАТОГО И ГОЛОЗЕРНОГО ОВСА

Е. Н. Шаболкина, кандидат сельскохозяйственных наук, **С. Н. Шевченко**, доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, **Н. В. Анисимкина**

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. Н. М. Тулайкова,
446254, Самарская обл., пос. Безенчук, ул. Карла Маркса, 41
E-mail: samniish@mail.ru

Исследования проводили с целью оценки сбалансированности незаменимых аминокислот в белках пленчатых и голозерных сортов овса, относительно «эталонного белка», для определения возможности увеличения доли незаменимых аминокислот в продуктах питания и комбикормах при использовании зерна овса в качестве добавки при их производстве. Работу выполняли в 2018–2022 гг. в Самарской области. В качестве экспериментального материала использовали образцы зерна пленчатого овса сорта Конкур и голозерных сортов Бекас и Багет. Наибольшее содержание незаменимых аминокислот отмечено в зерне сортов голозерного овса – 39,9...41,0 г/кг. В том числе сумма критических аминокислот (лизин, метионин, триптофан) достигала 9,4...9,6 г/кг, что на 1,1...1,3 г/кг выше, чем у пленчатого сорта Конкур. Содержание незаменимых аминокислот в 1 г белка сорта Конкур составляло 249,7 мг, сорта Бекас – 268,4 мг, сорта Багет – 262,9 мг, или соответственно 69,4 %, 74,6 % и 73,0 % относительно рекомендованных норм ФАО/ВОЗ. Избыток некоторых незаменимых аминокислот в зерне голозерного овса (аминокислотный скор больше 100 %) вызвал разбалансировку соотношения незаменимых аминокислот, по сравнению с «эталонными» значениями, увеличивая при этом коэффициент различия аминокислотных скоров (КРАС). Величина этого показателя у сорта Конкур составила 24,2 %, сорта Бекас 33,9 %, сорта Багет 35,5 %, что способствовало снижению биологической ценности белков зерна голозерных сортов, по отношению к пленчатому. Высокое содержание незаменимых аминокислот в белке зерна голозерного овса делает целесообразным его использование в качестве балансирующего ингредиента при производстве продуктов и кормов с повышенной питательной ценностью.

AMINO ACID COMPOSITION OF PROTEINS OF HULLED AND NAKED OATS

E. N. Shabolkina, S. N. Shevchenko, N. V. Anisimkina

Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Tulajkov Samara Research Agricultural Institute,
446254, Samarskaya obl., pos. Bezenchuk, ul. Karla Marksa, 41
E-mail: samniish@mail.ru

The expansion of the production of products with specified functional indicators (cereals, bakery products, pasta, desserts, muesli, yogurts) and feed with a certain amino acid composition is the main task of the food industry and the feed industry, and naked oats have firmly occupied their own niche in these areas of processing. The purpose of the research is to establish the amino acid composition of oat proteins of the hulled oat variety Konkur and naked varieties Bekas and Baget, to assess the balance of essential amino acids in oat proteins relative to the «reference protein» (amino acid scale according to FAO / WHO data) in order to use grain as an additive in food and feed to increase the proportion of essential amino acids in them. The research was carried out during 2018–2022 at the experimental base of the Samara Research Institute of Agriculture. Grain samples of the varieties of filmy and naked oats Konkur, Bekas and Baget were used as experimental material. It was found that the highest proportion of essential amino acids was observed in varieties of naked oats 39,9–41,0 g/kg. The sum of critical amino acids (lysine, methionine, tryptophan) in naked oat varieties was 9,4–9,6 g/kg, which is 1,1–1,3 g/kg higher than in the filmy variety Konkur. According to studies, 1 g of Konkur variety protein contains 249,7 mg of essential amino acids, proteins of naked oat variety Bekas – 268,4 mg and Baget variety – 262,9 mg, which corresponds to 69,4 %, 74,6 % and 73,0 % relative to FAO/WHO recommended standards. The excess of some essential amino acids in naked oat varieties (amino acid score over 100 %) contributed to the imbalance in the ratio of essential amino acids to the «reference» values, while increasing the coefficient of difference in amino acid scores (KRAS protein of Konkur variety was 24,2 %, Bekas variety 33,9 %, varieties Baget 35,5 %), thereby contributing to a decrease in the biological value of the proteins of the varieties Bekas and Baget in relation to the protein of the filmy variety Konkur. Grain of naked oats with a high content of essential amino acids should be used as an ingredient in the production of food and feed with high nutritional value.

Ключевые слова: овес пленчатый и голозерный (*Avena sativa* subspecies *nudisativa*), незаменимые и заменимые аминокислоты, аминокислотная шкала, аминокислотный скор, коэффициент различия аминокислотных скоров.

Key words: hulled and naked oats (*Avena sativa* subspecies *nudisativa*), essential and non-essential amino acids, amino acid scale according to FAO/WHO, amino acid score, coefficient of difference in amino acid scores.

Научно-технический прогресс, техногенные и природные катастрофы, ведущие к ухудшению экологии на планете, влияют на здоровье населения. Правильное питание – залог плодотворной, продолжительной жизни людей и продукты переработки из овса считают неотъемлемой частью функционального и специализированного питания. Благодаря лечебным и диетическим качествам овес обладает большим потенциалом – содержание в зерне пищевых волокон-β-глюканов, полноценный на-

бор аминокислот, антиоксиданты, витамины, минеральные и биологически активные вещества нормализуют работу желудочно-кишечного тракта человека, способствуют профилактике различных заболеваний [1, 2].

Белок овса более сбалансирован по составу, по сравнению с другими зерновыми культурами, содержит все незаменимые аминокислоты, не синтезирующиеся в организмах человека и животных, характеризуется высокой биологической ценностью [3, 4]. Полноцен-

ность белков определяет не просто определенный набор аминокислот, но и их соотношение [5].

Расширение производства продуктов с заданными функциональными свойствами (каши, хлебобулочные изделия, макароны, десерты, мюсли, йогурты) и кормов определенного аминокислотного состава – основная задача пищевой индустрии и комбикормовой промышленности. Отдельную нишу в этих областях переработки прочно занял овес голозерный. Использование в хлебопечении в различном соотношении с пшеничной мукой цельнозернового зерна и сеяной муки из зерна овса увеличивает содержание микроэлементов (Mn, Fe), витаминов (тиамина и рибофлавина), растворимых и нерастворимых пищевых волокон в готовых изделиях [6, 7]. Благодаря сбалансированному аминокислотному составу, высокой энергетической ценности жиров овса, благоприятному соотношению жирных кислот в зерне, овес голозерный нашел широкое применение в качестве компонента комбикормов и кормосмесей для сельскохозяйственных животных [8, 9].

Научные исследования, селекционная работа, оптимизация технологий возделывания, направленные на повышение биологической ценности растительных белков путем увеличения содержания в них незаменимых аминокислот, на сегодняшний день очень перспективны и важны, так как аминокислоты, которые не синтезируются в организме человека и животных, должны поступать с пищей в полном объеме.

Цель исследований – оценить сбалансированность незаменимых аминокислот в белках пленчатых и голозерных сортов овса, относительно «эталонного белка», для определения возможности использования их зерна в качестве добавки к продуктам питания и комбикормам.

Методика. Работу проводили в 2018–2022 гг. на базе Самарского научно-исследовательского института сельского хозяйства (Самарская обл.). В качестве экспериментального материала использовали образцы зерна сортов овса пленчатого Конкур, голозерного – Бекас и Багет. Опыты закладывали на полях селекционного севооборота в питомниках конкурсного испытания при систематическом размещении, в четырехкратной повторности. Предшественник – чистый пар, учетная площадь делянок – 10 м², агротехника – общепринятая для зоны.

Почва опытного участка – чернозем обыкновенный, среднесуглинистый со следующими агрохимическими показателями в пахотном слое почвы: содержание гумуса (по Тюрину) – 4,0...4,4 %, легкогидролизуемого азота (ионометрическим методом) – 4,2...4,7 мг/100 г почвы, подвижного фосфора и калия (по Чирикову) – 20,6...23,6 мг/100 г и 19,1...19,8 мг/100 г почвы соответственно, рН солевой вытяжки – 6,2...6,8.

Содержание белкового азота определяли по методу Кьельдаля (ГОСТ 10846-91), аминокислотный состав белков – методом капиллярного электрофореза, основанным на кислотном гидролизе и переводе аминокислот в свободные формы с дальнейшим их разделением и количественном определении на приборе «КАПЕЛЬ-105М».

Для характеристики качества (биологической ценности) белка рассчитывали аминокислотный скор и коэффициент различия аминокислотного сора (КРАС, %). Аминокислотный скор отражает отношение незаменимых аминокислот в исследуемом белке к их содержанию в «эталонном белке», КРАС характеризует избыточное количество незаменимых аминокислот, которые не используются в белковом строителе. Статистическую обработку экспериментальных данных выполняли методом дисперсионного анализа.

Метеоусловия в годы исследований были различными: вегетационный период 2018 г. характеризовался недостаточным увлажнением (8...24 мм продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы) и пониженным температурным режимом (11,2...18,5 °С в первой и второй декаде июня). В дальнейшем отмечали суховеи в течение 3 дней, жаркую сухую погоду, что нарушало процесс формирования зерна. Метеорологические условия в 2019–2020 гг. отличались более изменчивым температурным режимом, который варьировал от уровня ниже среднееголетней нормы (на 8 °С) до суховея в течение 4...6 дней в период налива и созревания зерна. В 2021 г. на протяжении практически всего вегетационного периода наблюдали засуху, температура воздуха превышала среднееголетнюю на 0,5...9,0 °С, период роста и развития овса характеризовался как острозасушливый с гидротермическим коэффициентом 0,39. В 2022 г. вегетация проходила в благоприятных условиях, которые отличались достаточным количеством осадков (135...176 % от нормы) и пониженным температурным режимом (на 0,4...4,9 °С меньше среднееголетних значений).

Результаты и обсуждение. Погодные условия, сорт и географическая зона возделывания – важнейшие факторы, которые влияют на формирование белка в зерне [4, 9]. В условиях Среднего Поволжья в 2018–2022 гг. пленчатый сорт овса Конкур уступал голозерным по содержанию белка в зерне на 4,3...4,6 % (табл. 1). Максимальная в опыте величина этого показателя была отмечена у сортов Бекас и Багет в конкурсном сортоиспытании в 2019 г., что превышало содержание белка в зерне сорта Конкур на 5,7 %. В 2018 г. разница была еще больше и составляла 5,4...5,8 %, в 2020 и 2021 гг. она находилась на уровне 3,4...4,5 %. Достаточное количество осадков и пониженная, относительно среднееголетних значений, температура в 2022 г. не способствовали накоплению белка в зерне, у пленчатого сорта его содержание составляло 12,5 %, у голозерных – 15,2...15,6 %, разница между величинами этого показателя была наименьшей за все годы исследований и находилась на уровне 2,7...3,1 %.

Табл. 1. Содержание белка в зерне овса, %

Сорт	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	Среднее
Конкур	14,0	14,7	15,0	16,0	12,5	14,4
Бекас	19,4	20,4	19,1	19,4	15,2	18,7
Багет	19,8	20,4	19,5	19,7	15,6	19,0
НСР ₀₅	0,8	0,7	1,1	1,5	1,3	

В предыдущих исследованиях было отмечено преимущество сортов голозерного овса, по сравнению с пленчатыми, по содержанию не только белка, но и незаменимых аминокислот [10]. Синтез белковых веществ в организме, при отсутствии или нехватке одной из незаменимых аминокислот, невозможен [11, 12], поэтому дальнейшая работа была направлена на изучение соотношения аминокислот в зерне и сбалансированности аминокислотного состава.

Наибольшим количеством незаменимых аминокислот, определяющих питательную ценность, характеризовались сорта голозерного овса – 39,9...41,0 г/кг (табл. 2). У сорта Бекас величина этого показателя была на 2,7 % выше, чем у сорта Багет.

Сумма критических аминокислот (лизин, метионин, триптофан) наиболее дефицитных в белках растительного происхождения у голозерных сортов овса составляла 9,4...9,6 г/кг, что на 1,1...1,3 г/кг выше, чем у пленчатого сорта Конкур, в том числе содержание лизина у голозерных сортов достигало 5,5...5,6 г/кг (сорт Конкур

Табл. 2. Аминокислотный состав белков сортов плечатого голозерного овса (среднее за 2019–2021 гг.), г/кг

Показатель	Конкур	Бекас	Багет	НСР ₀₅
Валин	5,8	5,6	5,6	$F_{\text{факт.}} < F_{\text{табл.}}$
Гистидин	3,3	3,5	3,3	$F_{\text{факт.}} < F_{\text{табл.}}$
Изолейцин + лейцин	11,6	11,0	10,5	0,4
Лизин	4,9	5,6	5,5	0,5
Метионин	1,8	2,0	2,3	0,2
Треонин	3,7	3,7	3,9	$F_{\text{факт.}} < F_{\text{табл.}}$
Триптофан	1,6	1,8	1,8	0,2
Фенилаланин	6,4	7,8	7,0	0,6
Сумма критичных аминокислот	8,3	9,4	9,6	0,7
Сумма незаменимых аминокислот	39,1	41,0	39,9	0,5
Аргинин	14,2	16,5	16,9	1,1
Аланин	5,1	5,6	5,4	$F_{\text{факт.}} < F_{\text{табл.}}$
Аспарагин	10,0	10,8	11,7	0,6
Глицин	4,8	5,8	5,2	0,8
Глутамин	25,8	27,1	29,3	1,2
Пролин	6,7	5,4	6,1	0,4
Серин	5,9	7,6	6,9	0,6
Тирозин	4,0	4,4	4,8	0,3
Цистеин	4,0	5,2	4,7	0,5
Сумма заменимых аминокислот	80,5	88,4	91,0	2,3
Общая сумма аминокислот	119,6	129,4	130,9	3,1

4,9 г/кг). Как и сумма лимитирующих аминокислот величины этих показателей у сортов Бекас и Багет находились практически на одном уровне.

Условия произрастания влияли не только на формирование белка, но и на его аминокислотный состав. В 2019 г. в период налива и созревания зерна наблюдали суховеи, воздушную засуху, дефицит почвенной влаги, что приводило к снижению продуктивности голозерного овса, но способствовало увеличению накопления белка. В зерне сортов Бекас и Багет в этом году отмечали наибольшее содержание аминокислот 134,3...136,8 г/кг, в том числе количество лимитирующих аминокислот было на 10,8 % выше, чем в другие годы исследований.

Согласно результатам анализа соотношения незаменимых аминокислот в белке всех сортов самое большое их количество приходилось на сумму изолейцин и лейцин – 10,5...11,6 г/кг, наибольшее величину этого показателя отмечали у плечатого сорта Конкур. Различия по содержанию валина, гистидина и треонина в белке между сортами плечатого и голозерного овса были недостоверны. Количество фенилаланина в белках голозерного овса превышало величину этого показателя у сорт Конкур на 0,6...1,4 г/кг.

В целом в белках овса на долю заменимых аминокислот в зависимости от сорта приходилось 67,3...69,5 % от суммы всех аминокислот. Наибольшим их содержанием характеризовались сорта голозерного овса – 88,4...91,0 г/кг. Значительную часть заменимых аминокислот составлял глутамин – 25,8...29,3 г/кг, на тирозин приходилось 4,0...4,8 г/кг, цистеин – 4,0...5,2 г/кг. Существенных различий между сортами голозерного овса не выявлено.

Качество белка определяет его усвояемость, которая зависит от содержания и соотношения незаменимых и заменимых аминокислот. Одним из важнейших показателей качества пищевого белка считают аминокислотный скор. Первой лимитирующей незаменимой аминокислотой, относительно «эталонного белка» (аминокислотная шкала по данным ФАО/ВОЗ) у изучаемых сортов овса был лизин, второй – треонин, третьей – сумма изолейцин + лейцин (табл. 3).

Дефицит трех лимитирующих аминокислот, влияющих на полноту использования белков, у сорта Конкур составил 45,5 %, что на 1,2...1,4 % больше, чем у голозерных. По лизину наибольший аминокислотный скор относительно физиологически необходимой нормы от-

мечен у голозерного овса Багет и Бекас – 57,1 и 58,0 % соответственно. В 1 г белка сорта Конкур содержалось 249,7 мг незаменимых аминокислот, что соответствует 69,4 % от рекомендованной нормы ФАО/ВОЗ (360 мг незаменимых аминокислот в 1 г «эталонного белка»). В белках голозерного овса сорта Бекас величина этого показателя составляла 74,6 % от нормы, Багет – 73,0 %.

При определении биологической ценности белков большое значение имеет коэффициент различия аминокислотных скоров (КРАС, %), так как их отклонения в меньшую (<100 %) или большую сторону (> 100 %) нежелательно в связи с неспособностью организма использовать аминокислоты для белкового строительства. Из-за недостатка или избытка незаменимых аминокислот в белках происходит нарушение количественного соотношения незаменимых аминокислот, по отношению к «эталонному белку», то есть к физиологически необходимой норме [12, 13]. В нашем исследовании КРАС белка сорта Конкур характеризовался меньшей разбалансированностью и был на 9,7...11,3 % меньше, чем у голозерных сортов.

В сортах голозерного овса избыток содержания сумм метеонин и цистеина, фенилаланина и тирозина, а также триптофана (аминокислотный скор больше 100 %) привел к разбалансированности соотношения незаменимых аминокислот, относительно эталонных значений. В результате произошло увеличение коэффициента различия аминокислотных скоров, что способствовало снижению биологической ценности белков сортов Бекас и Багет, по отношению к белку плечатого сорта Конкур. Высокое содержание незаменимых аминокислот в белках

Табл. 3. Биологическая ценность белков плечатого и голозерного овса (среднее за 2019–2021 гг.)

Незаменимая аминокислота	Содержание аминокислот в 1 г, мг		Аминокислотный скор, %	КРАС, %	Биологическая ценность, %
	«эталонный белок»	исследуемый образец			
Сорт Конкур					
Изолейцин	40	66,1	60,1	24,2	75,8
Лейцин	70				
Лизин	55	27,9	50,7		
Метионин + Цистеин	35	33,1	94,6		
Фенилаланин + Тирозин	60	59,3	98,8		
Треонин	40	21,1	52,8		
Триптофан	10	9,1	91,0		
Валин	50	33,1	66,2		
Всего	360	249,7			
Сорт Бекас					
Изолейцин	40	62,7	57	33,9	66,1
Лейцин	70				
Лизин	55	31,9	58		
Метионин + Цистеин	35	41	117,1		
Фенилаланин + Тирозин	60	69,5	115,8		
Треонин	40	21,1	52,8		
Триптофан	10	10,3	103,0		
Валин	50	31,9	63,8		
Всего	360	268,4			
Сорт Багет					
Изолейцин	40	59,9	54,5	35,5	64,5
Лейцин	70				
Лизин	55	31,4	57,1		
Метионин + Цистеин	35	39,9	114		
Фенилаланин + Тирозин	60	67,3	112,2		
Треонин	40	22,2	55,5		
Триптофан	10	10,3	103		
Валин	50	31,9	63,8		
Всего	360	262,9			

голозерного овса необходимо использовать для повышения питательной ценности продуктов с заданными функциональными показателями и кормов с определенным аминокислотным составом, то есть вносить зерно голозерного овса в кормовые смеси в качестве балансирующего ингредиента.

Выводы. Наибольшее содержание незаменимых аминокислот в белке зерна изучаемых сортов отмечено у голозерного овса – 39,9...41,0 г/кг. Сумма критических аминокислот (лизин, метионин, триптофан) наиболее дефицитных в белках растительного происхождения у голозерных сортов овса составляет 9,4...9,6 г/кг, что на 1,1...1,3 г/кг выше, чем у пленчатого сорта. Количество лизина в белке зерна сортов Бекас и Багет достигает 5,5...5,6 %, при величине этого показателя у сорта Конкур 4,9 г/кг. Белок зерна сорта Конкур содержит 249,7 мг/г незаменимых аминокислот, или 69,4 % рекомендованной нормы ФАО/ВОЗ, у голозерного овса сорта Бекас величина этого показателя составляет 74,6 %, Багет – 73,0 %.

Избыток незаменимых аминокислот в белке зерна сортов голозерного овса привел к разбалансировке соотношения незаменимых аминокислот, по сравнению с эталонными значениями, что повышало коэффициент различия аминокислотных скоров (КРАС белка сорта Конкур составил 24,2 %, сорта Бекас – 33,9 %, сорта Багет – 35,5 %). Это способствовало снижению биологической ценности белков голозерных сортов, по сравнению с пленчатым сортом Конкур. Зерно голозерного овса с высоким содержанием незаменимых кислот (аминокислотный скор больше 100 %) целесообразно использовать в качестве балансирующего ингредиента при производстве продуктов и кормов с повышенной питательной ценностью.

Литература.

1. Лоскутов И. Г., Полонский В. И. Селекция на содержание β -глюкана в зерне овса как перспективное направление для получения продуктов здорового питания, сырья и фуража // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. № 4. С. 646–657.
2. Полонский В. И., Лоскутов И. Г., Сумина А. В. Оценка генотипов овса на содержание β -глюканов в зерне на основании его физических характеристик // *Сельскохозяйственная биология*. 2020. Т. 55. № 1. С. 42–52.
3. Селекция голозерного овса, ценного по качеству зерна / Г. А. Баталова, С. Н. Шевченко, М. В. Тулякова и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2016. № 5. С. 6–9.
4. Исачкова О. А., Логинова А. О., Коркина В. И. Содержание аминокислот в зерне голозерного овса при различных условиях возделывания // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2022. № 5 (52). С. 15–23.
5. Stewart D., McDougall G. Oat agriculture, cultivation and breeding targets: implications for human nutrition and health // *British Journal of Nutrition*. 2014. Vol. 112. P. 50–57.
6. Янова М. А., Иванова Т. С. Экструзионная обработка зерна ячменя и овса для получения муки и мучных кондитерских, хлебобулочных изделий. Красноярск: ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет», 2014. С. 64–77.
7. Использование зерна овса голозерного в хлебопечении / Е. Н. Шаболкина, Н. В. Анисимкина, С. Н. Шевченко и др. // *Достижения науки и техники*. 2019. № 11(33). С. 74–77.
8. Жирно-кислотный состав голозерного овса отечественной селекции / В. Н. Красильников, Г. А. Баталова, В. С. Попов и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2018. № 4. С. 13–15.
9. Изучение сортов овса (*Avena sativa* L.) различного географического происхождения по качеству зерна и продуктивности / В. И. Полонский, Н. А. Сурин, С. А. Герасимов и др. // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019. № 23(6). С. 683–690.
10. 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.
11. Singh R., De S., Belkheir A. *Avena sativa* (Oat), a potential nutraceutical and therapeutic agent: an overview // *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2013. Vol. 53. No. 2. P. 126–144.
12. Лысыков Ю. А. Аминокислоты в питании человека // *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*. 2012. № 2. С. 88–105.
13. Мартинчик А. Н. Физиология питания. М: Издательский центр «Академия», 2013. 240 с.

Поступила в редакцию 18.09.2023
После доработки 05.10.2023
Принята к публикации 31.10.2023

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВОЗБУДИТЕЛЯ СЕТЧАТОЙ ПЯТНИСТОСТИ ЛИСТЬЕВ ЯЧМЕНЯ (*Pyrenophora teres* Drechsler) К ФУНГИЦИДАМ*

Г. В. Волкова, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН,
Я. В. Яхник, аспирант

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

Исследование проводили с целью изучения влияния фунгицидов различных классов на внутривидовую структуру *Pyrenophora teres* по чувствительности к токсикантам, вирулентности и расовому составу. Схема опыта предусматривала изучение восьми вариантов обработки препаратами Магнелло, КЭ (1 л/га), Капелла, МЭ (1 л/га), Колосаль Про, КМЭ (0,4 л/га), Квадрис, СК (1,2 л/га), Амистар Трио, КЭ (1 л/га), Оргамика С, Ж (0,4 л/га) растений ячменя озимого и их внесения на питательную среду с чистой культурой *P. teres* в дозах 25 %, 50 %, 75 %, 100 %, 125 %, 150 %, 175 %, 200 % от нормы (контроль – без обработки). Расовый состав популяций определяли с использованием международного набора сортов-дифференциаторов. При обработке фунгицидами растений разрешенной для применения в сельском хозяйстве нормой минимальная эффективность выявлена у препаратов Квадрис, СК (52,3 %), Оргамика С, Ж (66,8 %), максимальные – Магнелло, КЭ (88,2 %) и Колосаль Про, КМЭ (97,0 %). Средняя вирулентность популяции, выделенной после применения Квадрис, СК, была самой высокой – 3,4 балла. Наибольшее расовое разнообразие выявлено в популяциях *P. teres*, выделенных после обработки Магнелло, КЭ (CF=0,10) и Квадрис, СК (CF=0,10). Самая высокая внутривидовая гетерогенность отмечена в вариантах с препаратами на основе триазолов и *Bacillus amyloliquefaciens* – Колосаль Про, КМЭ (Sh=2,16), Капелла, МЭ, (Sh=2,14), Магнелло, КЭ (Sh=2,10) и Оргамика С, Ж (Sh=2,12). При внесении разрешенной нормы препаратов в чистую культуру *P. teres* в среднем рост колоний замедлился от 86,1 % (Квадрис, СК) до 100 % (Амистар Трио, КЭ). Препараты на основе стробилуринов и *Bacillus amyloliquefaciens* полностью предотвращали спорообразование. Полученные результаты позволяют сделать вывод о сдвиге чувствительности к исследуемым препаратам.

SENSITIVITY OF THE CAUSATIVE AGENT OF NET BLOTCH OF BARLEY (*Pyrenophora teres* Drechsler) TO FUNGICIDES

G. V. Volkova, Ya. V. Yakhnik

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

The research was carried to study the effect of fungicides of various classes on the intrapopulation structure of *Pyrenophora teres* in terms of sensitivity to toxicants, virulence and racial composition. The work was performed using eight treatment options in different doses (control without fungicide, 25 %, 50 %, 75 %, 100 % (the norm), 125 %, 150 %, 175 %, 200 %) fungicides Magnello, EC (1 l/ha), Capella, M (1 l/ha), Kolosal Pro, MC (0.4 l/ha), Quadris, SC (1.2 l/ha), Amistar Trio, EC (1 l/ha), Orgamika C, L (0.4 l/ha) of plants and introduction to a nutrient medium with a pure culture of *P. teres*. The racial composition of the populations was determined using an international set of differentiator varieties. When treating plants with fungicides with the norm allowed for use in agriculture, the minimum efficiency values were found in the preparations Quadris, SC (52.3 %), Orgamika C, L (66.8 %), the maximum – Magnello, EC (88.2 %) and Kolosal Pro, MC (97.0 %). The average virulence of the population isolated after Quadris, SC treatment was revealed to be maximum – 3.4 points (at the control level). The greatest racial diversity was found in *P. teres* populations isolated after treatment with fungicides based on triazoles Magnello, EC (CF=0.10) and strobilurines Quadris, SC (CF=0.10). The maximum intrapopulation heterogeneity was revealed in populations isolated after treatment with fungicides based on triazoles and *Bacillus amyloliquefaciens*: Kolosal Pro, MC (Sh=2.16), Capella, M (Sh=2.14), Magnello, EC (Sh=2.10) and Orgamika C, L (Sh=2.12). When introducing the permitted rate of drugs into the pure culture of *P. teres*, on average, the growth of colonies slowed down from 86.1 % (Quadris, SC) to 100 % (Amistar Trio, EC). Preparations based on strobilurines and *Bacillus amyloliquefaciens* completely prevented sporulation. The results obtained allow us to conclude that there is a shift in sensitivity to the studied drugs.

Ключевые слова: ячмень озимый, сетчатая пятнистость листьев, *Pyrenophora teres*, фунгициды, резистентность.

Key words: winter barley, net blotch of barley, *Pyrenophora teres*, fungicides, resistance.

Сетчатая пятнистость ячменя (возбудитель – аскомицет *Pyrenophora teres* (Died.) Drechsler) – одно из наиболее вредоносных листовых заболеваний, снижающее как качество, так и количество зерна [1]. Патоген распространен в большинстве регионов выращивания культуры, но наиболее серьезной проблемой становится в областях с умеренным климатом и высокой влажно-

стью. Несмотря на общемировую тенденцию экологизации сельскохозяйственного производства, самым распространенным и эффективным методом борьбы с заболеванием остается обработка фунгицидами [2]. Повсеместное, многократно повторяющееся в течение одного сезона использование пестицидов сопровождается рядом деструктивных последствий, к числу которых относят

*исследования выполнены согласно Государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР по теме № FGRN-2022-0004 (стробилурины, бактериальные фунгициды+биологические пестициды) и гранта Наставник-21.1/48 Кубанского научного фонда (триазолы).

снижение чувствительности фитопатогена и появление резистентных штаммов [3]. Устойчивость к фунгицидам в популяции патогена развивается быстрее при высокой исходной частоте резистентных к действующему веществу препарата штаммов. Применение фунгицидов на основе стробилуринов и триазолов стабилизировало фитосанитарное состояние посевов ячменя в 1980–1990-х гг. благодаря внедрению в технологии защиты препаратов, содержащих принципиально новые действующие вещества с высокой специфичностью, широким спектром контролируемых фитопатогенов и пролонгированным периодом защиты. На сегодняшний день накопление в агроценозах наиболее устойчивых фитопатогенных микроорганизмов приводит к снижению эффективности обработок [3]. Увеличение норм расхода и кратности их проведения, а также применение новых фунгицидов приводит к накоплению устойчивых штаммов, стимулируя их распространение [4].

Фунгициды триазолового класса благодаря высокой эффективности, возможности сочетания с другими препаратами, широкому спектру действия относятся к наиболее распространённым и продаваемым препаратам. Триазолы применяют как для предпосевной обработки семян, так и для опрыскивания вегетирующих растений [2]. Механизм их действия заключается в ингибировании биосинтеза стерина, что приводит к нарушению функционирования клеточных мембран, клеточного деления, задержке роста и полового размножения гриба [5].

Стробилуриновые фунгициды относят к классу препаратов с высокой биологической активностью и специфическим механизмом действия, вследствие чего за последние два десятилетия их широко применяют в сельскохозяйственном производстве [6]. Стробилурины блокируют убухинооксидазу (цитохром *bc1*, СУТВ, ген *cut b*) и ингибируют митохондриальное дыхание грибов [4].

В последние годы в отрасли востребованы бактериальные фунгициды, которые стимулируют рост растения и обеспечивают защиту от болезней [7]. Прямые механизмы положительного действия бактерий *Bacillus amyloliquefaciens* заключаются в фиксации азота, солиubilизации фосфатов, выработке сидерофоров и фитогормонов (индол-3-уксусная кислота, 1-амиклоциклопропан-1-карбоксилат деаминаза). Косвенный механизм связан с выделением антимикробных соединений (цианистый водород, циклические липопептиды и др.), что повышает устойчивость растений к конкурирующим микроорганизмам, включая патогенные бактерии, грибы и вирусы.

Краснодарский край считают зоной интенсивного ведения сельского хозяйства, поэтому возникает необходимость в комплексном исследовании чувствительности популяции фитопатогенного гриба *P. teres* к фунгицидам различных химических классов и биологическим препаратам.

Цель исследования – оценить влияние фунгицидов различных классов на внутривидовую структуру *Pyrenophora teres* по чувствительности к токсикантам, вирулентности и расовому составу для разработки научно обоснованной антирезистентной стратегии защиты посевов ячменя при использовании современного ассортимента фунгицидов.

Методика. Работу проводили в 2022–2023 гг. на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр биологической защиты растений» (ФГБНУ ФНЦБЗР) с использованием уникальной научной установки «Фитотрон для выделения, идентификации, изучения и поддержания рас, штаммов, фенотипов патогенов» (<https://ckp-rf.ru/>

[catalog/usu/671925/](https://ckp-rf.ru/)) и объектов биоресурсной коллекции ФГБНУ ФНЦБЗР «Государственная коллекция энтомоакарифагов и микроорганизмов». Образцы растений с признаками поражения отбирали на естественном инфекционном фоне производственных посевов озимого ячменя в Краснодарском крае.

В опыте изучали четыре препарата, содержащих действующие вещества одного химического класса (стробилурины – Квадрис, СК (250 г/л азоксистробина); триазолы – Колосаль Про, КМЭ (300 г/л пропиконазола + 200 г/л тебуконазола), Капелла, МЭ (30 г/л дифеноконазола + 120 г/л пропиконазола + 60 г/л флутриафола), Магнелло, КЭ (100 г/л дифеноконазола + 250 г/л тебуконазола)), комбинированный препарат с действующими веществами обоих исследуемых химических классов фунгицидов (Амистар Трио, КЭ (100 г/л азоксистробина + 125 г/л пропиконазола + 30 г/л ципроконазола)), а также используемый в производстве перспективный пестицид на основе *Bacillus amyloliquefaciens* (Оргамика С, Ж (*Bacillus amyloliquefaciens*, титр 5×10^9 КОЕ/мл)). Чувствительность к препаратам исследовали на интактных растениях и в чистой культуре *P. teres*. Схема эксперимента предусматривала изучение восьми вариантов норм применения в процентном соотношении к разрешённой в сельском хозяйстве: 0 % (контроль – без фунгицида), 25 %, 50 %, 75 %, 100 % (разрешённая норма), 125 %, 150 %, 175 %, 200 %.

Исследования проводили в условиях климатокamеры Binder KBWF 720 (температура +22,0 °С, влажность 80 %, освещённость 13000 люкс) на растениях, посеянных в вазоны (объём 0,5 л) по 12...15 шт. в каждом (повторность – трехкратная). Инокуляцию восприимчивого сорта озимого ячменя Ромас возбудителем сетчатой пятнистости проводили методом опрыскивания (концентрация 40×10^3 конидий на 1 мл) в стадии двух развернутых листьев, затем растения на сутки помещали в полиэтиленовые изоляторы [8]. Обработку фунгицидами осуществляли через 3 суток после инокуляции, учёт – через 7 дней после применения препаратов [1].

Чувствительность патогена к фунгицидам определяли по трём параметрам: развитие болезни после обработки растений препаратами с различной нормой применения, скорость роста колоний изолятов *P. teres* и интенсивность споруляции на питательной среде.

Для исследования в чистой культуре *P. teres* в чашки Петри вносили растворы с установленной для каждого препарата нормой согласно методике Чекмарева [9] (повторность – трехкратная). Скорость роста патогена определяли после инкубации через 7 дней путем измерения диаметра колоний, интенсивность споруляции рассчитывали через 10 дней [9]. Расовый состав популяции определяли с использованием международного набора дифференцирующих сортов [8]. Для эксперимента были взяты по 20 изолятов *P. teres*, отобранных с растений ячменя через трое суток после обработки разрешённой для применения в сельском хозяйстве нормой фунгицидов.

Биологическую эффективность (БЭ) рассчитывали по формуле Аббота, полуэффективную концентрацию (EC_{50}) – с использованием сервиса «Quest Graph™ EC50 Calculator». Наличие статистических различий между выборками оценивали с помощью критерия Фишера ($\alpha=0,05$), связь между признаками – по шкале Чеддока. Величину средней вирулентности определяли, как средний балл развития болезни каждого дифференцирующего сорта на изоляте гриба. Изоляты с идентичными фенотипами, образовавшиеся в результате клонального размножения одного изолята, составили клональную фракцию популяции (CF). Уровень генетического разно-

Табл. 1. Развитие сетчатой пятнистости листьев на растениях ячменя после обработки фунгицидами различных классов, сорт Романс (тепличный комплекс ФГБНУ ФНЦБЗР, 2023 г.)

Фунгицид	ЕС ₅₀ [*] мг/мл	Развитие болезни, балл								
		0 %*	25 %	50 %	75 %	100 %	125 %	150 %	175 %	200 %
Магнелло, КЭ	4,7	4,2±0,2	2,7±0,8	2,7±0,5	2,3±0,4	0,5±0,4	0,6±0,1	0,3±0,1	0,3±0,1	0
Биологическая эффективность	-	-	36,8	36,8	44,7	88,2	86,8	92,1	94,1	100,0
Капелла, МЭ	3,4	4,2±0,2	3,8±0,4	2,8±0,4	3±0,2	0,9±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	0,3±0,1	0,1±0,1
Биологическая эффективность	-	-	11,2	34,9	28,9	78,9	82,2	86,8	94,1	97,4
Колосаль Про, КМЭ	1,4	4,2±0,2	3,3±0,4	0,9±0,1	0,3±0,1	0,1±0,1	0,4±0,1	0,4±0,1	0,3±0,1	0
Биологическая эффективность	-	-	21,1	78,9	92,1	97,0	89,5	97,6	97,6	100,0
Квадрис, СК	21,2	4,2±0,2	3,0±0,4	2,4±0,2	2,2±0,2	2,0±0,4	1,2±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	0,2±0,1
Биологическая эффективность	-	-	28,9	43,2	47,9	52,3	71,6	81,1	85,8	95,3
Амистар Трио, КЭ	13,0	4,2±0,2	2,0±0,1	1,6±0,1	1,6±0,1	1,0±0,1	1,2±0,1	0,6±0,1	0,6±0,1	0,4±0,1
Биологическая эффективность	-	-	52,6	62,1	62,1	76,3	71,6	85,8	85,8	90,5
Органика С, Ж	3,6	4,2±0,2	3,2±0,2	3,0±0,1	2,2±0,1	1,4±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	0,6±0,1	0,4±0,1
Биологическая эффективность	-	-	24,2	28,9	47,9	66,8	81,1	85,8	85,8	90,5

*норма применения от разрешенной в сельском хозяйстве, %.

образия *P. teres* описывали с помощью индекса Шеннона [10]. Расчет проводили с использованием программного обеспечения Statistica версии 13.3 (<http://statsoft.ru/products/trial/>).

Результаты и обсуждение. В вегетационном опыте при обработке растений ячменя фунгицидами различных классов было установлено, что внесение препаратов в норме 25 % от разрешенной для применения в сельском хозяйстве ингибирует развитие патогена. Их биологическая эффективность при такой концентрации варьировала от 11,2 % (Капелла, МЭ) до 52,6 % (Амистар Трио, КЭ) (табл. 1).

Наибольшую эффективность при обработке разрешенной для применения в сельском хозяйстве нормой отмечали при использовании препаратов на основе триазолов – Колосаль Про, КМЭ (97,0 %) и Магнелло, КЭ (88,2 %). Наименьшая эффективность (52,3 %) выявлена в варианте с Квадрис, СК (стробилурины). Эффективность препарата на бактериальной основе Органика С, Ж составила 66,8 %. Полное подавление развития патогена на растениях установлено при обработке в двойных от разрешенных в сельском хозяйстве нормах применения препаратами Колосаль Про, КМЭ и Магнелло, КЭ. Отмечена достаточно высокая эффективность средства на биологической основе Органика С, Ж. Увеличение его нормы от разрешенной в сельском хозяйстве на 25 % способствовало росту эффективности применения до 81,1 %, что сопоставимо с величиной этого показателя у химических фунгицидов.

Современная защита растений предполагает не полное истребление патогенных организмов, а ограничение их негативного воздействия и сбалансированные взаимоотношения между организмами для обеспечения стратегии устойчивого развития агроэкосистемы и запуска таких частных саморегулятивных процессов, как иммунный ответ растения на заражение и активация существующих генов устойчивости [11]. Определение полужизненной концентрации применения препаратов (ЕС₅₀) выявило широкий диапазон ингибирования жизнедеятельности патогена. Достаточно высокую эффективность замедления его роста наблюдали после обработки препаратом на основе триазолов Капелла, МЭ (ЕС₅₀ 3,4 мг/мл) и на бактериальной основе Органика С, Ж (ЕС₅₀ 3,6 мг/мл). При использовании химических

фунгицидов на основе стробилуринов отмечена наименьшая в опыте полужизненная концентрация таких фунгицидов, как Амистар Трио, КЭ – ЕС₅₀ 13,0 мг/мл и Квадрис, СК – ЕС₅₀ 21,2 мг/мл. Применение против сетчатой пятнистости листьев фунгицидов на основе триазолов свидетельствует о достаточно высоком уровне защиты листьев от патогена внутри листовой пластины, а также обеспечении «лечащего эффекта» [5].

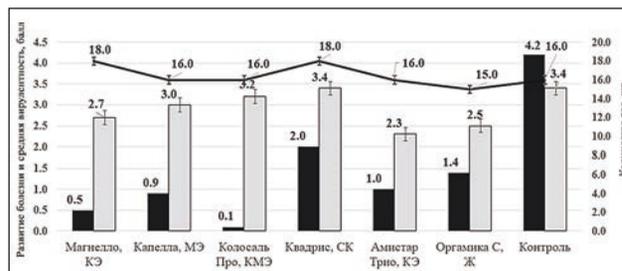


Рис. 1. Развитие болезни, средняя вирулентность и количество рас в популяциях *Pyrenophora teres*, собранных после обработки растений ячменя фунгицидами, сорт Романс (тепличный комплекс ФГБНУ ФНЦБЗР, 2023 г.): ■ – развитие болезней, балл; □ – средняя вирулентность, балл; — — — – развитие болезней, балл.

Для популяции гриба *P. teres*, выделенной после обработки изучаемыми препаратами интактных растений ячменя сорта Романс, наиболее эффективным химическим фунгицидом был Колосаль Про, КМЭ, средняя вирулентность которого составила 3,2 балла. Также высокие показатели средней вирулентности отмечены у популяции гриба, выделенной после обработки препарата с достаточно высокой эффективностью, Капелла, МЭ (3,0 балла) и препарата с наименьшей среди опытных вариантов эффективностью Квадрис, СК (3,4). Корреляции между развитием болезни после обработки фунгицидами различных химических классов и средней вирулентностью выделенных популяций не установлено ($r=0,086$). Наибольшее количество рас (18 шт.) отмечено в популяциях *P. teres* после обработки двухкомпонентным препаратом на основе триазола Магнелло, КЭ и однокомпонентным препаратом на основе стробилурина Квадрис, СК (рис. 1).

Табл. 2. Гетерогенность популяций гриба, выделенных с растений после обработки различными фунгицидами (ФГБНУ ФНЦБЗР, 2023 г.)

Критерий	Магнелло, КЭ	Капелла, МЭ	Колосаль Про, КМЭ	Квадрис, СК	Амистар Трио, КЭ	Органика С, Ж	Контроль (без обработки)
Клональная фракция (CF)	0,10	0,20	0,20	0,10	0,20	0,25	0,20
Индекс Шеннона (Sh)	2,10	2,14	2,16	2,09	2,07	2,12	2,00

Табл. 3. Ингибирование роста колоний *Puynophora teres* при внесении фунгицидов на питательную среду (ФГБНУ ФНЦБЗР, 2023 г.), мм

Фунгицид	ЕС _{50*} мг/мл	Развитие болезни, балл								
		0 %*	25 %	50 %	75 %	100 %	125 %	150 %	175 %	200 %
Магнелло, КЭ,	0,004	50,3±3,6	2,6±0,8	2,6±0,5	2,3±0,4	0,5±0,3	0,6±0,1	0,1±0,1	0	0
Биологическая эффективность			94,8	94,8	95,4	99,0	98,8	99,8	100,0	100,0
Капелла, МЭ	0,007	50,3±3,6	3,8±0,4	2,8±0,4	1,7±0,2	0,9±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	0,1±0,1	0
Биологическая эффективность			92,4	94,4	96,6	98,2	98,4	99,8	100,0	100,0
Колосаль Про, КМЭ	0,25	50,3±3,6	3,3±0,4	0,9±0,1	0,3±0,1	0,3±0,1	0,1±0,1	0,1±0,1	0	0
Биологическая эффективность			93,4	98,2	99,4	99,4	99,8	100,0	100,0	100,0
Квадрис, СК	0,43	50,3±3,6	16,0±0,8	8,0±0,4	6,6±0,7	7,0±0,4	5,0±0,4	4,0±0,4	2,6±0,1	0,5±0,1
Биологическая эффективность			68,2	84,1	86,7	86,1	90,1	92,0	94,7	98,9
Амистар Трио, КЭ	0,87	50,3±3,6	6,7±0,3	0,1±0,1	0,0	0,0	0,8±0,1	0,4±0,1	0	0
Биологическая эффективность			86,5	99,8	100,0	100,0	98,2	99,2	100,0	100,0
Оргамика С, Ж	0,06	50,3±3,6	5,6±0,3	1,6±0,1	2,3±0,1	2,6±0,1	1,6±0,1	0,0	0,4±0,1	0
Биологическая эффективность			88,7	96,7	95,4	94,7	97,2	100,0	99,2	100,0

*норма применения от разрешенной в сельском хозяйстве, %.

Самое высокое разнообразие расового состава выявлено у популяций, отобранных после обработки препаратами Магнелло, КЭ и Квадрис, СК (CF=0,10). Клональная фракция популяций гриба, выделенных с растений после применения фунгицидов Капелла, МЭ, Колосаль Про, КМЭ и Амистар Трио, КЭ, находилась на уровне контроля (CF=0,20). Минимальное расовое разнообразие (CF=0,25) отмечено в популяции *P. teres* после обработки препаратом на бактериальной основе Оргамика С, Ж (табл. 2).

Согласно статистическому индексу Шеннона, характеризующему популяционное разнообразие, наибольшая гетерогенность была свойственна популяциям *P. teres*, отобранным после обработки препаратами на основе триазолов и *Bacillus amyloliquefaciens*: Колосаль Про, КМЭ – 2,16, Капелла, МЭ – 2,14, Оргамика С, Ж – 2,12, Магнелло, КЭ – 2,10. Индекс разнообразия в популяциях гриба в вариантах с препаратами, содержащими действующие вещества из класса стробилуринов, был ниже: Кварис, СК (стробилурины) – 2,09, Амистар Трио, КЭ (стробилурины+триазолы) – 2,07. Такие результаты согласуются с данными других исследователей об ингибировании соединениями этого химического класса полового и конидиального размножения микромицетов, что препятствует расширению спектра расового разнообразия [6, 12]. Минимальное в опыте генетическое разнообразие выявлено в контроле – 2,0. Полученные результаты свидетельствуют о высокой гетерогенности популяций гриба *P. teres*, выделенных после обработки фунгицидами различных химических классов.

В лабораторном опыте, проведенном с чистой культурой *P. teres*, внесение фунгицидов на питательную среду даже в заниженной норме привело к ингибированию роста колоний (табл. 3). Эффективность препаратов составляла от 86,5 % (Амистар Трио, КЭ) до 94,8 % (Магнелло, КЭ). Исключение выявлено при использовании однокомпонентного препарата на основе стробилурина Квадрис, СК, эффективность которого была ниже,

чем у других испытываемых фунгицидов, и составляла 68,2 %. В вариантах с внесением препаратов в норме 50 % от разрешенной для применения в сельском хозяйстве рост колоний происходил на мицелиальном диске, занимая незначительное пространство на среде с фунгицидом. При этом образовывался стерильный белый мицелий, характерный для выращивания на обедненной среде с недоступными питательными веществами (рис. 2 а), что согласуется с результатами других исследователей [13].



Рис. 2. Ингибирование образования морфологических структур *Puynophora teres*: а) образование стерильного слабо структурированного белого мицелия при внесении на питательную среду препарата Оргамика С, Ж; б) ингибирование нормальной споруляции и единичное формирование 2...4 септированных конидий гриба при внесении на питательную среду препарата Магнелло, КЭ; в) нормальное спорообразование в контрольном варианте (ФГБНУ ФНЦБЗР, 2023 г., ориг.).

Внесение на питательную среду фунгицидов в значительной степени ингибировало споруляцию (табл. 4). Средняя споруляция в контрольном варианте составляла $13,5 \pm 2,7 \times 10^3$ шт./мл. Минимальное в опыте ингибирование спорообразования *P. teres* выявлено под влиянием препарата Магнелло, КЭ – в среднем по вариантам опыта $1,3 \pm 0,1 \times 10^3$ шт./мл (см. рис. 2 б). В среднем в вариантах с препаратами Капелла, МЭ и Колосаль Про, КМЭ отмечен одинаковый уровень ингибирования споруляции гриба – $0,4 \pm 0,01 \times 10^3$ шт./мл. Препараты группы триазолов негативно влияют на органогенез конидиеносцев, конидий и других морфологических структур, что приводит к замедлению, либо полному отсутствию вторичного заражения.

Табл. 4. Ингибирование споруляции *Puynophora teres* при внесении фунгицидов на питательную среду (ФГБНУ ФНЦБЗР, 2023 г.), $\times 10^3$ шт./мл

Фунгицид	0 %*	25 %	50 %	Развитие болезни, балл					
				75 %	100 %	125 %	150 %	175 %	200 %
Магнелло, КЭ	13,5±1,0	0,9±0,4	3,6±0,7	0	1,0±0,0	2,7±0,4	0,7±0,4	1,6±0,4	0
Биологическая эффективность	-	93,3	73,3	100,0	92,6	80,0	94,8	88,1	100,0
Капелла, МЭ	13,5±1,0	0,8±0,4	1,8±0,6	0,3±0,4	0	0	0	0	0
Биологическая эффективность	-	94,1	86,7	97,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Колосаль Про, КМЭ	13,5±1,0	0,0	1,2±0,4	1,7±0,4	0	0	0	0	0
Биологическая эффективность	-	100,0	91,1	87,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Квадрис, СК	13,5±1,0	0	0	0	0	0	0	0	0
Биологическая эффективность	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Амистар Трио, КЭ	13,5±1,0	0	0	0	0	0	0	0	0
Биологическая эффективность	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Оргамика С, Ж	13,5±1,0	0,3±0,4	0,1±0,4	0,1±0,4	0	0	0	0	0
Биологическая эффективность	-	97,8	99,3	99,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Препараты на основе стробилуринов полностью ингибировали спорообразование. Конидии отсутствовали в чашках Петри даже с минимальным содержанием фунгицидов Амистар Трио, КЭ и Квадрис, СК, что согласуется со сведениями других авторов [6].

Выводы. Эффективность фунгицидов при обработке интактных растений ячменя, пораженных *P. teres*, и *in vitro* в разрешенной для применения в сельском хозяйстве нормой значительно варьировала в зависимости от действующего вещества в составе токсиканта. Препараты на основе триазолов сильнее ингибировали развитие патогена на растениях и рост колоний на питательной среде. Наименьшая эффективность обработки растений разрешенной для применения в сельском хозяйстве нормой отмечена для однокомпонентного препарата на основе стробилурина (Квадрис, СК–52,6%), самая высокая – при использовании двухкомпонентного препарата на основе триазолов (Колосаль Про, КМЭ – 97,0%).

Наибольшее расовое разнообразие выявлено в популяциях *P. teres*, выделенных после обработки фунгицидами на основе триазолов Магнелло, КЭ (CF=0,10) и стробилуринов Квадрис, СК (CF=0,10), внутрипопуляционная гетерогенность – в популяциях, отобранных после использования препаратов на основе триазолов и *Bacillus amyloliquefaciens* (Sh от 2,10 до 2,16).

В среднем во всех вариантах при внесении разрешенной для применения в сельском хозяйстве нормы препаратов рост колоний патогена замедлялся от 86,1% (Квадрис, СК (стробилурины)) до 100% (Амистар Трио, КЭ (стробилурины+триазолы)). Препараты на основе стробилуринов и *B. amyloliquefaciens* полностью предотвращали спорообразование.

Литература.

1. Worku A. Barley Net Blotch Disease Management: A Review // *Agriculture Journal IJOEAR*. 2021. No. 7. P. 69–81.
2. Физиологические эффекты действия на растения фунгицидов триазольной природы / Т. П. Побежимова, А. В. Корсукова, Н. В. Дорофеев и др. // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2019. Т. 9. № 3 (30). С. 461–476. doi: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-461-476.
3. Deising H. B., Reimann S., Pascholati S. F. Mechanisms and significance of fungicide resistance // *Brazilian Journal of Microbiology*. 2008. No. 39. P. 286–295. doi: 10.1590/S1517-838220080002000017.
4. Lucas J. A., Hawkins N. J., Fraaije B. A. The evolution of fungicide resistance // *Advances in Applied Microbiology*. 2015. No. 90. P. 29–92. doi: 10.1016/bs.aambs.2014.09.001.
5. Андреева Е. И., Зинченко В. А. Системные фунгициды – ингибиторы биосинтеза эргостерина // *АгроXXI*. 2002. № 4. С. 14–15.
6. Kinetics and new mechanism of azoxystrobin biodegradation by an *Ochrobactrum anthropi* strain SH14 / Y. Feng, W. Zhang, S. Pang, et al. // *Microorganisms*. 2020. Vol. 8. No. 5. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7284741/> (дата обращения: 10.08.23).
7. A Review on the Biotechnological Applications of the Operational Group *Bacillus amyloliquefaciens* / M. S. Ngalimat, R. S. R. Yahaya, M. M. Baharudin, et al. // *Microorganisms*. 2021. Vol. 9. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2607/9/3/614> (дата обращения: 10.08.23). doi: 10.3390/microorganisms9030614.
8. Development of an international standard set of barley differential genotypes for *Pyrenophora teres* f. *teres* / O. S. Afanasenko, M. Jalli, H. O. Pinnschmidt, et al. // *Plant Pathology*. 2009. Vol. 58. No. 4. P. 665–676.
9. Методика определения биологической эффективности фунгицидов в отношении грибов рода *Fusarium* и их резистентности к химическим препаратам / В. В. Чекарчев, Ю. В. Зеленева, Г. Н. Бучнева и др. // Тамбов: Принт-Сервис, 2015. 61 с.
10. Shannon C. E. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University Illinois Press. 1949. 117 p.
11. Infectious plant diseases: Etiology, current status, problems and prospects in plant protection / P. A. Nazarov, B. D. Naleev, M. I. Ivanova, et al. // *Acta naturae*. 2020. Vol. 12. No. 3. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7604890/> (дата обращения: 10.08.23). doi: 10.32607/actanaturae.11026.
12. Щербачева Л. А. Развитие резистентности к фунгицидам у фитопатогенных грибов и их хемосенсибилизация как способ повышения защитной эффективности триазолов и стробилуринов // *Сельскохозяйственная биология*. 2019. № 54. С. 875–891. doi: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-461-476.
13. *Pyrenophora teres*: taxonomy, morphology, interaction with barley, and mode of control / A. Backes, G. Guerriero, A. Barka, et al. // *Frontiers in plant science*. 2021. Vol. 12. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2021.614951/full> (дата обращения: 10.08.23). doi: 10.3389/fpls.2021.614951.

Поступила в редакцию 06.09.2023

После доработки 30.09.2023

Принята к публикации 24.10.2023

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА И ПРОДУКТИВНОСТИ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАБОТКИ ВЕГЕТИРУЮЩИХ РАСТЕНИЙ ФУНГИЦИДАМИ

Л. Н. Путилина, кандидат сельскохозяйственных наук, Н. А. Лазутина

Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свёклы
и сахара имени А. Л. Мазлумова,
396030, Воронежская область, Рамонский район, п. ВНИИСС, 86
E-mail: lputilina@bk.ru

Исследования проводили с целью определения эффективной нормы расхода и последовательности обработки вегетирующих растений сахарной свёклы фунгицидами Абакус Ультра, СЭ и Пиктор Актив, КС, выявления изменений морфологических и технологических показателей, а также продуктивности культуры в результате действия этой комбинации препаратов. Работу выполняли в 2020–2021 гг. в Воронежской области в зернопаропашном севообороте. Объектом исследований служил гибрид сахарной свёклы отечественной селекции РМС 127. Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов: без фунгицидов (контроль) и четыре схемы защиты растений от листовых болезней препаратами фирмы ООО «БАСФ»: I) первая обработка препаратом Абакус Ультра с нормой расхода 1,25 л/га, через 20 дней – вторая Пиктор Активом с нормой расхода 0,6 л/га; II) Абакус Ультра (1,25 л/га) – в первую обработку и Пиктор Актив (0,8 л/га) – во вторую; III) Пиктор Актив (0,6 л/га) – в первую обработку и Абакус Ультра (1,25 л/га) – во вторую; IV) Пиктор Актив (0,8 л/га) – в первую обработку и Абакус Ультра (1,25 л/га) – во вторую. Установлена лучшая эффективность схемы защиты сахарной свёклы II. Ее применение оказывает положительное воздействие на физиологические процессы в растении, эффективно подавляет рост грибов-возбудителей мучнистой росы, что способствует повышению коэффициента продуктивности фотосинтеза на 41,2 %, формированию прибавки урожая на уровне 8,3 т/га, снижению количества корнеплодов с патологиями в 3,2 раза, увеличению прогнозируемого выхода сахара при переработке на 0,84 %, улучшению его извлекаемости и повышению сбора очищенного сахара с единицы площади на 24,1 %.

CHANGE OF SUGAR BEET TECHNOLOGICAL QUALITY AND PRODUCTIVITY AS A RESULT OF VEGETATING PLANTS TREATMENT WITH FUNGICIDES

L. N. Putilina, N. A. Lazutina

Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar
396030, Voronezhskaya obl., Ramonskii r-n, pos. VNISS, 86
E-mail: lputilina@bk.ru

Studies were carried out for the purpose of determining of an effective consumption rate and application sequence of Abacus Ultra (suspension emulsion), and Pictor Active (concentrate of suspension) fungicides for sugar beet vegetating plants as well as revealing of changes in morphological and technological indexes and the crop productivity as a result of these chemicals' combination influence. The work was conducted in a grain-arable crop rotation of Voronezh region in 2020–2021. RMS 127, a domestic sugar beet hybrid, was an object of the investigations. The experiment scheme supposed studying of the following variants including control and four schemes of plant protection from leaf diseases with the help of BASF Limited Liability Company fungicides: I) first treatment with the chemical of Abacus Ultra using the consumption rate of 1.25 l/ha and, in 20 days, second treatment with Pictor Active using the consumption rate of 0.6 l/ha; II) first treatment with Abacus Ultra (1.25 l/ha) and second treatment with Pictor Active (0.8 l/ha); III) first treatment with Pictor Active (0.6 l/ha) and second treatment with Abacus Ultra (1.25 l/ha); and IV) first treatment with Pictor Active (0.8 l/ha) and second treatment with Abacus Ultra (1.25 l/ha). Effectiveness of the sugar beet protection scheme II was ascertained. This agrotechnical method has a positive effect on physiological processes in a plant, and effectively depresses growth of fungi – powdery mildew disease agents that promotes increase of photosynthesis productivity coefficient by 41.2 %, obtaining of 8.3 t/ha yield addition, and 3.2-time reduction of beet roots with pathologies in number. Also, it increases predicted sugar output by 0.84 %, improving its extraction ability during processing at the same time, and refined sugar yield per a hectare of the crop by 24.1 %.

Ключевые слова: сахарная свёкла (*Beta vulgaris* L.), фунгициды, норма расхода, болезни листового аппарата, коэффициент продуктивности фотосинтеза, урожайность, технологическое качество, сбор очищенного сахара.

Key words: sugar beet (*Beta vulgaris* L.), fungicides, consumption rate, diseases of leaf apparatus, coefficient of photosynthesis productivity, yield, technological quality, refined sugar yield.

Свекловодство сконцентрировано в крупных агрохолдингах, где применяют короткоротационные севообороты, проводят основную обработку почвы без оборота пласта, не вносят органические удобрения, а минеральные удобрения зачастую заменяют азотными подкормками в период вегетации. Всё это приводит к снижению устойчивости растений к болезням. По экономическому значению в зависимости от региона выращивания самые вредоносные болезни в период вегетации сахарной свёклы вызывают такие возбудители как *Cercospora beticola* (болезнь – церко-

спороз), *Ramularia beticola* (рамуляриоз), *Phoma betae* (фомоз), *Erysiphe betae* (мучнистая роса), *Uromyces betae* (ржавчина) [1].

Характер распространения листовых болезней различен. Например, церкоспороз встречается ежегодно практически на всех полях, но с разной степенью развития, что в свою очередь влияет на его вредоносность [2]. Мучнистую росу и рамулярию отмечают очажно-спорадически на отдельных полях, однако при благоприятных климатических условиях они могут наносить значительный ущерб посевам [3].

Указанные листовые болезни могут приводить к нарушению физиологических процессов, протекающих в растениях. Активность транспирации пораженного листового аппарата увеличивается в 5 раз, ассимиляция углекислого газа снижается в 10 раз, нарушается азотистый обмен. Массовое отмирание листьев приводит к уменьшению прироста корнеплодов и выхода сахара на 20...50 %. Воздействие патогена ухудшает технологические показатели сырья, увеличивает содержание небелкового азота, снижает содержание доброкачественного сока [4].

Поэтому очень важным элементом технологии возделывания выступает защита культуры от болезней для поддержания листового аппарата в здоровом состоянии, что обеспечивает высокопродуктивную фотосинтетическую активность [5].

Наиболее доступный и эффективный способ контроля листовых болезней в посевах свёклы – использование препаратов фунгицидного действия (в качестве профилактических мер или при появлении первых признаков заболевания) [6, 7]. Современный рынок изобилует фунгицидами с разными действующими веществами (д. в.), например, на основе меди (Купроксат, Бордоская смесь, Цихом и др.), а также комбинированного действия – Фалькон (спироксамин + тебуконазол + триадименол), Риас (дифеноконазол + пропиконазол), Альто Супер (ципроконазол + пропиконазол) и др. [8, 9].

Обработка вегетирующих растений сельскохозяйственных культур фунгицидами, относящимися к одним и тем же группам по биологическому механизму действия, активизирует появление возбудителей болезней, резистентных к таким препаратам. Это обуславливает необходимость поиска новых фунгицидов с широким спектром активности и пролонгированным действием.

В результате исследований, проведенных в 2018–2019 гг. было установлено, что наибольший эффект обеспечивает применение схемы защиты, включающей двукратную обработку вегетирующих растений сахарной свёклы фунгицидом с комбинацией действующих веществ – пиракlostробин (62,5 г/л) + эпоксиконазол (62,5 г/л) с нормой расхода 1,25 (1-я обработка) и 1,50 л/га (2-я обработка) [10]. К фунгицидам, в состав которых входят эти компоненты, относится препарат Абакус Ультра, СЭ (пиракlostробин, 62,5 г/л + эпоксиконазол, 62,5 г/л). Кроме того, в Государственном каталоге пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории РФ, зарегистрированы фунгициды Пиктор Актив, КС, в состав которого помимо пиракlostробина (250 г/л) входит боскалид (150 г/л).

Препараты фунгицидного действия Абакус Ультра и Пиктор Актив продемонстрировали свою эффективность на разных сельскохозяйственных культурах благодаря пролонгированному действию, обеспечивающему длительную защиту растений от воздействия патогенов; возможности применения с целью профилактики и при первом проявлении симптомов болезней; наличие AgCelence®-эффекта, который выражается в положительном воздействии на физиологические процессы в растениях, иными словами, помогает ему лучше противостоять стрессовым факторам, например, недостатку или избытку влаги, резкому чередованию температур, повышенной инсоляции и др. В основе этого эффекта лежит действующее вещество пиракlostробин из группы стробилуринов. Он эффективно воздействует на митохондрии, вмешиваясь в механизмы энергообмена клеток. В результате происходит блокировка синтеза аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ), необходимой для процесса жизнедеятельности грибной клетки, что

приводит к её отмиранию. Таким образом достигается эффективный контроль грибных заболеваний.

Так как наличие митохондрий присуще всем клеткам живых организмов, пиракlostробин проникает и в митохондрии клеток растений, но, в отличие от клеток гриба, не прекращает, а только замедляет их энергообмен, что приводит к замедлению процесса старения. Попытка компенсации и адаптации организма растения к изменившимся условиям ведёт к ускорению процессов обмена веществ, фотосинтеза и усвоения азота. Блокировка АТФ вызывает усиленный синтез нитратредуктазы – одного из важнейших ферментов азотного обмена. Этот химический процесс, как и прочие, связанные с AgCelence®-эффектом, находит отражение во внешнем виде растения, которые приобретают более насыщенную и тёмно-зеленую окраску [11].

Кроме того, в ходе усиленного усвоения азота и переработки нитратов в нитриты образуется большее количество оксида азота (II), который, в свою очередь, выступает сильным ингибитором этилена – гормона, участвующего в процессах старения клеток живых организмов, а также разрушающего хлорофилл в клетках растений [12]. В литературе отсутствуют результаты исследований по комплексному использованию фунгицидов Абакус Ультра и Пиктор Актив для защиты сахарной свёклы от болезней и их последствий. Оба этих продукта содержат в своем составе пиракlostробин и, по заявлению компании-оригинатора, обладают AgCelence®-эффектом.

Цель исследований – определение эффективной нормы расхода и очередности обработки вегетирующих растений сахарной свёклы фунгицидами Абакус Ультра, СЭ и Пиктор Актив, КС, а также выявление изменений морфологических, технологических показателей и продуктивности культуры в результате их применения.

Методика. Работу выполняли на опытном поле ФГБНУ «ВНИИСС им. А. Л. Мазлумова» (Воронежская область) в зернопаропропашном севообороте (пар – озимая пшеница – сахарная свёкла – ячмень). Почва опытного участка – чернозём выщелоченный, среднесуглинистый, среднемощный, содержание гумуса – 5,4...5,6 %.

Агротехнические мероприятия включали основную обработку почвы осенью, которая состояла из лущения агрегатом КДК-6 на глубину 8 см и вспашки плугом ПНО 5–35 на 28...30 см; весеннее закрытие влаги агрегатом С-11 на 4...6 см; предпосевную обработку почвы культиватором АКШ-6 на 4 см; внесение минеральных удобрений; посев семян сахарной свёклы сеялкой Wintersteiger на глубину 3,0...3,5 см; междурядную культивацию (в 2 срока) – УСМК-5,4В.

Схема опыта включала четыре варианта систем защиты и контроль – без применения фунгицидов (табл. 1). Повторность опыта была трёхкратной, размещение

Табл. 1. Схема опыта по изучению эффективности фунгицидной обработки против болезней листового аппарата сахарной свёклы

Вариант	Номер обработки	Фунгицид	Норма расхода, л/га
Контроль (без обработки)	-	Контроль (без фунгицидных обработок)	-
Схема защиты I	I	Абакус Ультра	1,25
	II	Пиктор Актив	0,6
Схема защиты II	I	Абакус Ультра	1,25
	II	Пиктор Актив	0,8
Схема защиты III	I	Пиктор Актив	0,6
	II	Абакус Ультра	1,25
Схема защиты IV	I	Пиктор Актив	0,8
	II	Абакус Ультра	1,25

вариантов – систематическое, общая площадь под опытом – 656 м², общая площадь делянки – 43,7 м², учетная – 21,6 м². Фунгициды вносили в норме, рекомендованной производителем. Обработку проводили в вечернее время опрыскивателями «АГРОТОП».

В процессе исследований проводили фитопатологическую оценку согласно «Рекомендациям по учету и выявлению вредителей и болезней сельскохозяйственных растений», предусматривающим подсчет количества пораженных растений (Р) и степень развития (R) болезней листового аппарата сахарной свёклы. Урожайность корнеплодов определяли количественно-весовым методом, который предусматривает взвешивание корнеплодов, выкопанных на учетных отрезках, использованных для подсчета густоты стояния растений. Эффективность действия исследуемых фунгицидов на растения сахарной свёклы оценивали по их влиянию на массу листьев, содержание хлорофилла по N-тестеру, продуктивность фотосинтеза с учётом общей вегетативной массы. Для проведения технологической оценки сахарной свёклы формировали объединенные пробы корнеплодов с каждого варианта опыта. Их технологические показатели определяли в лаборатории аналитической оценки технологического качества сахарной свёклы с использованием общепринятых методов анализа свёклы и полупродуктов сахарного производства. На основании результатов технологического анализа рассчитывали прогнозируемый коэффициент извлечения сахара, его выход и потери сахарозы в мелассе.

Табл. 2. Метеорологические условия периода вегетации сахарной свёклы по данным метеостанции ФГБНУ «ВНИИСС им. А.Л. Мазлумова»

Год	Месяц					За вегетационный период
	май	июнь	июль	август	сентябрь	
Среднемесячная температура воздуха, °С						
2020	13,7	21,3	22,9	22,3	16,9	2971,9
2021	17,1	21,7	25,1	24,6	12,4	3093,8
Средне-многолетняя	18,0	21,6	23,2	21,8	15,3	3042,0
Сумма осадков, мм						
2020	59,2	65,3	66,5	82,3	43,9	317,2
2021	39,6	65,8	19,6	15,4	84,5	224,9
Средне-многолетняя	57,9	56,9	63,0	67,0	39,8	284,6

Вегетационные периоды свёклы в годы исследований отличались по количеству выпавших осадков: в 2020 г. их сумма составила 317,2 мм, что на 32,6 мм (или 11,5 %) больше, среднепогодного значения (284,6 мм), в 2021 г. она, наоборот, была меньше на 59,7 мм (или 21,0 %). Сумма среднемесячных температур в 2021 г. превзошла среднепогодную (3042 °С) на 51,8 °С, а в 2020 г. была ниже на 70,1 °С (табл. 2). Следует также отметить неравномерное подекадное распределение осадков по каждому месяцу исследуемых вегетационных периодов.

Величина интегрированного показателя тепло- и влагообеспеченности – гидротермического коэффициента

(ГТК) – в годы исследований варьировала по месяцам, что связано, в первую очередь, со среднемесячной динамикой осадков. В итоге май в 2020 г. характеризовался как слабо засушливым (ГТК=1,2), в 2021 г. – как засушливый (ГТК=0,7); июнь – соответственно сухой (ГТК=0,3) и слабо засушливый (ГТК=1,0); июль – очень засушливый (ГТК=0,5) и сухой (ГТК=0,3); август – сухой (ГТК=0,1...0,2); сентябрь – сухой (ГТК=0,1) и влажный (ГТК=2,3).

Результаты и обсуждение. В ходе полевых учётов в 2020–2021 гг. установлено, что при проведении обеих фунгицидных обработок вегетирующих растений сахарной свёклы признаков поражения листового аппарата болезнями не наблюдали. Первые визуальные проявления мучнистой росы в виде белого налёта на листовой пластинке зафиксированы только в контрольном варианте: в 2020 г. – во II декаде августа, в 2021 г. – в III декаде августа. Возможно, развитие возбудителя этой болезни *Erysiphe betae* связано с сухой, жаркой погодой и колебаниями ночных и дневных температур воздуха.

По результатам предуборочного фитопатологического обследования свекловичных посевов выявлено увеличение распространенности (Р) и степени развития (R) мучнистой росы в контроле до 94,6 % и 86,2 % соответственно. В экспериментальных вариантах листовых болезней, в том числе мучнистой росы, не выявлено. Следует отметить пролонгированное воздействие исследуемых препаратов, так как эффект от обработок отмечали вплоть до уборки.

Процессы жизнедеятельности растений – обмен веществ, рост, накопление питательных элементов – зависят от интенсивности фотосинтеза, в ходе которого аккумулируется энергия и образуется до 90...95 % необходимых организму органических соединений.

По результатам первого учёта опрыскивание вегетирующих растений сахарной свёклы фунгицидами способствовало увеличению площади фотосинтезирующей поверхности листьев, в сравнении с контрольным вариантом (118,2 см²), на 5,2...25,3 % (табл. 3). Содержание хлорофилла в листовых пластинках сахарной свёклы в экспериментальных вариантах было выше, чем в контроле (575 ед.), на 7,5...11,7 %. При проведении фунгицидных обработок коэффициент продуктивности фотосинтеза (КПФ) достигал 5,86...7,24, что на 14,1...41,2 % больше, чем в контроле (5,18).

Ко второму учёту во всех вариантах опыта, в сравнении с данными первого учёта, площадь фотосинтезирующей поверхности листьев снижалась на 7,4...12,6 %. В то же время отмечено увеличение содержания хлорофилла в растениях сахарной свёклы на 42...58 абс. ед., что, вероятно, способствовало повышению КПФ на 4,7...12,6 %. Наилучший в опыте эффект от фунгицидных обработок при обоих сроках учёта отмечен в вариантах со схемами защиты I и II, при которых КПФ превышали контроль на 30,4...41,2 и 27,3...39,3 % соответственно.

Табл. 3. Влияние фунгицидной обработки на формирование фотосинтетического аппарата сахарной свёклы (среднее за 2020–2021 гг.)

Вариант	Средняя площадь поверхности активно фотосинтезирующего листа, см ²		Содержание хлорофилла (показание N-тестера), ед.		Коэффициент продуктивности фотосинтеза (КПФ)		Отклонение КПФ от контроля, %	
	1 учет*	2 учет	1 учет	2 учет	1 учет	2 учет	1 учет	2 учет
Контроль (без обработки)	118,2	106,5	575	617	5,18	5,56	-	-
Схема защиты I	138,5	121,1	634	683	6,69	7,00	30,4	27,3
Схема защиты II	148,1	131,9	642	686	7,24	7,66	41,2	39,3
Схема защиты III	124,4	113,4	618	665	5,86	6,39	14,1	16,1
Схема защиты IV	127,1	117,7	620	678	6,00	6,76	17,0	22,9
НСР ₀₅	6,6	5,9	21	18	0,42	0,33		

*1 срок учета – III декада июля – I декада августа; 2 срок учета – II-III декада августа.

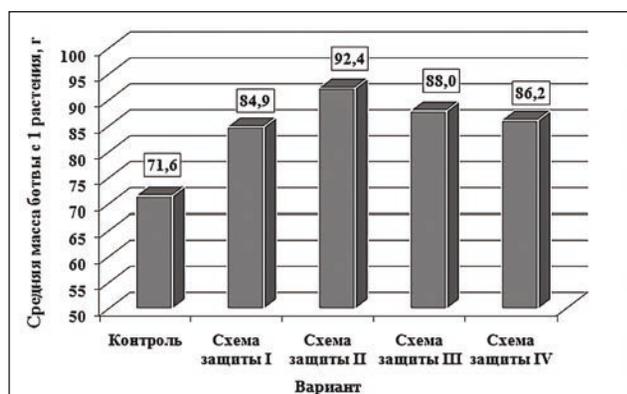


Рис. 1. Вегетативная масса с 1 растения сахарной свёклы в зависимости от фунгицидных обработок (среднее за 2020–2021 гг., НСР_{0,5} = 4,2 г).

К уборке средняя масса ботвы сахарной свёклы в вариантах с применением фунгицидов была больше, чем в контроле (71,6 г с 1 растения), на 18,6...29,0 % (рис. 1).

Продуктивность сахарной свёклы связана с развитием и функционированием листового аппарата. В 2020–2021 гг. средняя масса корнеплода не превышала 400 г. В вариантах с фунгицидными обработками величина этого показателя была больше, чем в контроле (319 г), на 14...52 г (или 4,2...16,2 %). Лучшими были варианты со схемами защиты II и III, в которых средняя масса корнеплода составляла 370 и 343 г, что достоверно превышало контроль (табл. 4).

Табл. 4. Влияние фунгицидной обработки на продуктивность сахарной свёклы (среднее за 2020–2021 гг.)

Вариант	Средняя масса корнеплода, г	Отношение массы ботвы к массе корнеплода	Биологическая урожайность, т/га	Прибавка урожая к контролю	
				т/га	%
Контроль (без обработки)	319	0,22	47,0	-	-
Схема защиты I	332	0,26	50,2	3,3	6,9
Схема защиты II	370	0,25	55,3	8,3	17,8
Схема защиты III	343	0,26	52,0	5,0	10,7
Схема защиты IV	339	0,25	50,6	3,7	7,9
НСР _{0,5}	22		2,9		

В годы исследований фунгицидные обработки предотвратили распространение возбудителей мучнистой росы, а это, в свою очередь, способствовало более интенсивному росту вегетативной массы. В результате отношение массы ботвы к массе корнеплодов в контрольном варианте составляло 0,22, тогда как в экспериментальных – 0,25...0,26, что соответствует большей ассимиляционной поверхности листьев на единицу массы корнеплодов.

Табл. 5. Влияние фунгицидной обработки на технологическое качество сахарной свёклы (2020–2021 гг.)

Исследуемый параметр	Контроль	Схема защиты			
		I	II	III	IV
Сахаристость, % (НСР _{0,5} = 0,26)	17,57	17,92	18,20	18,03	17,98
Содержание сухих веществ (СВ), % (НСР _{0,5} = 0,30)	26,20	25,88	25,81	25,92	25,67
Доля сахарозы в массе сухого вещества, % СВ (НСР _{0,5} = 2,07)	67,06	69,24	70,52	69,56	70,04
Содержание Na ⁺ , ммоль/100 г свеклы (НСР _{0,5} = 0,05)	0,63	0,54	0,48	0,51	0,49
Содержание K ⁺ , ммоль/100 г свеклы (НСР _{0,5} = 0,11)	3,94	3,67	3,32	3,53	3,44
Содержание α-NH ₂ , ммоль/100 г свеклы (НСР _{0,5} = 0,13)	1,95	1,53	1,21	1,37	1,35
Содержание редуцирующих веществ, % (НСР _{0,5} = 0,010)	0,067	0,048	0,037	0,051	0,042
Массовая доля растворимой углекислой золь, % к массе свеклы (НСР _{0,5} = 0,017)	0,393	0,368	0,351	0,362	0,357
Чистота очищенного клеточного сока, % (НСР _{0,5} = 0,28)	92,41	93,19	93,81	93,48	93,53
Массовая доля солей Ca, % CaO (НСР _{0,5} = 0,011)	0,043	0,028	0,020	0,030	0,025
Прогнозируемые потери сахара в мелассе, % (НСР _{0,5} = 0,10)	1,66	1,57	1,45	1,54	1,48
Прогнозируемый выход сахара, % (НСР _{0,5} = 0,20)	14,91	15,35	15,75	15,49	15,51
Коэффициент извлечения сахара из свеклы, % (НСР _{0,5} = 0,47)	84,86	85,66	86,54	85,91	86,26
Сбор очищенного сахара с 1 га посева, т/га (НСР _{0,5} = 0,34)	7,01	7,71	8,70	8,05	7,85

К уборке биологическая урожайность сахарной свёклы в экспериментальных вариантах составляла от 50,2 до 55,3 т/га. Наибольшая в опыте прибавка урожая, относительно контроля (47,0 т/га), была отмечена при обработке растений фунгицидами по схемам II и III – соответственно 8,3 и 5,0 т/га (17,8 и 10,7 %).

При уборке корнеплодов сахарной свёклы выявлено наличие таких болезней, как сухая фузариозная гниль и парша обыкновенная. Фузариоз проявлялся в виде пятен сухой гнили, занимающих от 5 % поверхности корнеплода и более. Эту болезнь, в основном, отмечали на корнеплодах, поверхность которых была сильнее поражена паршой. В контроле доля корнеплодов с различными патологиями (поражение паршой обыкновенной и сухим фузариозом) достигала 40,3 %. При использовании схемы защиты I величина этого показателя снижалась в 2,5 раза; схемы II – в 3,2 раза; схемы III – в 2,0 раза; схемы IV – в 3,3 раза (рис. 2).

Причина снижения количества больных корнеплодов

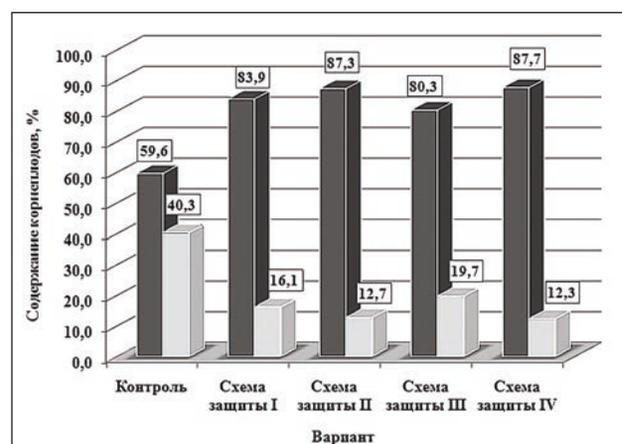


Рис. 2. Фитопатологическое состояние корнеплодов сахарной свёклы в зависимости от фунгицидных обработок (среднее за 2020–2021 гг.): ■ – корнеплоды здоровые, НСР_{0,5} = 4,0 %; □ – корнеплоды, пораженные болезнями, НСР_{0,5} = 2,1 %.

в экспериментальных вариантах, возможно, связана с повышением иммунитета растений в засушливых условиях вегетационных периодов сахарной свёклы вследствие применения фунгицида Абакс Ультра в комплексе с Пиктор Активом. Наибольшая в опыте доля здоровых корнеплодов выявлена в вариантах со схемами защиты II (87,3 %) и IV (87,7 %).

Сахаристость по вариантам опыта изменялась от 17,57 до 18,20 % при содержании сухих веществ 25,67...26,20 % (табл. 5). При обработке вегетирующих растений фунгицидами содержание сахара в корнеплодах

было выше, чем в контроле (17,57 %), на 0,36...0,64 %. Наибольшие величины этого показателя отмечены в вариантах со схемами защиты III и IV – 18,20 и 18,03 % соответственно.

В экспериментальных вариантах отмечали снижение количества несахаров-мелассообразователей: натрия – на 13,6...27,2 %; калия – на 6,9...15,8 %; α -аминного азота – на 21,3...37,8 %, относительно контрольного варианта, в котором величины перечисленных показателей составляли соответственно 0,63; 3,94 и 1,95 ммоль/100 г свёклы. Наименьшее количество щелочных элементов выявлено в варианте со схемой защиты II.

Количество РВ при использовании фунгицидов варьировало от 0,037 до 0,051 %, что в 1,3...1,8 раза меньше, чем в контроле (0,067 %). Аналогичная тенденция отмечена по содержанию растворимой кондуктометрической зольности, которое во всех вариантах опыта не превышало допустимого значения (0,6 %). Наименьшее величина этого показателя отмечена в варианте со схемой защиты растений II – 0,351 %, что ниже контроля (0,393 %) в 1,1 раза.

В корнеплодах, выращенных в экспериментальных вариантах, отмечены более высокие качественные характеристики очищенного клеточного сока. Его чистота варьировала от 93,19 до 93,81 %, что на 0,78...1,41 % выше, чем в контроле (92,41 %). Содержание солей кальция, образующихся при дефекации из-за взаимодействия $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с продуктами разложения редуцирующих веществ, в вариантах с обработкой вегетирующих растений фунгицидами было ниже контроля (0,043 % CaO) в 1,5...2,2 раза. Лучшее качество очищенного сока отмечено в варианте с применением схемы защиты II.

Результаты расчёта прогнозируемых технологических показателей свидетельствуют, что в экспериментальных вариантах потери сахара в мелассе были на 0,08...0,21 % ниже контроля (1,66 %). Выход сахара в вариантах с фунгицидными обработками превышал величину этого показателя в контроле (14,91 %) на 0,44...0,84 %. Наибольшей она была при использовании схемы защиты II – 15,75 %. В этом варианте отмечен самый высокий коэффициент извлечения сахарозы – 86,54 %, что выше контроля на 1,68 %.

Основным интегральным показателем, характеризующим эффективность свеклосахарного производства, выступает прогнозируемый сбор очищенного сахара с 1 га, который напрямую зависит от урожайности и выхода сахара. Имеющиеся данные позволяют судить о том, что фунгицидные обработки обеспечивали его достоверное повышение, по сравнению с контролем, на 0,70...1,69 т/га (или 10,0...24,1 %). Максимальная величина этого показателя отмечена в варианте с обработкой растений сахарной свёклы в период вегетации согласно схеме II (8,70 т/га), что объясняется большей урожайностью (55,3 т/га) и высоким прогнозируемым выходом сахара (15,75 %).

Выводы. Наиболее эффективна схема защиты сахарной свёклы, которая включает обработку вегетирующих растений препаратом Абакус Ультра с нормой расхода 1,25 л/га и через 20 дней вторую обработку Пиктор Активом с нормой расхода 0,8 л/га. Этот агротехнический приём способствовал формированию более высокой ассимиляционной поверхности листьев и длительному сохранению в активном состоянии фотосинтетического потенциала, эффективно подавлял рост грибов-возбудителей мучнистой росы, улучшал ростовые процессы, повышал устойчивость растений к неблагоприятным факторам окружающей среды (недостаток влаги, высокая температура). Применение препаратов Абакус Ультра и Пиктор Актив согласно указанной схеме защиты обеспечило повышение коэффициента продуктивности фотосинтеза

на 41,2 %, формирование прибавки урожая на уровне 8,3 т/га, снижение количества корнеплодов с патологиями в 3,2 раза, увеличение выхода сахара при переработке на 0,84 % при лучшей его извлекаемости и повышение сбора очищенного сахара с единицы площади на 24,1 %.

Авторы выражают благодарность специалистам ООО «БАСФ» и лично генеральному директору Рериг К. Д., менеджеру по развитию и применению продуктов BASF на сое, бобовых культурах и сахарной свёкле Процко М. Г. за оказание безвозмездной помощи в предоставлении пестицидов (фунгицидов, инсектицидов, гербицидов), необходимых для проведения исследований.

Литература.

1. Добрынин Н.Д., Мерзликин М.А. Вредные организмы посевов сахарной свёклы в лесостепи Центрального Черноземья // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. № 2 (45). С. 32–35.
2. Стогниенко О.И., Мелькумова Е.А., Корниенко А.В. Церкоспороз сахарной свёклы и методы снижения его вредоносности. Воронеж: ООО «Антарес», 2016. 160 с.
3. Жеряков Е.В., Бредучева Е.С. Устойчивость различных гибридов сахарной свёклы к поражению заболеваниями листового аппарата // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2021. Т. 2. № 1. С. 20–25.
4. Корниенко А.В. Система для создания адаптивных и устойчивых гибридов сахарной свёклы // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2018. № 1. С. 196–202.
5. Биологически и экологически эффективная система защиты сахарной свёклы в Центральном-Чернозёмном районе / М.А. Мерзликин, О.А. Минакова, О.В. Гамуев и др. // Вестник Курганской ГСХА. 2021. № 3. С. 4–12.
6. Разработка интегрированной технологии защиты посевов полевых культур от болезней, вредителей и сорняков на основе биологических и химических методов / Ю.Я. Спиридонов, Н.И. Будынков, Р.А. Автаев и др. // Аграрный научный журнал. 2017. № 9. С. 37–42.
7. Бородин Д.Ю. Опыт защиты сахарной свёклы в Ставропольском крае // Земледелие. 2016. № 3. С. 47–48.
8. Долженко В.И., Лаптев А.Б. Современный ассортимент средств защиты растений: биологическая эффективность и безопасность // Плодородие. 2021. № 3 (120). С. 71–75.
9. Развитие исследований по формированию современного ассортимента фунгицидов / Л.Д. Гришечкина, В.И. Долженко, О.В. Кунгурцева и др. // Агрохимия. 2020. № 9. С. 32–47.
10. Путилина Л.Н., Лазутина Н.А. Формирование технологического качества и продуктивности сахарной свёклы в результате действия современных фунгицидов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2021. № 1. С. 38–51.
11. Physiological effects of the strobilurin fungicide F 500 on plants / H. Köhle, K. Grossmann, T. Jabs, et al. // Modern Fungicides and Antifungal Compounds III. 2002. P. 61–74.
12. Kanungo M., Joshi J. Impact of Pyraclostrobin (F-500) on Crop Plant // Plant Science Today. 2014. Vol. 1(3). P. 174–178.

Поступила в редакцию 27.04.2023

После доработки 16.09.2023

Принята к публикации 24.10.2023

Земледелие и мелиорация

УДК 631.171

DOI: 10.31857/S2500262723060091, EDN: NIBVVQ

МЕТОДОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ***И. Ю. Савин^{1,2}**, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук,
Ю. И. Блохин³, **А. В. Чинилин¹**, кандидат биологических наук¹Федеральный исследовательский центр
«Почвенный институт им. В. В. Докучаева»,
119017, Москва, Пыжевский пер., 7 стр. 26²Российский университет дружбы народов,
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6³Агрофизический научно-исследовательский институт,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14
E-mail: savin_iyu@esoil.ru

Цифровые технологии активно распространяются в сельском хозяйстве России на разных уровнях анализа информации (от делянки, до поля, хозяйства, региона и страны в целом). В растениеводстве на уровне поля одно из самых важных значений приобретает освоение систем точного, оперативного и автоматизированного мониторинга состояния посевов, успешность которого во многом предопределяет эффективность точного земледелия. Цель исследований – разработка методологии использования технологий интернета вещей для бесконтактного мониторинга посевов сельскохозяйственных культур и сопутствующих метеорологических и почвенно-гидрологических параметров. В качестве основы системы используется беспроводная сеть, в состав которой входят сенсорные узлы, оснащенные датчиками метеорологических параметров и влажности почв, а также фотокамеры с широкоформатными объективами. Сенсорные узлы, оснащенные датчиками и фотокамерой, размещаются в соответствии со специально разработанной схемой, индивидуальной для каждого поля. Разработка схемы размещения датчиков базируется на анализе многолетних архивов спутниковых данных высокого пространственного разрешения и уточненных почвенных карт крупного масштаба. Информация с датчиков посредством беспроводной связи передается на координаторы сети (или базовую станцию) и далее на удаленный сервер в базу данных, где автоматизированно анализируется и интерполируется на все поле. На основе анализа формируются рекомендации по коррекции агротехнологии возделывания культуры. Элементы методологии прошли апробацию на ряде тестовых полей и показали высокую эффективность. Освоение предложенных подходов может служить альтернативой использованию данных дистанционного зондирования для мониторинга посевов в офлайн системах точного земледелия.

METHODOLOGY OF OPERATIONAL MONITORING OF CROP STATUS BASED ON THE INTERNET OF THINGS TECHNOLOGIES**I. Yu. Savin^{1,2}**, **Yu. I. Blokhin³**, **A. V. Chinilin¹**¹Federal Research Center «Dokuchaev Soil Science Institute»,
119017, Moskva, Pyzhevskii per., 7, str. 26²Peoples' Friendship University of Russia,
117198, Moskva, ul. Miklukho-Maklaya, 6³Agrophysical Research Institute,
195220, St. Petersburg, Grazhdansky pr., 14
E-mail: savin_iyu@esoil.ru

Digital technologies are being actively introduced into Russian agriculture at different levels of information analysis (from the plot to the field, farm, region and country as a whole). In crop production at the field level, one of the most important values is the introduction of systems for accurate, rapid and automated monitoring of crop condition, the success of which largely predetermines the effectiveness of precision farming systems. The aim of the research is to develop a methodology for using Internet of Things technologies for non-contact monitoring of crops and related meteorological and soil-hydrological parameters. A wireless network is used as the basis for monitoring, which includes sensor nodes equipped with sensors for meteorological parameters, soil moisture and cameras equipped with a fish-eye lens. Sensor nodes equipped with sensors and cameras are placed in the field according to a specially designed scheme, individualized for each field. Development of the scheme of sensor placement on the field is based on the analysis of long-term archives of satellite data of high spatial resolution and refined soil maps of large scale. Information from sensors is wirelessly transmitted to the network coordinator (or base station) and then to the remote server in the database, and there it is automatically analyzed and interpolated for the whole field. Based on the analysis, recommendations for correction of agrotechnology of crop cultivation are formed. Elements of the methodology were tested on a number of test fields and showed high efficiency. Implementation of the proposed approaches can serve as an alternative to the use of remote sensing data for crop monitoring in offline precision farming systems.

Ключевые слова: мониторинг посевов, беспроводные сенсорные сети, сенсорный узел, биофизические параметры посева, внутривидовые неоднородности посевов, точное земледелие.

Key words: crop monitoring, wireless sensor networks, sensor node, biophysical crop parameters, in-field crop heterogeneities, precision agriculture

Тренд последних десятилетий в мировом сельском хозяйстве – широкое распространение цифровых технологий, которые используются для оперативного мониторинга сельскохозяйственного производства на основе

беспроводных сенсорных сетей (БСС), информационно-измерительных и дистанционных технологий, для создания интеллектуальных систем принятия решений и робототехники непосредственно для производственной

*исследование выполнено при финансовой поддержке Российской Федерации (соглашение с Минобрнауки России от 02.10.2020 г. № 075–15–2020–805).

деятельности [1, 2, 3]. Многие авторы определяют этот процесс как четвертую технологическую революцию в сельском хозяйстве, цифровым или умным сельским хозяйством [4, 5].

В земледелии этот процесс выражается в освоении технологий точного земледелия, а также разработке датчиков и систем принятия решений для этой технологии [6, 7, 8]. Принятие решений в технологии точного земледелия базируется на результатах мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур, который, в свою очередь, проводится на основе датчиков, непосредственно установленных на сельскохозяйственную технику, или данных дистанционной съемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) либо со спутников [8].

Одно из перспективных направлений развития технологий точного земледелия – внедрение сенсорных узлов БСС, включенных в интернет вещей, которые стационарно или временно устанавливаются на поле для оперативного сбора информации о состоянии посевов [9, 10, 11]. Несмотря на перспективность этого подхода, он до сих пор не получил достаточного научного обоснования.

Цель исследований – разработать методологию использования сенсорных узлов для оперативного мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур.

Методика. При создании системы мониторинга посевов на основе сенсорных узлов БСС, включенных в интернет вещей, необходимо учитывать следующие обстоятельства:

почвенный покров практически любого поля неоднороден. Свойства почв могут сильно меняться в пространстве даже на расстоянии в нескольких метрах. Поэтому для их мониторинга, который необходим для принятия управленческих решений, одного датчика на поле явно недостаточно. Это не обеспечивает сбор объективной информации о состоянии почв на всем поле, а не только в точке размещения датчика;

качество мониторинга зависит от подхода, используемого для пространственной интерполяции информации, собираемой датчиками;

использование традиционно составленной почвенной карты как источника информации о пространственной неоднородности свойств почв сильно ограничено, так как на ней акцент сделан только на варьировании наиболее важных классификационных свойств почв, которые часто не выступают агрономически значимыми и наоборот. Более того, традиционные методы составления почвенных карт не позволяют детально учитывать пространственные неоднородности отдельных свойств почв;

такая же ситуация с учетом неоднородностей посевов. Они могут быть обусловлены как пространственными неоднородностями свойств почв, так и другими причинами (например, неравномерностью посева или внесения питательных веществ, повреждением растений болезнями и вредителями или засоренностью посевов).

Для многих свойств почв и посевов отсутствуют датчики, которые позволили бы осуществлять их мониторинг в полевых условиях. Чаще всего используют мобильные системы для детектирования такого свойства почв, как электропроводность, с которой тесно связаны такие базовые агрономически значимые свойства, как влажность почв, их засоленность, минерализация почвенного раствора и гранулометрический состав почв. В экспериментальном режиме используют датчики плотности и сопротивления горизонтальной пенетрации (в движении) [12]. Для мониторинга состояния посевов чаще всего используют датчики, определяющие содержание азота, на основе вычисления спектральных

индексов [13]. Известны также датчики для оценки засоренности посевов и пораженности растений вредителями и болезнями [14, 15]. Достаточно широко распространены датчики для мониторинга метеорологических параметров, которые наиболее просты в использовании и хорошо апробированы [16].

Количество датчиков, размещаемых на поле, должно быть оптимальным с точки зрения возможностей сбора информации для всего поля и затрат на приобретение и обслуживание. Кроме того, необходимо учитывать возможности беспроводной передачи информации с датчиков на компьютер.

С учетом этих особенностей, создание системы мониторинга посевов на основе сенсорных узлов БСС, включенных в интернет вещей, должно начинаться с разработки схемы оптимального размещения датчиков на поле (рис. 1). В качестве критерия для поиска оптимальных мест размещения сенсорных узлов целесообразно использовать информацию об устойчивых неоднородностях посевов на поле в течение последних десяти лет.

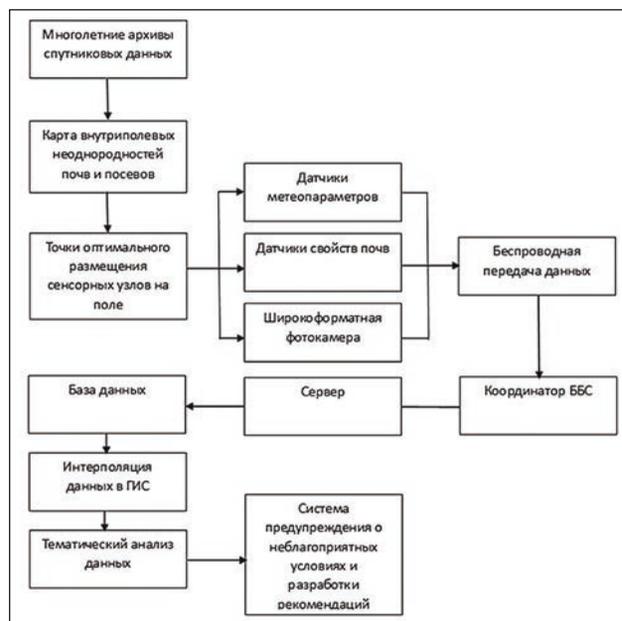


Рис. 1. Схема использования методологии.

С этой целью проводится выявление таких неоднородностей на основе анализа многолетних архивов спутниковых данных [9]. Сформированные за последние годы архивы позволяют проводить подобный анализ на большей части территории страны, за исключением полей небольшого размера, для которых пространственного разрешения спутниковых данных имеющихся архивов может оказаться недостаточно.

Опыт показывает, что для корректной интерполяции данных точечных наблюдений на все поле, необходимо не более 3...5 сенсорных узлов. В этом случае мониторинг почв и посевов можно проводить, опираясь исключительно на информацию с датчиков.

Тип датчиков интернета вещей, которые могут быть использованы для мониторинга, в последние годы ограничен. Это связано с наличием датчиков тех или иных свойств агроценозов. Из датчиков, регистрирующих метеорологические свойства приземной атмосферы и микроклимата, наиболее важны для сельскохозяйственных целей датчики температуры воздуха, количества атмосферных осадков, влажности воздуха,

скорости и направления ветра. Для мониторинга почв могут и должны использоваться датчики влажности, температуры, электропроводности почвы, установленные на глубине 10, 40, 60 и 100 см.

Мониторинг состояния посевов можно осуществлять с использованием датчиков содержания в листьях азота (или хлорофилла), опыт использования которых в системах точного земледелия и при дистанционном мониторинге посевов достаточно велик [7, 13]. Кроме того, необходимо обеспечить съемку посевов в надир с высоты 1,0...1,5 м на фотокамеру с широкоформатным объективом, что позволит собирать информацию о ходе развития растений и биофизических показателях посевов [17, 18].

Кроме того, в подобных системах мониторинга могут быть задействованы датчики состояния растений, которые крепятся непосредственно на модельное растение и анализируют состав раствора внутри стебля или листьев растения [19]. Однако они до сих пор достаточно дороги и мало апробированы в полевых (не тепличных) условиях.

Периодичность сбора данных о разных параметрах агроценоза должна различаться. Так, все метеорологические параметры достаточно получать 1 раз в 30 мин. в течение всего сезона вегетации. С такой же периодичностью целесообразно получать информацию с датчиков свойств почв. Оптимальная периодичность сбора сведений о состоянии посевов – 1 раз в неделю.

Информация со всех сенсорных узлов, установленных на поле, передается по беспроводной связи на координатор БС, где накапливается, структурируется и анализируется.

Анализ метеорологических данных заключается в расчете агроклиматических параметров, важных для конкретной возделываемой культуры и конкретной местности, в слежении за трендами этих параметров и их прогнозе на ближайший период. На основе прогноза осуществляется заблаговременное предупреждение пользователя об опасности возникновения неблагоприятных метеорологических условий. Анализ поступающей метеорологической информации проводится для каждого сенсорного узла на поле, а результаты интерполируются на все поле с целью учета микроклимата. Аналогичным образом анализируются почвенные параметры.

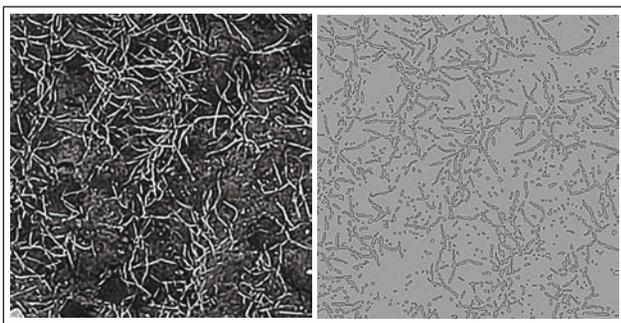


Рис. 2. Пример детектирования проективного покрытия посевов озимой пшеницы по изображениям, полученным в надир с широкоформатной камерой (слева – исходное изображение в черно-белом формате, справа – результат выделения растений (темно-серые выделки)).

Анализ состояния посевов ведется на основе оперативной съемки в надир с использованием широкоформатной камеры [18] (рис. 2). По широкоформатным изображениям в каждой точке рассчитываются такие параметры, как индекс поверхности растительности (РАI) (рис. 3), средний угол наклона листа (АLА), доля поглощенного фотосинтетически активного излучения

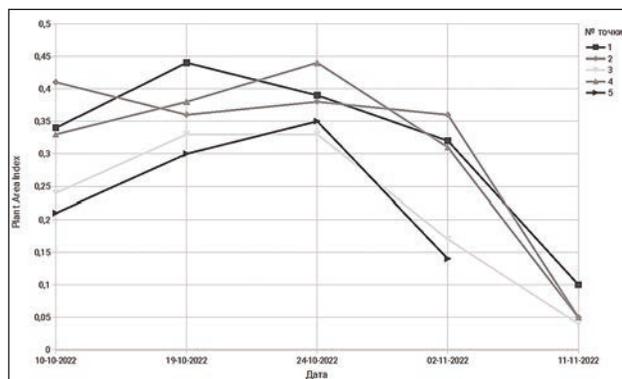


Рис. 3. Динамика значений РАI по ходу вегетации культуры в 5 точках на поле как результат мониторинга биофизических параметров посевов с использованием широкоформатной камеры.

(fAPAR) (рис. 4), доля проективного покрытия растительного покрова (fCOVER), которые затем также интерполируются на всю территорию поля в ГИС. Расчеты

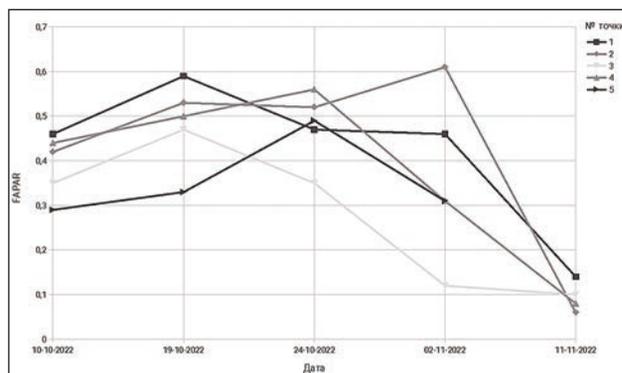


Рис. 4. Динамика значений fAPAR по ходу вегетации культуры в 5 точках на поле как результат мониторинга биофизических параметров посевов с использованием широкоформатной камеры.

могут проводиться с использованием программного обеспечения CAN-EYE [17, 18].

Тестирование элементов разработанной методологии осуществляли на примере полей Меньковского стационара Агрофизического научно-исследовательского института.

Результаты и обсуждение. Построенная предложенным образом система мониторинга посевов (см. рис. 1) позволяет землевладельцу в реальном времени собирать информацию о состоянии метеоусловий, почв и посевов с учетом внутривосходов неоднородностей.

Согласно результатам тестирования элементов разработанной методологии, получение комплексной информации о состоянии почв, метеоусловий и посевов на основе других подходов (например, с использованием данных дистанционного зондирования или полевых обследований) с такой оперативностью и точностью сегодня практически неосуществимо. Об этом свидетельствуют как результаты наших исследований [8, 9, 12], так и данные других авторов [7, 10, 11].

Основными проблемами при практическом освоении описанных подходов представляются следующие:

- отсутствие надежных датчиков для детектирования многих свойств почв, особенно для подповерхностных горизонтов корнеобитаемой толщи;

- неустойчивость беспроводной передачи данных на больших полях и для датчиков, установленных внутри почвы;

недостаточный опыт моделирования биофизических параметров разных типов посевов;
отсутствие унифицированного программного обеспечения для анализа собираемой информации;
необходимость небольшого смещения части датчиков при обработке посевов в течение вегетации;
уязвимость сенсорных узлов к вандализму и повреждению от прочих негативных явлений. Разработка скрытых/замаскированных узлов для размещения на поле уже ведется в Агрофизическом научно-исследовательском институте.

Выводы. Технологии интернета вещей позволяют сегодня собирать наиболее полную, оперативную и точную информацию о состоянии посевов, почв и микроклимата на поле. При их использовании задействуется широкий набор современных цифровых методов и подходов: от спутниковых данных и дистанционной передачи информации, до распознавания образов и пространственного моделирования. Важное значение имеет проблема оптимизации размещения датчиков на поле с учетом внутривидовых неоднородностей. Дальнейшее развитие этих подходов должно быть направлено на создание датчиков иных свойств почв и посевов, которые позволят получать более полную информацию об их состоянии.

Литература

1. Soma T., Nuckchady B. *Communicating the Benefits and Risks of Digital Agriculture Technologies: Perspectives on the Future of Digital Agricultural Education and Training* // *Front. Commun.* 2021. 6:762201. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fcomm.2021.762201/full> (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.3389/fcomm.2021.762201.
2. *Priorities for Science to Overcome Hurdles Thwarting the Full Promise of the 'digital Agriculture' Revolution* / M. Shepherd, J. A. Turner, B. Small, et al. // *J. Sci. Food Agric.* 2020. Vol. 100. No. 14. P. 5083–5092. doi:10.1002/jsfa.9346.
3. *Цифровое земледелие* / А. Л. Иванов, И. С. Козубенко, И. Ю. Савин и др. // *Вестник российской сельскохозяйственной науки.* 2018. № 5. С. 4–9.
4. Van der Burg S., Bogaardt M.-J., Wolfert S. *Ethics of Smart Farming: Current Questions and Directions for Responsible Innovation towards the Future* // *NJAS – Wageningen J. Life Sci.* 2019. 90–91, 100289. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1016/j.njas.2019.01.001> (дата обращения: 27.07.2023). doi:10.1016/j.njas.2019.01.001.
5. Sung J. *The Fourth Industrial Revolution and Precision Agriculture* // *InTech.* 2018. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/57703> (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.5772/intechopen.71582.
6. *Точное земледелие как один из аспектов цифровизации сельского хозяйства* / С. В. Шаптура, А. В. Коломейцев, И. И. Позняк и др. // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии.* 2022. № 3. С. 161–166.
7. Tendulkar A. *Introduction to Precision Agriculture: Overview, Concepts, World Interest, Policy, and Economics* // *Precision Agriculture Technologies for Food Security and Sustainability* / edited by Sherine M. Abd El-Kader and Basma M. Mohammad El-Basioni, IGI Global, 2021. P. 1–22. URL: https://www.researchgate.net/publication/348122259_Introduction_to_Precision_Agriculture_Overview_Concepts_World_Interest_Policy_and_Economics (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.4018/978-1-7998-5000-7.ch001.
8. Якушев В. В. *Точное земледелие: теория и практика.* СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. 364 с.
9. Савин И. Ю., Блохин Ю. И. *Об оптимизации размещения сети сенсорных узлов БСС, включенных в интернет вещей на пахотных угодьях* // *Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева.* 2022. № 110. С. 22–50. doi: 10.19047/0136-1694-2022-110-22-50.
10. *Monitoring Soil and Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Original Modeling Approach Dedicated to Low-Cost Soil Water Content Sensors* / P. Placidi, R. Morbidelli, D. Fortunati, et al. // *Sensors.* 2021. Vol. 21. P. 5110. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/15/5110> (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.3390/s21155110.
11. Ravesa A., Shabir A. S. *Precision agriculture using IoT data analytics and machine learning* // *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences.* 2022. Vol. 34. No. 8. Part B. P. 5602–5618. doi: 10.1016/j.jksuci.2021.05.013.
12. *Современные решения для формирования опорной информации с целью повышения точности определения агрофизических свойств почвы по спутниковым данным* / Ю. И. Блохин, В. В. Якушев, С. Ю. Блохина и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2020. Т. 17. № 4. С. 164–178. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-164-178.
13. *State of Major Vegetation Indices in Precision Agriculture Studies Indexed in Web of Science: A Review* / D. Radočaj, A. Šiljeg, R. Marinović, et al. // *Agriculture.* 2023. Vol. 13. No. 3. P. 707. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/3/707> (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.3390/agriculture13030707.
14. *Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot* / Oberti R., Marchi M., Tirelli P., et al. // *Biosyst. Eng.* 2016. Vol. 146. P. 203–215. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2015.12.004.
15. Kim S., Lee M., Shin C. *IoT-Based Strawberry Disease Prediction System for Smart Farming* // *Sensors.* 2018. Vol. 18. No. 11. P. 4051. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/4051> (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.3390/s18114051.
16. *Internet of Things Platform for Smart Farming: Experiences and Lessons Learnt* / P. P. Jayaraman, A. Yavari, D. Georgakopoulos, et al. // *Sensors.* 2016. Vol. 16. No. 11. P. 1884. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/11/1884> (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.3390/s16111884.
17. *Can the plant area index of a submerged vegetation canopy be estimated using digital hemispherical photography?* / D. Zhao, M. Lv, P. Wang, et al. // *Agricultural and Forest Meteorology.* 2014. Vol. 192. P. 69–77.
18. *Methods for in situ leaf area index measurement, part II: from gap fraction to leaf area index: retrieval methods and sampling strategies* / M. Weiss, F. Baret, G. J. Smith, et al. // *Agric. For. Meteorol.* 2004. Vol. 121. P. 17–53.
19. Guo Y. *Wearable sensors to monitor plant health* // *Nat. Food.* 2023. Vol. 4. P. 350. URL: <https://www.nature.com/articles/s43016-023-00764-3> (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.1038/s43016-023-00764-3.

Поступила в редакцию 12.08.2023
После доработки 06.09.2023
Принята к публикации 10.10.2023

УРОЖАЙ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

В. И. Усенко, доктор сельскохозяйственных наук, **А. А. Гаркуша**, кандидат сельскохозяйственных наук, **Т. А. Литвинцева**, кандидат сельскохозяйственных наук, **Е. Г. Дерянова**, кандидат сельскохозяйственных наук, **А. А. Щербакова**, **И. А. Кобзева**

Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий,
656910, Барнаул, Научный городок, 35
E-mail: aniish@mail

Исследования проводили с целью оценки эффективности комплексного воздействия агротехнологических приемов (удобрений, пестицидов, обработки почвы, предшественников) и агрометеорологических условий на урожай яровой пшеницы. Работу выполняли в 2011–2023 гг. на выщелоченном маломощном малогумусном среднесуглинистом черноземе Алтайского края. Схема стационарного полевого опыта, заложенного в 2000 г., предполагала изучение следующих вариантов: обработка почвы (фактор А) – глубокая (25...27 см), мелкая (14...16 см) плоскорезная, без обработки; удобрения (фактор В) – без удобрений, припосевное (аммофос), основное (аммиачная селитра) + припосевное; пестициды (фактор С) – без пестицидов, дикотициды, дикотициды + граминициды, дикотициды + граминициды + инсектициды + фунгициды. Предшественники пшеницы создавали в севообороте пар (без обработки почвы – рапс) – пшеница – овес – пшеница – горох – пшеница и при бессменном возделывании пшеницы. Урожайность пшеницы по предшественникам без удобрений и пестицидов в среднем по обработкам почвы составляла по пару 1,53 т/га, по гороху – 1,27, овсу – 1,06, при бессменном посеве – 0,81 т/га. Зависимость (r) урожайности от увлажнения мая–июня по этим предшественникам усиливалась соответственно с 0,628 до 0,705, 0,870 и 0,918. Вклад обработки почвы в варьирование урожайности пшеницы снижался от пара и гороха (26,9...58,0 %) к овсу и бессменному посеву (1,3...2,5 %), а удобрений и пестицидов – возрастал соответственно с 10,0 до 53,2 % и с 29,7 до 51,5 %. Прибавка урожая от припосевого удобрения аммофосом снижалась от пара (0,15 т/га) к гороху (0,11 т/га), овсу (0,10 т/га) и бессменному посеву (0,08 т/га), а от основного удобрения аммиачной селитрой, напротив, увеличивалась с 0,19 и 0,18 т/га до 0,31 и 0,22 т/га. При хорошем увлажнении эффективность удобрений по мере повышения насыщенности пестицидами возрастала в 1,5...2,0 раза.

SPRING WHEAT HARVEST UNDER COMPLEX AGROTECHNOLOGICAL INFLUENCE IN CONDITIONS OF VARIOUS HUMIDIFICATION OF THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA

**V. I. Usenko, A. A. Garkusha, T. A. Litvintseva,
E. G. Deryanova, A. A. Shcherbakova, I. A. Kobzeva**

Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnologies,
656910, Barnaul, Nauchnyi gorodok, 35
E-mail: aniish@mail

Studies to assess the effectiveness of the complex impact of agrotechnological techniques (fertilizers, pesticides, tillage, precursors) on the harvest of spring wheat were carried out in 2011–2023. The work was carried out on leached low-power low-humus medium loamy chernozem of the Altai Territory. The scheme of the stationary field experiment, laid down in 2000, assumed the study of the following options: tillage (factor A) – deep (25...27 cm), shallow (14...16 cm) flat-cut, without processing; fertilizers (factor B) – without fertilizers, near-sowing (ammophos), basic (ammonium nitrate) + near-sowing; pesticides (factor C) – without pesticides, dicotyledons, dicotyledons + graminicides, dicotyledons + graminicides + insecticides + fungicides. The predecessors of wheat created pairs in crop rotation (without tillage – rapeseed) – wheat – oats – wheat – peas – wheat and with permanent cultivation of wheat. The yield of wheat (t/ha) for predecessors without fertilizers and pesticides averaged 1.53 for each pair of tillage, 1.27 for peas, 1.06 for oats, and 0.81 for permanent sowing. The dependence (r) of yield on May–June moisture by predecessors increased from 0.628 to 0.705, 0.870 and 0.918, respectively. The contribution of tillage (%) to wheat yield variation decreased from steam and peas (26.9...58.0) to oats and permanent sowing (1.3...2.5), and fertilizers and pesticides increased from 10.0 to 53.2 and from 29.7 to 51.5, respectively. The increase in yield (t/ha) from the seed fertilizer with ammophos decreased from steam (0.15) to peas (0.11), oats (0.10) and permanent sowing (0.08), and from the main fertilizer with ammonium nitrate, on the contrary, increased from 0.19 and 0.18 to 0.31 and 0.22. With good moisture, the effectiveness of fertilizers increased with increasing saturation with pesticides by 1.5...2.0 times.

Ключевые слова: яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.), обработка почвы, удобрения, гербициды, инсектициды, фунгициды, условия увлажнения, урожайность, прибавка урожая, окупаемость удобрений.

Key words: spring wheat (*Triticum aestivum* L.), tillage, fertilizers, herbicides, insecticides, fungicides, moisture conditions, yield, yield increase, fertilizer payback.

В земледелии юга Западной Сибири, в том числе и Алтайского края, несмотря на взрывной рост в последние годы площадей под высокомаржинальными культурами, яровая пшеница остается наиболее распространенной и продолжает играть ключевую

роль в экономике аграрной отрасли региона. Удобрения рассматриваются одним из важных факторов в решении проблемы управления плодородием почв и продуктивности агроценозов [1, 2, 3]. Обеспечение высокой окупаемости минеральных удобрений

дополнительной продукцией в рыночных условиях выступает основным требованием при их использовании [4, 5, 6]. Наиболее остро эта проблема встает для зерновых культур, закупочные цены на продукцию которых всегда оставались невысокими [7, 8, 9]. Эффективность применения минеральных удобрений под зерновые культуры определяется как технологическими аспектами, в том числе приемами и глубиной основной обработки почвы, до сих пор остающимися дискуссионными, так и ресурсным обеспечением территории, учет взаимодействия которых выступает важным резервом увеличения их продуктивности и окупаемости затрат [10, 11, 12].

Цель исследований – изучение эффективности комплексного воздействия агротехнологических приемов (удобрений, пестицидов, обработки почвы, предшественников) и агрометеорологических условий на урожай яровой пшеницы для совершенствования технологий ее возделывания применительно к условиям лесостепи юга Западной Сибири.

Методика. Работу выполняли в 2011–2023 гг. на опытном поле Алтайского НИИСХ – отдела Федерального Алтайского научного центра агробиотехнологий в стационарном полевом опыте, заложенном в 2000 г. в севообороте со следующим чередованием культур: пар чистый (на фоне без основной обработки почвы – рапс на маслосемена) – пшеница – овес – пшеница – горох – пшеница и в бессменных посевах пшеницы. Выбор культур севооборота и их чередования обусловлен наибольшей их распространенностью в земледелии региона и возможностью получения экспериментальных данных по различным предшественникам для пшеницы в одинаковых условиях. Высевали среднеспелые сорта яровой мягкой пшеницы полунтенсивного типа Алтайская 100 (2011–2015 гг.), Алтайская 530 (2016–2019 гг.), Алтайская жница (2020–2022 гг.) селекции Алтайского НИИСХ. Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов:

обработка почвы (фактор А) – глубокая плоскорезная на 25...27 см (ГПО); мелкая плоскорезная на 14...16 см (МПО); без обработки (БО) (до 2011 г. – поверхностная обработка на 6...8 см);

минеральные удобрения (фактор В) – без удобрений (0); припосевное удобрение аммофосом ($N_{5,8} P_{25}$); допосевное (основное) удобрение аммиачной селитрой (N_{40}) + припосевное удобрение аммофосом ($N_{5,8} P_{25}$);

средства защиты растений (фактор С) – без обработки (0); гербициды против двудольных сорняков (Г-1); гербициды против двудольных сорняков + гербициды против однодольных сорняков (Г-2); гербициды против двудольных сорняков + гербициды против однодольных сорняков + инсектициды + фунгициды (ГИФ).

Опыт заложен на склоне юго-восточной экспозиции крутизной 1...2°. Площадь экспериментальных делянок последнего порядка 116...255 м². Расположение делянок систематическое, повторность трехкратная. Исследования в опыте выполняли общепринятыми методами, полученные результаты подвергали дисперсионному и корреляционному анализу [13].

Агротехника в опыте включала следующие мероприятия: на фонах с глубоким и мелким плоскорезным рыхлением после уборки предшественника проводили поверхностную обработку легкой дисковой бороной на глубину 3...4 см, в октябре – основную обработку согласно схеме, весной, при достижении почвой физической спелости – боронование, допосевное

(основное) внесение азотных удобрений сеялкой типа СЗ-3,6, предпосевную культивацию, посев (в конце первой декады мая) сеялкой СЗ-3,6, прикатывание. На фоне без основной обработки почвы в первой-второй декаде сентября и/или перед посевом проводили опрыскивание гербицидом сплошного действия, весной – допосевное (основное) внесение азотных удобрений сеялкой прямого посева Semeato TDNG 420 с дисковыми сошниками, этой же сеялкой в конце первой декады мая выполняли посев пшеницы. Норма высева при всех приемах обработки почвы составляла 5,0...5,5 млн всхожих семян на 1 га, с внесением аммофоса согласно схеме опыта.

Обработку посевов против сорняков, вредителей и болезней осуществляли включенными в список разрешенных препаратов пестицидами в рекомендуемые сроки с использованием наземных опрыскивателей. Расход рабочего раствора – 170...200 л/га.

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный среднесуглинистый малогумусный среднесуглинистый, с содержанием (при закладке опыта) гумуса в пахотном слое 3,80 %, общего азота – 0,23 %, подвижных соединений фосфора и калия (по Чирикову) – 270 и 180 мг/кг почвы соответственно. Реакция среды – близкая к нейтральной (рН_{сол.} 6,15).

Климатическая норма сумм осадков за сельскохозяйственный год, по данным АГМС Барнаул, составляет 443 мм, из которых осенью (сентябрь-октябрь) выпадает 71 мм, зимой (ноябрь-март) – 132 мм, весной (апрель-май) – 69 мм, летом – 171 мм, в том числе в июне – 54, июле – 72, августе – 45 мм, сумма положительных температур за вегетационный период – 2258 °С. В годы исследований сумма осадков осенью варьировала от 47 мм в 2011 г. до 139 мм в 2015 г., зимой – от 71 мм в 2012 г. до 190 мм в 2013 г. и 191,3 мм в 2020 г., весной – от 26 мм в 2022 г. до 118 мм в 2018 г., летом – от 108 мм в 2011 г. до 240 мм в 2017 г., а положительных температур за вегетационный период – от 2087 °С в 2013 г. и 2127 °С в 2018 г. до 2528 °С в 2012 г. и 2536 °С в 2020 г. По соотношению влаги и тепла, а также в сравнении с климатической нормой, наиболее увлажненными были 2013 и 2017 гг., в которые коэффициент увлажнения по В. А. Понько ($K_{увл}$) за май-август был равен соответственно 1,10 и 1,02, а гидротермический коэффициент по Г. Т. Селянинову (ГТК) – 1,37 и 1,35. Наиболее засушливые условия отмечены в 2012 и 2019 гг. ($K_{увл}$ – 0,55 и 0,61, ГТК – 0,76 и 0,70 при их среднемесячных значениях соответственно 0,82 и 1,01).

При анализе полученных результатов годы исследований подразделяли условно на засушливые (2012 и 2019 гг.), умеренно увлажненные (2011, 2014–2016, 2018, 2020–2023 гг.) и хорошо увлажненные (2013 и 2017 гг.).

Результаты и обсуждение. Средняя за 2011–2023 гг. урожайность пшеницы после пара без применения удобрений и пестицидов составляла 1,53 т/га (табл. 1). Ее изменение на 58,0 % определялось влиянием обработки почвы, на 29,7 % – пестицидов и на 10,0 % – удобрений. На фоне механических обработок почвы урожайность пшеницы после пара была достоверно выше, чем на фоне прямого посева после рапса: 1,73...1,80 против 1,08 т/га без применения пестицидов и 2,39...2,43 против 1,53 т/га на фоне пестицидов. Систематическое внесение при посеве аммофоса обеспечивало в среднем по приемам обработки почвы и уровням защиты растений достоверное увеличение урожайности пшеницы, по отношению

Табл. 1. Эффективность применения азотно-фосфорных удобрений* под пшеницу после пара

Обработка почвы (фактор А)	Пестициды (фактор С)	Годы по условиям увлажнения / минеральные удобрения (фактор В)											
		засушливые (2012, 2019)			умеренно-увлажненные (2011, 2014-2016, 2018, 2020-2023)			хорошо увлажненные (2013, 2017)			среднее (2011-2023)		
		0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅	0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅	0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅	0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅
ГПО	0	0,87	0,13	0,06	1,91	0,18	0,10	1,77	0,32	-0,17	1,73	0,20	0,05
	Г-1	1,04	0,12	0,03	2,13	0,08	0,20	1,95	0,33	0,06	1,94	0,12	0,15
	Г-2	1,08	0,03	0,17	2,34	0,16	0,14	2,18	0,37	0,10	2,12	0,17	0,14
	ГИФ	1,27	-0,03	0,25	2,64	0,12	0,15	2,66	0,17	0,39	2,43	0,11	0,21
	среднее	1,07	0,06	0,13	2,26	0,14	0,15	2,14	0,30	0,10	2,05	0,15	0,14
МПО	0	0,84	0,09	0,01	1,98	0,18	0,10	1,94	-0,05	0,14	1,80	0,13	0,09
	Г-1	1,04	0,06	-0,13	2,09	0,21	0,13	2,14	0,19	-0,02	1,94	0,18	0,06
	Г-2	1,14	0,03	-0,11	2,32	0,11	0,17	2,51	-0,01	0,14	2,17	0,08	0,12
	ГИФ	1,26	0,34	-0,21	2,57	0,28	0,15	2,71	0,17	0,44	2,39	0,27	0,14
	среднее	1,07	0,13	-0,11	2,24	0,19	0,14	2,33	0,08	0,18	2,07	0,17	0,10
БО	0	0,53	0,09	0,26	1,13	0,19	0,27	1,37	0,04	0,13	1,08	0,15	0,25
	Г-1	0,64	0,04	0,24	1,37	0,08	0,38	1,50	0,06	0,24	1,28	0,07	0,34
	Г-2	0,83	-0,10	0,35	1,47	0,15	0,29	1,76	0,21	0,25	1,41	0,12	0,30
	ГИФ	0,72	0,20	0,23	1,59	0,13	0,42	2,07	0,16	0,54	1,53	0,14	0,41
	среднее	0,68	0,06	0,27	1,39	0,14	0,34	1,68	0,12	0,29	1,33	0,12	0,32
Среднее	0	0,75	0,10	0,11	1,67	0,18	0,16	1,69	0,10	0,03	1,53	0,16	0,13
	Г-1	0,91	0,07	0,05	1,87	0,12	0,23	1,86	0,19	0,09	1,72	0,13	0,18
	Г-2	1,02	-0,02	0,14	2,04	0,14	0,20	2,15	0,19	0,16	1,90	0,12	0,18
	ГИФ	1,08	0,17	0,09	2,27	0,18	0,24	2,48	0,17	0,46	2,12	0,17	0,25
	среднее	0,94	0,08	0,10	1,96	0,16	0,21	2,05	0,16	0,19	1,82	0,15	0,19
НСР ₀₅ для факторов, т/га		А, В=0,12; С=0,14; АВ=0,21; АС, ВС=0,24; АВС=0,41			А, В=0,08; С=0,09; АВ=0,14; АС, ВС=0,16; АВС=0,28			А, В=0,08; С=0,09; АВ=0,13; АС, ВС=0,15; АВС=0,26			А, В=0,06; С=0,07; АВ=0,11; АС, ВС=0,13; АВС=0,22		
Доля влияния факторов, %		А=42,2; В=9,5; С=32,7; АВ=8,1; АС, ВС, АВС=1,8...3,4			А=64,8; В=9,8; С=23,2; АВ=0,8; АС, ВС, АВС=0,1...1,1			А=29,5; В=8,9; С=57,0; АВ, АС, ВС, АВС=0,2...2,8			А=58,0; В=10,0; С=29,7; АВ, АС, ВС, АВС=0,2...0,9		

*здесь и в таблицах 2, 3, 4: на фоне «0» – урожайность (т/га); на фоне N_{5,8}P₂₅ – прибавка урожая к фону «0»; на фоне N_{45,8}P₂₅ – прибавка урожая к N_{5,8}P₂₅

к неудобренному варианту, на 0,15 т/га, а аммиачной селитры до посева – на 0,19 т/га, по отношению к рядковому удобрению, при окупаемости действующего вещества туков дополнительной продукцией соответственно 4,87 и 4,75 кг/кг.

Эффективность припосевного внесения аммофоса в среднем по предшественнику мало зависела от приема основной обработки почвы и уровня защиты растений и существенно (в 2,1 раза) возрастала на фоне мелкой плоскорезной обработки и комплекса пестицидов, достигая окупаемости прибавкой урожай 8,77 кг/кг. Отдача от азотных удобрений изменялась в зависимости как от приема обработки почвы, так и от уровня применения средств защиты растений. Прибавка урожая зерна пшеницы от применения аммиачной селитры в дозе N₄₀, по отношению к рядковому внесению аммофоса (N_{5,8}P₂₅), на фоне прямого посева была выше, чем в вариантах с механической обработкой почвы – в среднем 0,32 против 0,10...0,14 т/га при окупаемости действующего вещества туков дополнительной продукцией соответственно 8,00 и 2,50...3,50 кг/кг. Не зависимо от приема обработки почвы наибольшие прибавки урожая зерна от азотных удобрений достигались на фоне комплекса пестицидов. Максимальная в опыте средняя прибавка урожая от азотных удобрений, по отношению к рядковому удобрению, отмечена при прямом посева на фоне пестицидов – 0,41 т/га (24,6 %) при окупаемости азота 10,25 кг/кг.

Урожайность яровой пшеницы и ее реакция на обработку почвы, средства защиты растений и удобрения существенно изменялась в зависимости от условий увлажнения. В годы с хорошим увлажнением основной вклад в варьирование урожайности пшеницы после пара оказывали пестициды (57,0 %), меньшее – приемы обработки почвы (29,5 %) и удобрения (8,9 %), тогда как в умеренно увлажненные годы наибольшим

был вклад приемов обработки почвы (64,8 %) в сравнении с пестицидами (23,2 %) и удобрениями (9,8 %), а в засушливые годы вклад приемов обработки почвы и пестицидов был одинаково высоким (42,2 и 32,7 %) при заметном вкладе удобрений (9,5 %) и их взаимодействия с обработкой почвы (8,1 %).

В засушливые годы на пшенице после пара и рапса существенные прибавки урожая от припосевного удобрения аммофосом отмечены только на фоне применения комплекса пестицидов в сочетании с мелкими обработками или прямым посевом (соответственно 0,34 и 0,20 т/га по отношению к фону без удобрений), а от основного использования аммиачной селитры – на фоне применения гербицидов против двудольных и однодольных сорняков или полного комплекса пестицидов в сочетании с глубокой обработкой или прямым посевом (соответственно 0,17...0,25 и 0,23...0,35 т/га по отношению к фону рядкового удобрения).

В умеренно и хорошо увлажненные годы как припосевное, так и основное удобрения обеспечивали достоверное увеличение урожайности пшеницы на фоне всех приемов обработки почвы. Средние по опыту прибавки урожая от рядкового удобрения аммофосом в оба типа лет составляли по 0,16 т/га (7,8...8,2 %) по отношению к неудобренному фону при окупаемости дополнительным урожаем 5,19 кг/кг. Эффективность рядкового удобрения мало изменялась от приема обработки почвы и уровня применения средств защиты растений. Средние прибавки урожая от основного удобрения аммиачной селитрой в умеренно и хорошо увлажненные годы составляли 0,19...0,21 т/га (8,6...9,9 %) по отношению к действию аммофоса при окупаемости дополнительным урожаем 4,75...5,25 кг/кг.

Урожайность пшеницы после овса без применения удобрений и пестицидов в среднем за 2011–2023 гг. составляла 1,06 т/га (табл. 2). Ее изменение на 53,2 %

Табл. 2. Эффективность применения азотно-фосфорных удобрений под пшеницу после овса

Обработка почвы (фактор А)	Пестициды (фактор С)	Годы по условиям увлажнения / минеральные удобрения (фактор В)											
		засушливые (2012, 2019)			умеренно-увлажненные (2011, 2014-2016, 2018, 2020-2023)			хорошо увлажненные (2013, 2017)			среднее (2011–2023)		
		0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅	0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅	0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅	0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅
ГПО	0	0,39	-0,01	0,18	1,10	0,10	0,29	1,23	0,00	0,33	1,01	0,07	0,28
	Г-1	0,51	0,08	0,07	1,26	0,05	0,29	1,44	0,04	0,35	1,17	0,05	0,27
	Г-2	0,52	0,03	0,10	1,38	0,08	0,47	1,60	0,07	0,38	1,28	0,07	0,40
	ГИФ	0,56	0,10	0,13	1,49	0,09	0,51	1,84	0,24	0,37	1,40	0,11	0,43
	среднее	0,49	0,05	0,12	1,31	0,08	0,39	1,53	0,09	0,36	1,22	0,08	0,34
МПО	0	0,38	0,10	0,13	1,24	0,08	0,27	1,35	0,30	0,02	1,13	0,12	0,21
	Г-1	0,49	0,00	0,10	1,38	0,04	0,38	1,64	0,11	0,14	1,28	0,04	0,30
	Г-2	0,60	-0,07	0,22	1,43	0,06	0,43	1,94	0,01	0,32	1,38	0,03	0,38
	ГИФ	0,63	0,06	0,11	1,44	0,17	0,48	2,07	0,06	0,55	1,42	0,13	0,43
	среднее	0,52	0,02	0,14	1,37	0,09	0,39	1,75	0,12	0,26	1,30	0,08	0,33
БО	0	0,41	-0,01	0,16	1,13	0,11	0,27	1,26	0,17	0,01	1,04	0,10	0,22
	Г-1	0,39	0,03	0,21	1,27	0,17	0,28	1,47	0,12	0,02	1,17	0,14	0,23
	Г-2	0,39	0,16	0,15	1,37	0,13	0,35	1,66	0,24	-0,04	1,26	0,15	0,26
	ГИФ	0,56	0,05	0,15	1,39	0,22	0,45	1,94	0,10	0,11	1,35	0,17	0,35
	среднее	0,44	0,06	0,17	1,29	0,16	0,34	1,58	0,16	0,03	1,20	0,14	0,26
Среднее	0	0,39	0,02	0,16	1,16	0,10	0,28	1,28	0,16	0,12	1,06	0,10	0,23
	Г-1	0,46	0,03	0,13	1,30	0,09	0,32	1,52	0,09	0,17	1,21	0,08	0,27
	Г-2	0,50	0,04	0,15	1,39	0,09	0,42	1,73	0,11	0,22	1,31	0,09	0,35
	ГИФ	0,58	0,07	0,13	1,44	0,16	0,48	1,95	0,13	0,34	1,39	0,14	0,40
	среднее	0,49	0,04	0,14	1,32	0,11	0,37	1,62	0,12	0,21	1,24	0,10	0,31
НСР ₀₅ для факторов, т/га		А, В = 0,07; С = 0,08; АВ = 0,12; АС, ВС = 0,13; АВС = 0,23			А, В = 0,06; С = 0,07; АВ = 0,10; АС, ВС = 0,12; АВС = 0,20			А, В = 0,06; С = 0,07; АВ = 0,10; АС, ВС = 0,12; АВС = 0,20			А, В = 0,05; С = 0,05; АВ = 0,08; АС, ВС = 0,09; АВС = 0,16		
Доля влияния факторов, %		А = 3,6; В = 43,8; С = 42,5; АВ, АС, ВС = 0,6...3,3; АВС = 5,1			А = 1,3; В = 62,8; С = 31,4; АВ, АС, ВС, АВС = 0,3...2,9			А = 9,3; В = 17,4; С = 66,4; АВ, АС, ВС, АВС = 0,5...3,3			А = 2,5; В = 53,2; С = 40,9; АВ, АС, ВС, АВС = 0,3...2,3		

определялось влиянием удобрений и на 40,9 % – средств защиты растений. Вклад обработки почвы, парных и тройного взаимодействия факторов в дисперсию урожайности культуры был незначительным. На фоне глубокой и мелкой плоскорезных обработок урожайность пшеницы после овса была примерно такой же, как и на фоне прямого посева – 1,01...1,13 против 1,04 т/га без применения пестицидов и 1,40...1,42 против 1,35 т/га на фоне защиты от сорняков, вредителей и болезней. Систематическое применение при посеве аммофоса обеспечивало в среднем по приемам обработки почвы и уровням защиты растений достоверное увеличение выхода зерна пшеницы на 0,10 т/га по отношению к неудобренному варианту, а аммиачной селитры до посева – на 0,31 т/га по отношению к рядковому удобрению при окупаемости действующего вещества туков дополнительной продукцией соответственно 3,25 и 7,75 кг/кг.

Эффективность припосевного внесения аммофоса в среднем по предшественнику имела тенденцию роста в направлении от глубокой и мелкой обработки к прямому посеву и от фона без защиты растений к фону использования комплекса средств защиты растений.

Отдача от азотных удобрений при всех приемах обработки почвы была высокой и имела тенденцию увеличения по мере насыщения технологии средствами защиты растений. Прибавка урожая зерна пшеницы от применения аммиачной селитры в дозе N₄₀(N_{5,8}P₂₅) была более высокой на фоне глубокой и мелкой обработок в сравнении с прямым посевом – в среднем 0,34 и 0,33 против 0,26 т/га при окупаемости действующего вещества туков дополнительной продукцией соответственно 8,50, 8,25 и 6,50 кг/кг.

При всех приемах обработки почвы наибольшие прибавки урожая зерна от азотных удобрений достигались на фоне применения комплекса средств защиты растений. Максимальная в опыте средняя прибавка урожая от азотных удобрений по отношению к рядко-

вому удобрению отмечена при глубокой и мелкой обработках на фоне комплекса пестицидов – по 0,43 т/га (27,7...28,5 %) при окупаемости азота дополнительной продукцией 10,75 кг/кг.

Урожайность яровой пшеницы и ее отклик на обработки почвы, средства защиты растений и удобрения существенно изменялись в зависимости от условий увлажнения. В годы с хорошим увлажнением основной вклад в варьирование урожайности пшеницы после овса оказывали пестициды (66,4 %) и значительно меньшее – приемы обработки почвы (9,3 %) и удобрения (17,4 %), тогда как в умеренно увлажненные годы наибольшим был вклад удобрений (62,8 %), менее значительным – пестицидов (31,4 %) при отсутствии вклада обработки почвы (1,3 %), а в засушливые годы вклад удобрений и пестицидов был одинаково высоким (43,8 и 42,5 %) при очень слабом вкладе приемов обработки почвы (3,6 %) и тройного взаимодействия факторов (5,1 %).

В засушливые годы на пшенице после овса существенные прибавки урожая от припосевного удобрения аммофосом отмечены только на фоне применения дикотицидов и граминицидов в сочетании с прямым посевом (0,16 т/га к фону без удобрений), а эффективность основного удобрения аммиачной селитрой проявлялась на фоне всех приемов обработки почвы и уровней защиты растений (0,07...0,22 т/га к фону рядкового удобрения).

В умеренно и хорошо увлажненные годы как припосевное, так и основное удобрения обеспечивали достоверное увеличение урожайности пшеницы по всем приемам обработки почвы. Средние по опыту прибавки урожая от рядкового удобрения аммофосом в оба типа лет составляли 0,11...0,12 т/га (7,4...8,3 %) по отношению к неудобренному фону при окупаемости удобрения дополнительной урожайем 3,57...3,90 кг/кг. Эффективность рядкового удобрения возрастала в направлении от механических обработок к прямому посеву, а также по мере насыщения

технологии средствами защиты растений. Средние прибавки урожая от основного удобрения аммиачной селитрой в умеренно и хорошо увлажненные годы составляли 0,37 и 0,21 т/га (25,9 и 12,1 %) по отношению к действию аммофоса при окупаемости дополнительным урожаем 9,25 и 5,25 кг/кг. Максимальная в опыте отдача от азотных удобрений на пшенице после овса в умеренно увлажненные годы достигалась при всех обработках почвы на фоне комплекса пестицидов – 0,45...0,51 т/га (28,0...32,3 %) при окупаемости дополнительным урожаем 11,25...12,75 кг/кг, а в хорошо увлажненные годы – на фоне комплекса пестицидов и мелкой обработки почвы – 0,55 т/га (25,8 %) по отношению к действию аммофоса при окупаемости дополнительным урожаем 13,75 кг/кг.

Урожайность пшеницы после гороха в среднем за 2011–2023 гг. без применения удобрений и средств защиты растений составляла 1,27 т/га (табл. 3). Ее изменение на 48,8 % определялось влиянием пестицидов, на 26,9 % – приемов обработки почвы и на 21,1 % – удобрений. На фоне механических обработок почвы урожайность пшеницы после гороха была достоверно выше, чем на фоне прямого посева – 1,32...1,39 против 1,11 т/га без применения пестицидов и 1,78...1,80 против 1,47 т/га на фоне защиты от сорняков, вредителей и болезней. Систематическое применение при посеве аммофоса обеспечивало в среднем по приемам обработки почвы и уровням защиты растений достоверное увеличение выхода зерна пшеницы на 0,11 т/га по отношению к неусудобному варианту, а аммиачной селитры до посева – на 0,18 т/га по отношению к рядковому удобрению при окупаемости действующего вещества туков дополнительной продукцией соответственно 3,57 и 4,50 кг/кг. Эффективность аммофоса мало изменялась от обработки почвы, но существенно возрастала по мере насыщения технологии средствами защиты растений.

Отдача от азотных удобрений при всех приемах обработки почвы была относительно высокой и имела тенденцию увеличения по мере насыщения техноло-

гии средствами защиты растений, особенно на фоне прямого посева. Прибавка урожая зерна пшеницы от применения аммиачной селитры в дозе N⁴⁰ по отношению к рядковому внесению аммофоса (N^{5,8}P²⁵) была наиболее высокой на фоне прямого посева – в среднем 0,23 против 0,17 и 0,13 т/га на фоне глубокой и мелкой плоскорезных обработок при окупаемости действующего вещества туков дополнительной продукцией соответственно 5,75, 4,25 и 3,25 кг/кг. При всех приемах обработки почвы наибольшие прибавки урожая зерна от азотных удобрений достигались на фоне комплекса пестицидов. Максимальная по предшественнику средняя прибавка урожая от азотных удобрений по отношению к рядковому удобрению отмечена при прямом посеве на фоне дикотицидов, граминицидов, инсектицидов и фунгицидов – 0,32 т/га (20,9 %) при окупаемости азота дополнительной продукцией 8,00 кг/кг.

Урожайность яровой пшеницы и ее отклик на обработку почвы, пестициды и удобрения существенно изменялись в зависимости от условий увлажнения. В годы с хорошим увлажнением основной вклад в варьирование урожайности пшеницы после гороха оказывали пестициды (63,4 %), меньшее – приемы обработки почвы (15,1 %) и удобрения (18,2 %), тогда как в умеренно увлажненные годы вклад всех факторов был относительно одинаковым (средств защиты растений – 41,2 %, приемов обработки – 31,3 %, удобрений – 22,8 %), а в засушливые вклад приемов обработки почвы и пестицидов был одинаково высоким (30,4 и 48,6 %) при заметном вкладе удобрений (7,6 %) и их взаимодействия с обработкой почвы (5,7 %).

В засушливые годы на пшенице после гороха существенные прибавки урожая от припосевного удобрения аммофосом отмечены только на фоне применения дикотицидов и граминицидов в сочетании с глубокой обработкой почвы (0,24 т/га по отношению к фону без удобрений), тогда как эффективность основного удобрения аммиачной селитрой на фоне всех приемов обработки почвы и уровней защиты растений прояв-

Табл. 3. Эффективность применения азотно-фосфорных удобрений под пшеницу после гороха

Обработка почвы (фактор А)	Пестициды (фактор С)	Годы по условиям увлажнения / минеральные удобрения (фактор В)											
		засушливые (2012, 2019)			умеренно-увлажненные (2011, 2014–2016, 2018, 2020–2023)			хорошо увлажненные (2013, 2017)			среднее (2011–2023)		
		0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅	0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅	0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅	0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅
ГПО	0	0,56	0,19	0,06	1,54	-0,04	0,17	1,52	0,05	0,15	1,39	0,01	0,15
	Г-1	0,73	0,09	0,07	1,66	-0,06	0,29	1,71	0,11	0,19	1,52	-0,01	0,24
	Г-2	0,83	0,24	-0,06	1,81	0,07	0,18	1,95	0,20	0,11	1,68	0,12	0,13
	ГИФ	0,96	0,17	0,01	1,92	0,12	0,18	2,07	0,32	0,17	1,80	0,16	0,15
	среднее	0,77	0,17	0,02	1,73	0,02	0,20	1,81	0,17	0,15	1,60	0,07	0,17
МПО	0	0,52	0,15	-0,03	1,45	0,14	0,14	1,56	0,08	0,25	1,32	0,13	0,13
	Г-1	0,66	0,09	-0,06	1,62	0,14	0,15	1,71	0,23	0,17	1,48	0,14	0,12
	Г-2	0,72	0,00	0,03	1,76	0,19	0,11	1,82	0,36	0,17	1,61	0,19	0,11
	ГИФ	0,77	0,06	0,14	1,91	0,22	0,18	2,21	0,30	0,13	1,78	0,21	0,16
	среднее	0,67	0,08	0,02	1,68	0,17	0,14	1,82	0,24	0,18	1,55	0,17	0,13
БО	0	0,57	-0,02	0,07	1,18	0,13	0,15	1,30	0,20	-0,04	1,11	0,12	0,11
	Г-1	0,72	-0,14	0,06	1,31	0,11	0,32	1,53	0,10	0,18	1,25	0,07	0,26
	Г-2	0,69	-0,04	0,08	1,43	0,07	0,29	1,62	0,21	0,11	1,35	0,08	0,23
	ГИФ	0,82	0,03	0,08	1,52	0,05	0,39	1,89	0,18	0,24	1,47	0,06	0,32
	среднее	0,70	-0,04	0,07	1,36	0,09	0,29	1,59	0,17	0,12	1,29	0,08	0,23
Среднее	0	0,55	0,11	0,04	1,39	0,07	0,15	1,46	0,11	0,12	1,27	0,08	0,13
	Г-1	0,70	0,01	0,02	1,53	0,06	0,25	1,65	0,15	0,18	1,42	0,07	0,21
	Г-2	0,75	0,07	0,02	1,66	0,11	0,19	1,80	0,26	0,13	1,54	0,13	0,16
	ГИФ	0,85	0,09	0,07	1,78	0,13	0,25	2,05	0,26	0,18	1,68	0,14	0,21
	среднее	0,71	0,07	0,04	1,59	0,09	0,21	1,74	0,19	0,15	1,48	0,11	0,18
НСР ₀₅ для факторов, т/га	А, В = 0,07; С = 0,08; АВ = 0,11; АС, ВС = 0,13; АВС = 0,23			А, В = 0,06; С = 0,07; АВ = 0,11; АС, ВС = 0,12; АВС = 0,22			А, В = 0,06; С = 0,07; АВ = 0,11; АС, ВС = 0,13; АВС = 0,22			А, В = 0,05; С = 0,06; АВ = 0,08; АС, ВС = 0,10; АВС = 0,16			
Доля влияния факторов, %	А = 30,4; В = 7,6; С = 48,6; АВ = 5,7; АС, ВС, АВС = 1,8...3,5			А = 31,3; В = 22,8; С = 41,2; АВ, АС, ВС, АВС = 0,7...1,7			А = 15,1; В = 18,2; С = 63,4; АВ, АС, ВС, АВС = 0,5...1,2			А = 26,9; В = 21,1; С = 48,8; АВ, АС, ВС, АВС = 0,5...1,1			

Табл. 4. Эффективность применения азотно-фосфорных удобрений под пшеницу при бесменном возделывании

Обработка почвы (фактор А)	Пестициды (фактор С)	Годы по условиям увлажнения / минеральные удобрения (фактор В)											
		засушливые (2012, 2019)			умеренно-увлажненные (2011, 2014-2016, 2018, 2020-2023)			хорошо увлажненные (2013, 2017)			среднее (2011–2023)		
		0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅	0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅	0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅	0	N _{5,8} P ₂₅	N _{45,8} P ₂₅
ГПО	0	0,37	0,00	0,04	0,83	0,07	0,24	1,19	0,09	0,10	0,82	0,06	0,19
	Г-1	0,44	0,02	0,06	0,92	0,09	0,31	1,26	0,06	0,33	0,90	0,08	0,27
	Г-2	0,42	0,08	0,10	1,03	0,07	0,45	1,45	0,07	0,29	1,00	0,07	0,37
	ГИФ	0,53	0,06	0,14	1,19	0,09	0,40	1,56	0,37	0,02	1,15	0,13	0,30
	среднее	0,44	0,04	0,09	1,00	0,08	0,35	1,37	0,15	0,18	0,97	0,08	0,28
МПО	0	0,36	-0,03	0,10	0,82	0,08	0,18	1,17	0,17	-0,04	0,80	0,08	0,13
	Г-1	0,38	0,03	0,04	0,99	0,11	0,18	1,38	0,08	0,18	0,95	0,10	0,16
	Г-2	0,47	-0,05	0,09	1,11	0,10	0,30	1,48	0,07	0,25	1,07	0,07	0,26
	ГИФ	0,47	0,08	0,07	1,19	0,09	0,28	1,61	0,11	0,40	1,14	0,09	0,27
	среднее	0,42	0,01	0,08	1,03	0,10	0,24	1,41	0,11	0,20	0,99	0,08	0,21
БО	0	0,31	0,08	0,02	0,87	0,06	0,08	1,04	0,10	0,16	0,81	0,07	0,08
	Г-1	0,42	0,00	0,14	1,01	0,07	0,17	1,13	0,12	0,16	0,94	0,06	0,16
	Г-2	0,47	0,01	0,13	1,06	0,07	0,29	1,24	0,07	0,24	1,00	0,06	0,26
	ГИФ	0,52	0,04	0,06	1,13	0,15	0,26	1,37	0,12	0,18	1,07	0,13	0,21
	среднее	0,43	0,03	0,09	1,02	0,09	0,20	1,19	0,10	0,19	0,96	0,08	0,18
Среднее	0	0,35	0,02	0,06	0,84	0,07	0,16	1,13	0,12	0,07	0,81	0,07	0,13
	Г-1	0,41	0,01	0,08	0,98	0,09	0,22	1,25	0,09	0,22	0,93	0,08	0,20
	Г-2	0,45	0,01	0,10	1,07	0,08	0,35	1,39	0,07	0,26	1,02	0,07	0,30
	ГИФ	0,51	0,06	0,09	1,17	0,11	0,31	1,52	0,20	0,20	1,12	0,12	0,26
	среднее	0,43	0,03	0,08	1,01	0,09	0,26	1,32	0,12	0,19	0,97	0,08	0,22
НСР ₀₅ для факторов, т/га		А, В = 0,04; С = 0,04; АВ = 0,06; АС, ВС = 0,07; АВС = 0,12			А, В = 0,05; С = 0,06; АВ = 0,09; АС, ВС = 0,11; АВС = 0,18			А, В = 0,11; С = 0,12; АВ = 0,18; АС, ВС = 0,21; АВС = 0,37			А, В = 0,04; С = 0,05; АВ = 0,07; АС, ВС = 0,08; АВС = 0,14		
Доля влияния факторов, %		А = 3,9; В = 25,2; С = 61,4; АВ, АС, ВС = 0,7...2,0; АВС = 4,8			А = 0,2; В = 46,4; С = 47,5; АВ, АС, ВС, АВС = 0,3...2,9			А = 16,1; В = 25,7; С = 50,7; АВ, АС, ВС, АВС = 0,1...3,0			А = 1,3; В = 42,5; С = 51,5; АВ, АС, ВС, АВС = 0,2...2,7		

лялась слабо (-0,06...0,14 т/га по отношению к фону рядкового удобрения).

В умеренно и хорошо увлажненные годы как припосевное, так и основное удобрения обеспечивали достоверное увеличение урожайности пшеницы после гороха по всем приемам обработки почвы. Средние прибавки урожая от рядкового удобрения аммофосом в оба типа лет составляли 0,09...0,19 т/га (5,7...10,9 %) по отношению к неудобренному фону при окупаемости дополнительным урожаем 2,92...6,17 кг/кг. Эффективность рядкового удобрения возрастала в направлении от глубокой и мелкой плоскорезных обработок к прямому посеву, а также по мере насыщения технологии средствами защиты растений. Средние прибавки урожая от основного удобрения аммиачной селитрой в умеренно и хорошо увлажненные годы составляли 0,21...0,37 т/га (12,1...25,9 %) по отношению к действию аммофоса при окупаемости дополнительным урожаем 5,25...9,25 кг/кг. Максимальная в опыте отдача от азотных удобрений на пшенице после гороха в умеренно увлажненные годы достигалась при прямом посеве на фоне комплекса пестицидов - 0,39 т/га (24,8 %) при окупаемости дополнительным урожаем 9,75 кг/кг.

Средняя за 2011–2023 гг. урожайность пшеницы при бесменном возделывании без применения удобрений и пестицидов составляла 0,81 т/га (табл. 4). Ее изменение на 51,5 % определялось влиянием средств защиты растений и на 42,5 % – удобрений. Вклад приемов обработки почвы, и взаимодействия факторов в дисперсию урожайности культуры был незначительным. На экстенсивном фоне урожайность бесменно возделываемой пшеницы по обработкам почвы была одинаковой - 0,80...0,82 т/га, а на фоне применения комплекса пестицидов отмечена тенденция к преимуществу механических обработок почвы перед прямым посевом - 1,14...1,15 т/га.

Систематическое применение при посеве аммофоса обеспечивало в среднем по приемам обработки почвы и уровням защиты растений достоверное

увеличение выхода зерна бесменно возделываемой пшеницы на 0,08 т/га по отношению к неудобренному фону, а аммиачной селитры до посева - на 0,22 т/га по отношению к рядковому удобрению при окупаемости действующего вещества туков дополнительной продукцией соответственно 2,60 и 5,50 кг/кг.

Эффективность припосевного удобрения аммофосом в среднем по предшественнику мало изменялась в зависимости от обработки почвы, но существенно возрастала в направлении от фона без защиты растений к фону комплекса пестицидов.

Отдача от азотных удобрений на бесменной пшенице в зависимости от приема обработки почвы имела тенденцию снижения в направлении от глубокой к мелкой плоскорезной и прямому посеву, а в зависимости от пестицидов - увеличивалась по мере насыщения технологии средствами защиты растений, особенно на фоне прямого посева. Прибавка урожая зерна пшеницы от применения аммиачной селитры в дозе N₄₀ по отношению к рядковому внесению аммофоса (N_{5,8}P₂₅) была наиболее высокой на фоне глубокой обработки почвы - в среднем 0,28 против 0,21 и 0,18 т/га на фоне мелкой обработки и прямого посева при окупаемости действующего вещества туков дополнительной продукцией соответственно 7,00, 5,25 и 4,50 кг/кг. При всех приемах обработки почвы более высокая эффективность азотных удобрений в посевах бесменной пшеницы достигалась на фоне применения гербицидов против двудольных и однодольных сорняков. Максимальная по предшественнику средняя прибавка урожая от азотных удобрений по отношению к рядковому удобрению отмечена при глубокой обработке почвы на фоне дикотицидов и граминицидов - 0,37 т/га (34,6 %) при окупаемости азота дополнительной продукцией 9,25 кг/кг.

Урожайность яровой пшеницы при бесменном возделывании и ее отклик на обработку почвы, средства защиты растений и удобрения существенно изменялись в зависимости от условий увлажнения.

В годы с хорошим увлажнением основной вклад в варьирование урожайности бессменной пшеницы оказывали пестициды (50,7 %), меньшее – удобрения (25,7 %) и приемы обработки почвы (16,1 %), тогда как в умеренно увлажненные годы вклад средств защиты растений и удобрений в варьирование урожайности был практически одинаковым (соответственно 47,5 и 46,4 %), а в засушливые годы наиболее значительным был вклад пестицидов (61,4 %), меньше – удобрений (25,2 %) при слабом влиянии приемов обработки почвы (3,9 %) и тройного сочетания факторов (4,8 %).

В засушливые годы в посевах бессменной пшеницы существенных прибавок урожая от припосевого удобрения аммофосом, по отношению к фону без удобрений, не отмечено, а эффективность основного удобрения аммиачной селитрой по всем приемам обработки почвы проявлялась только на фоне борьбы с двудольными и однодольными сорняками, или со всем комплексом вредных организмов. Прибавки урожая при этом не превышали 0,10...0,14 т/га по отношению к фону рядкового удобрения, а окупаемость действующего вещества – 2,50...3,50 кг/кг.

В умеренно и хорошо увлажненные годы припосевное азотно-фосфорное удобрение обеспечивало достоверное и примерно одинаковое увеличение урожайности бессменной пшеницы по всем приемам обработки почвы. Средние по предшественнику прибавки урожая от рядкового удобрения аммофосом в оба типа лет составляли 0,09...0,12 т/га (8,9...9,1 %) по отношению к неубоженному фону при окупаемости дополнительным урожаем 2,92...3,90 кг/кг. Эффективность рядкового удобрения возрастала по мере насыщения технологии средствами защиты растений. Средние прибавки урожая от основного удобрения аммиачной селитрой в умеренно и хорошо увлажненные годы составляли 0,19...0,26 т/га (13,2...23,6 %) по отношению к действию аммофоса при окупаемости дополнительным урожаем 4,75...6,50 кг/кг. Максимальная в опыте отдача от азотных удобрений на бессменной пшенице в умеренно увлажненные годы достигалась при глубоких плоскорезных обработках почвы на фоне гербицидов против двудольных и однодольных сорняков – 0,45 т/га (40,9 %) при окупаемости азота дополнительным урожаем 11,25 кг/кг, а в хорошо увлажненные годы – на фоне мелкой плоскорезной обработки и комплекса пестицидов – 0,40 т/га (23,3 %) по отношению к действию аммофоса при окупаемости дополнительным урожаем 10,0 кг/кг.

Как свидетельствуют полученные результаты, урожайность яровой мягкой пшеницы в значительной степени определяется агрометеорологическими условиями года, средообразующей ролью предшественника и применением средств интенсификации. Если принять урожайность культуры в благоприятные по увлажнению годы за 100 %, то в умеренно увлажненные годы ее величина после пара снижается лишь на 1,5 %, а в засушливые – на 55,6 %, после гороха – на 4,8 и 62,3 %, после овса и при бессменном возделывании пшеницы – на 9,4...25,7 и 69,0...69,5 % соответственно. На фоне основного и припосевого удобрения, а также использования комплекса пестицидов, снижение урожайности пшеницы по отношению к уровню хорошо увлажненных лет составляло после пара в умеренно увлажненные годы на 13,5 %, в засушливые – на 56,9 %, после гороха – на 13,3 и 59,4 %, после овса и при бессменном возделывании культуры – на 14,0...17,2 и 65,6...67,8 % соответственно. Эти данные подтверждаются результатами корреляцион-

ного анализа, согласно которому зависимость урожайности пшеницы от природных ресурсов усиливалась по мере ужесточения фона возделывания культуры. Если после парового предшественника величина коэффициента корреляции между средней урожайностью культуры и $K_{увл}$ за июнь составляла $r=0,628$, то после гороха – $r=0,705$, после овса – $r=0,870$, а при бессменном возделывании культуры – $r=0,918$.

Выводы. Урожайность пшеницы без применения удобрений и пестицидов в среднем по обработкам почвы снижалась в направлении от пара (1,53 т/га) к гороху (1,27 т/га), овсу (1,06 т/га) и бессменным посевам (0,81 т/га). Зависимость (r) урожайности пшеницы от условий увлажнения за май–июнь возрастала соответственно предшественникам с 0,628 до 0,705, 0,870 и 0,918. Вклад фактора обработки почвы в урожайности пшеницы снижался от парового предшественника (58,0 %) к гороху (26,9 %), овсу (2,5 %) и бессменному посеву (1,3 %), а удобрений и пестицидов – возрастал соответственно с 10,0 до 21,1, 53,2 и 42,5 % и с 29,7 до 48,8, 40,9 и 51,5 %. Прибавки урожая зерна пшеницы от рядкового удобрения аммофосом снижались от парового предшественника (0,15 т/га) к гороху (0,11 т/га), овсу (0,10 т/га) и бессменному посеву (0,08 т/га), а от основного удобрения аммиачной селитрой, напротив, увеличивались с 0,19 и 0,18 до 0,31 и 0,22 т/га. При умеренном и хорошем увлажнении эффективность удобрений увеличивалась с повышением уровня насыщенности технологии возделывания пшеницы средствами защиты растений в 1,5...2,0 раза. Полученные экспериментальные данные могут служить основой для совершенствования технологий возделывания яровой пшеницы применительно к различным предшественникам, системам основной обработки почвы, уровням использования средств интенсификации и агрометеорологическим условиям, а также могут представлять интерес в качестве нормативной базы при оценке эффективности минеральных удобрений и пестицидов в изменяющихся условиях среды.

Литература.

1. Кирюшин В. И. Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земледелия // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1130–1139. doi: 10.1134/s0032180x19070062.
2. Гамзиков Г. П. Точное земледелие в Сибири: реальности, проблемы и перспективы // Земледелие. 2022. № 1. С. 3–9. doi: 10.24412/0044-3913-2022-1-3-9.
3. Шпедт А. А., Едимешев Ю. Ф., Трубников Ю. Н. Агроэкологические аспекты проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия в условиях Средней Сибири // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 5. С. 5–10.
4. Обоснование направления интенсификации производства зерна в севооборотах лесостепи Центрального Черноземья / А. С. Акименко, В. И. Свиридов, Т. А. Дудкина и др. // Земледелие. 2023. № 1. С. 3–7. doi: 10.24412/0044-3913-2023-1-3-7.
5. Агротехнические приемы повышения продуктивности пашни в Приенисейской Сибири / А. А. Шпедт, В. Н. Романов, Ю. Н. Трубников и др. // Вестник КрасГАУ. 2022. № 7. С. 11–19.
6. Билтуев А. С., Будажапов Л. В., Уланов А. К. Эффективность применения удобрений под культуры зернопарового севооборота в сухостепной зоне

- Западного Забайкалья // *Земледелие*. 2022. № 7. С. 32–36. doi: 10.24412/0044-3913-2022-7-32-36.
7. Изменение погодных условий на Среднем Урале и их воздействие на урожайность яровой пшеницы / П. А. Постников, В. В. Попова, П. Ю. Овчинников и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2023. Т. 37. № 3. С. 4–9. doi: 10.53859/02352451_2023_37_3_4.
 8. Абрамов Н. В., Семизоров С. А., Гунгер М. В. Эффективность припосевного внесения карбамидно-аммиачной смеси в условиях Северного Зауралья // *Земледелие*. 2023. № 4. С. 18–22. doi: 10.24412/0044-3913-2023-4-18-22.
 9. Развитие системы обработки почвы на Ставрополье / О. И. Власова, А. Н. Есаулко, О. Г. Шабалда и др. // *Земледелие*. 2022. № 8. С. 26–30. doi: 10.24412/0044-3913-2022-8-26-30.
 10. Минимизация основной обработки почвы в условиях Курской области / Е. В. Дубовик, Д. В. Дубовик, А. Н. Морозов и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 8. С. 49–54. doi: 10.53859/02352451_2022_36_8_49.
 11. Эффективность ресурсосберегающих приемов возделывания озимой пшеницы в условиях ЦЧР / И. И. Гуреев, А. В. Гостев, Л. Б. Нитченко и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 6. С. 55–60. doi: 10.53859/02352451_2022_36_6_55.
 12. Оперативное и долгосрочное прогнозирование продуктивности посевов на основе массовых расчетов имитационной модели агроэкосистемы в геоинформационной среде (обзор) / В. П. Якушев, В. В. Якушев, В. Л. Баденко и др. *Сельскохозяйственная биология*. 2020. Т. 55. № 3. С. 451–467. doi: 10.15389/agrobiology.2020.3.451rus.
 13. Доспехов Б. А. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)*. М.: Агропромиздат, 1985. 352 с.

Поступила в редакцию 25.09.2023

После доработки 15.10.2023

Принята к публикации 07.11.2023

Зоотехния и ветеринария

УДК 636.082.2:636.2

DOI: 10.31857/S250026272306011X, EDN: NIHEMH

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНДЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЖИВОЙ МАССЫ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА КАЗАХСКОЙ БЕЛОГОЛОВОЙ И ГЕРЕФОРДСКОЙ ПОРОДЫ*

А. Т. Бисембаев¹, кандидат сельскохозяйственных наук, **Х. А. Амерханов²**, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук, **Ю. А. Юлдашбаев²**, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук, **Ж. М. Касенов¹**, **С. Т. Жали¹**, **А. Е. Чиндалиев¹**, **Д. А. Баймуканов¹**, член-корреспондент НАН Республики Казахстан, доктор сельскохозяйственных наук, **В. А. Демин²**, доктор сельскохозяйственных наук

¹Научно-производственный центр животноводства и ветеринарии,
010000 (Z10P6B8), Астана, ул. Кенесары, 40, оф. 1419
E-mail: dbaimukanov@mail.ru

²Российский государственный университет –
Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева,
127434, Москва, ул. Тимирязевская, 49

Исследования выполняли с целью изучения динамики живой массы молодняка крупного рогатого скота казахской белоголовой и герефордской породы и индексной оценки их живой массы для дальнейшего формирования племенного поголовья. Индексную оценку живой массы (при рождении, отъеме и в возрасте 12 мес.) осуществляли методом наилучшего линейного несмещенного прогноза (BLUP) для формирования племенного стада в базовых хозяйствах. Отработывали методику расчета индексной оценки статистическим методом с построением генетической модели животного и рассчитывали прогнозируемые индексы племенной ценности по 3 продуктивным показателям: живая масса при рождении, при отъеме, в 12 мес. возрасте. Всего проанализировано поголовье 9503 хозяйств по разведению крупного рогатого скота казахской белоголовой породы и 2766 хозяйств по разведению герефордской породы крупного рогатого скота. Точность оценки индекса племенной ценности методом BLUP AM (Animal Model) у бычков казахской белоголовой породы при рождении была равна 0,509...0,557, у телок – 0,534–0,573; при отъеме – соответственно 0,274...0,319 и 0,354...0,368; в 12 месяцев – 0,336...0,418 и 0,388...0,415. Точность оценки индекса племенной ценности методом BLUP AM у бычков герефордской породы при рождении составляет 0,531...0,810, у телок – 0,511...0,565; при отъеме – соответственно 0,330...0,608 и 0,257...0,366; в 12 месяцев – 0,386...0,498 и 0,342...0,414. Использование метода BLUP AM позволяет повысить точность оценки крупного рогатого скота казахской белоголовой и герефордской породы по живой массе при рождении, отъеме и в годовалом возрасте.

CARRYING OUT AN INDEX ASSESSMENT OF THE LIVE WEIGHT OF CATTLE OF THE KAZAKH WHITE-HEADED AND HEREFORD BREED*

A. T. Bissembayev¹, **Kh. A. Amerkhanov²**, **Yu. A. Yuldashbayev²**, **J. M. Kasenov¹**, **S. T. Zhali¹**, **A. E. Chindaliev¹**, **D. A. Baimukanov¹**, **V. A. Demin²**

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

²Russian State University – Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev,
127434, Moskva, ul. Timiryazevskaya, 49

The research was carried out to study the dynamics of the live weight of young cattle of the Kazakh white-headed and Hereford breeds (at birth, at weaning, at 12 months, adjusted for 210 and 365 days). An index assessment of live weight (at birth, weaning and at 12 months) was carried out for the formation of a breeding herd in basic farms. The index evaluation of the genetic breeding value by breeding characteristics was carried out using the best linear unbiased prediction (BLUP) method. The method of calculating the index score by statistical method with the construction of a genetic model of the animal has been worked out and the predicted indices of breeding value for 3 productive indicators have been calculated: live weight at birth, at weaning, at 12 months of age. In total, 9,503 farms for breeding Kazakh white-headed cattle and 2,766 farms for breeding Hereford cattle were analyzed. The accuracy of the evaluation of the breeding value index by the BLUP AM method is in cattle of the Kazakh white-headed breed: at birth 0.509–0.557 in bulls and 0.534–0.573 in heifers; at weaning 0.274–0.319 in bulls, 0.354–0.368 heifers; at 12 months 0.336–0.418 and 0.388–0.415, respectively. The accuracy of the evaluation of the breeding value index by the BLUP AM method is in Hereford cattle: at birth 0.531–0.810 in bulls and 0.511–0.565 in heifers; at weaning 0.330–0.608 in bulls, 0.257–0.366 heifers; at 12 months 0.386–0.498 and 0.342–0.414, respectively. The index estimation by the BLUP AM method makes it possible to increase the accuracy of the estimation of cattle of the Kazakh white-headed and Hereford breeds by live weight at birth, at weaning and one-year-old age.

Ключевые слова: мясной скот, казахская белоголовая, герефордская порода, индексная оценка, живая масса, BLUP, бычки, телочки.

Key words: beef cattle, Kazakh white-headed, hereford breed, index estimation, live weight, BLUP, bulls, heifers, meat breeds.

*исследования проведены согласно приоритетному специализированному направлению программно-целевого финансирования по научным, научно-техническим программам Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан ИПН BR10764981 «Разработка технологий эффективного управления селекционным процессом сохранения и совершенствования генетических ресурсов в мясном скотоводстве» («Развитие животноводства на основе интенсивных технологий»)

Генетические изменения, которых можно достичь путем селекции почти полностью определяются характеристиками отобранных быков-производителей, а также возможностями для их интенсивного отбора [1, 2]. Племенная ценность скота – одно из звеньев реализации на практике селекционной программы с целью направленного формирования у животных намеченных наследственных признаков и отбора желательных особей [3, 4, 5].

Для селекционно-племенной работы необходимо отбирать быков-производителей, сочетающих высокую продуктивность с другими генетическими параметрами [6]. Отбор по продуктивности предков и потомства быков играет положительную роль в постепенном наследственном закреплении, то есть консолидации этого признака [7].

В странах с развитым животноводством (США, Канада, Германия, Франция и др.) для прогноза генетических особенностей индивидуумов (в первую очередь, быков-производителей) применяют статистические подходы и методы, к числу которых относится оценка генетической племенной ценности животного по смешанной биометрической модели (AM/MME – Animal Model / Mixed Model Equation) методом наилучшего линейного несмещенного прогноза (BLUP).

Все включенные в модель факторы оцениваются одновременно, что позволяет сравнивать оценки животных разных поколений, даже если в популяции имел место генетический тренд. На базе этого математического метода реализованы такие популярные индексные оценки, как EPD, EBV и др. [8, 9].

Увеличение поголовья племенного мясного скота требует его генетического совершенствования и создания крупных животных, способных длительное время сохранять высокую интенсивность роста, давать тяжеловесные туши с оптимальным жиротложением, обладать хорошими воспроизводительными качествами и высокой молочностью.

Основой создания высокопродуктивных стад должно стать использование быков-производителей с наиболее выраженными мясными качествами и стойко передающих эти ценные качества потомству. Племенная ценность быка-производителя должна характеризоваться двухэтапной оценкой: по собственной продуктивности и по качеству потомства. В связи с этим усовершенствование и применение современных методик оценки быков с учетом увеличения доли высокопродуктивного мясного скота в Казахстане остается актуальной проблемой.

Цель исследований – изучить динамику живой массы молодняка крупного рогатого скота казахской белоголовой и герефордской пород, а также провести индексную оценку их живой массы для определения целесообразности этого метода при формировании племенного поголовья.

Методика. Индексную оценку генетической племенной ценности крупного рогатого скота мясных пород по селекционным признакам осуществляли методом наилучшего линейного несмещенного прогноза (BLUP), преимущество которого заключается в определении ли-

Табл. 1. Поправочные величины для показателей живых масс теленка с учетом возраста матери

Возраст матери	Поправка для живой массы при рождении, кг	Поправка для живой массы при отъеме, кг	
		бычок	телка
2 года	+3,1	+33	+27
3 года	+1,3	+17	+14
4 года	+0,4	+7	+4,5
5 до 10 лет	0	0	0
11 лет и старше	+0,9	+12	+11

нейной прогнозной биометрической модели животного AM (Animal Model), учитывающей степень влияния множества постоянных, периодических и случайных факторов и эффектов на проявление хозяйственно-полезных и продуктивных признаков (окружающая среда, сезонность, условия содержания и кормления, аддитивные генетические эффекты, селекционная группа, другие случайные регистрируемые и неучтенные факторы) [10, 11].

Исследования проводили на основании данных о продуктивности и зоотехнических событиях в стадах племенного крупного рогатого скота герефордской и казахской белоголовой пород племенных хозяйств, зарегистрированных в базе данных информационной аналитической системы Республики Казахстан (БД ИАС). Исходные показатели продуктивности крупного рогатого скота мясных пород для оценки методом BLUP: живая масса при рождении, живая масса при отъеме, живая масса в годовалом возрасте. Учитывали такие эффекты влияния, как различия в содержании особей по хозяйствам и фермам; годы и сезон отела; половозрастная группа телят; возраст матери; тип рождения (одинец, двойня); аддитивные генетические эффекты, обусловленные родительскими качествами в поколениях, взятых до трех предков и др. Общий вид уравнения линейной биометрической модели животного (Animal Model) выглядел следующим образом:

$$y_{ijklm} = \mu + a_i + s_j + d_k + h_l + p_m + e_{ijklm}, \quad (1)$$

где y_{ijklm} – продуктивные признаки (в нашем случае живая масса при рождении, отъеме и в 12-и месячном возрасте); μ – общее среднее по всем животным; a_i – аддитивный генетический эффект оцениваемого теленка в соответствии родословной; s_j – пол животного, поскольку бычки и телки различаются по массе; d_k – год-сезон рождения животного; h_l – стадо или хозяйство; p_m – селекционные группы с одинаковыми условиями содержания, кормления; e_{ijklm} – ошибка модели из-за влияния неучтенных факторов.

Индексы в уравнении определяют группы с одинаковыми эффектами влияния на продуктивность оцениваемых животных. Показатели исходной живой массы при рождении и отъеме подвергали корректировке в соответствии с возрастом матери, который влияет на эти их величины (табл. 1). Кроме того, живая масса при отъеме была приведена к 210- и 365-дневному возрасту. Корректировку исходных данных осуществляли по следующим формулам:

Табл. 2. Динамика средней живой массы бычков и телок по исследованному массиву крупного рогатого скота

Порода, половозрастная группа	при рождении, кг		Живая масса при отъеме на 210 дней, кг		Живая масса на 365 дней, кг	
	n	M ± m	n	M ± m	n	M ± m
Казахская белоголова						
Бычки	158 873	27,70 ± 0,01	122 428	206,30 ± 0,06	86 727	315,30 ± 0,08
Телки	346 172	25,80 ± 0,01	300 504	192,40 ± 0,03	234 087	281,70 ± 0,03
Герефордская						
Бычки	24 859	28,90 ± 0,03	17 807	215,10 ± 0,24	12 792	318,50 ± 0,37
Телки	59 672	28,10 ± 0,02	49 806	203,20 ± 0,13	39 930	301,30 ± 0,18

Табл. 3. Результаты индексной оценки живой массы крупного рогатого скота казахской белоголовой породы по результатам собственных расчетов

Идентификационный номер животного	Год рождения	Живая масса, кг					Оценка					
		при рождении	при отъеме	скорректированная на 210 дн	в год	скорректированная на 365 дн	при рождении		при отъеме		в 12-и мес. возрасте	
							ИПЦ	точность	ИПЦ	точность	ИПЦ	точность
Бычки												
4538109	2019	25	195	211,9	350	356,2	1,19	0,516	2,48	0,286	4,72	0,352
6788776	2019	25	195	200,1	350	356,3	2,16	0,513	1,89	0,277	6,68	0,343
8096780	2019	27	255	217,6	300	302,5	-0,09	0,577	5,63	0,379	2,12	0,418
8096783	2019	25	241	213,9	310	309,0	-0,39	0,537	9,04	0,343	2,53	0,396
8096835	2019	26	249	219,4	304	302,8	-0,70	0,543	6,17	0,358	-0,86	0,406
9308340	2020	24	210	175,6	303	299,6	0,24	0,524	1,14	0,313	0,16	0,372
9308571	2020	25	185	202,1	302	300,3	-3,66	0,532	-1,16	0,319	-6,29	0,377
9310548	2020	25	189	161,1	296	292,8	0,97	0,524	2,24	0,316	1,44	0,375
9310553	2020	24	211	180,5	303	300,1	-0,07	0,526	1,28	0,317	-3,48	0,375
9311541	2020	28	192	177,3	350	351,5	-0,18	0,509	0,04	0,274	11,01	0,336
Телки												
7898642	2019	25	189	186,9	285	299,3	-4,68	0,546	-6,13	0,368	-9,31	0,415
7898755	2019	24	192	187,5	275	288,8	-4,97	0,542	-6,26	0,356	-10,80	0,404
7899177	2019	25	192	188,1	275	288,8	-4,58	0,545	-5,88	0,363	-11,06	0,412
7899238	2019	26	192	196,1	284	298,2	-4,40	0,540	-5,23	0,354	-11,62	0,403
8084362	2019	28	206	228,9	291	294,6	0,03	0,573	4,68	0,339	-3,30	0,388
8817224	2020	26	177	182,3	300	297,4	-0,72	0,534	-4,70	0,362	-1,41	0,407
8817230	2020	25	177	159,8	289	285,8	0,28	0,540	-0,86	0,364	0,64	0,412
8817254	2020	28	177	157,8	286	282,8	1,69	0,541	1,34	0,365	5,22	0,412
8817372	2020	25	177	175,1	300	296,6	-0,22	0,540	0,11	0,366	0,24	0,413
8817423	2020	26	177	175,2	288	284,7	-0,10	0,537	0,37	0,353	-2,27	0,403

$$СМр = Мр + ФМр \quad (2),$$

где СМр – скорректированная живая масса при рождении, кг; Мр – живая масса при рождении, кг; ФМр – поправка с учетом возраста матери, кг.

$$СМг = \frac{Мг - Мо}{Вг - Вм} \times 155 + СМо \quad (3),$$

СМо – скорректированная живая масса при отъеме, кг; Мо – живая масса при отъеме, кг; Вм – возраст животного при взвешивании, дн.; ФМо – поправка по возрасту матери, кг;

$$СМо = \frac{Мо - Мр}{Вм} \times 210 + ФМо + СМр \quad (4),$$

СМг – скорректированная живая масса в годовалом возрасте, кг; Мг – живая масса в годовалом возрасте, кг;

Вг – возраст животного при взвешивании в годовалом возрасте, дн.

Сведения для расчета индекса племенной ценности (ИПЦ) брали из базы данных информационной аналитической системы Республики Казахстан, в которой зарегистрированы 9503 хозяйств по разведению казахской белоголовой породы, в том числе 17 с поголовьем более 10 тыс. гол. и 43–5...10 тыс. гол., 242 предприятия – 1...5 тыс. гол., и 2766 хозяйств, разводящих герефордскую породу, в том числе по 9 с поголовьем более 10 тыс. гол. и 5...10 тыс. гол., а также 62 предприятия – с 1...5 тыс. гол.

Индексную оценку живой массы крупного рогатого скота обеих пород по результатам собственных расчетов проводили на 20 особях (по 10 бычков и 10 телок) с живой массой при рождении 24...28 кг.

Табл. 4. Результаты индексной оценки живой массы крупного рогатого скота герефордской породы по результатам собственных расчетов

Идентификационный номер животного	Год рождения	Живая масса, кг					Оценка живой массы					
		при рождении	при отъеме	скорректированная на 210 дн	в год	скорректированная на 365 дн	при рождении		при отъеме		в 12-и мес. возрасте	
							ИПЦ	точность	ИПЦ	точность	ИПЦ	точность
Бычки												
8092287	2019	26	235	228,8	330	326,3	-2,43	0,536	4,89	0,343	0,10	0,396
8092293	2019	28	200	194,7	320	316,4	-0,85	0,540	4,12	0,352	4,73	0,402
8092294	2019	30	224	231,6	330	334,6	0,49	0,810	7,42	0,608	7,99	0,498
8092298	2019	28	230	207,9	330	330,2	-0,02	0,536	6,95	0,347	12,80	0,395
8092302	2019	25	236	236,7	330	330,1	-2,46	0,533	8,23	0,345	7,58	0,394
9322710	2020	30	226	231,6	381	372,1	-1,80	0,539	-4,82	0,355	0,85	0,404
9333725	2020	25	185	172,3	297	285,0	-2,78	0,531	-2,86	0,331	-12,83	0,387
9333727	2020	31	191	178,0	281	289,0	-0,51	0,531	-0,97	0,331	-5,69	0,387
9333728	2020	29	200	186,3	306	294,3	-1,90	0,531	-2,99	0,330	-9,60	0,386
9333729	2020	30	242	224,3	330	338,5	-2,44	0,531	0,01	0,331	-4,62	0,387
Телки												
8092322	2019	28	210	206,9	285	282,9	-1,10	0,564	3,56	0,354	1,17	0,398
8092325	2019	26	214	210,6	315	312,6	-0,95	0,565	4,36	0,354	8,43	0,398
8095207	2019	30	237	233,1	373	381,8	1,66	0,541	4,91	0,363	5,94	0,409
8095221	2019	30	179	178,7	300	307,4	1,62	0,544	-3,14	0,366	-8,32	0,414
8095346	2019	31	231	219,8	359	369,2	-0,08	0,539	-3,67	0,354	-15,41	0,404
9312517	2020	28	206	209,8	382	367,7	-1,69	0,542	-5,23	0,361	5,02	0,410
9318090	2020	29	195	207,0	378	371,3	-1,19	0,540	-8,92	0,358	4,50	0,406
9318094	2020	28	218	193,8	343	337,3	-1,73	0,540	-8,72	0,357	-0,55	0,406
9323942	2020	25	228	196,7	274	282,3	-2,43	0,514	-2,05	0,282	2,74	0,348
9323947	2020	25	226	195,6	274	282,2	-1,93	0,511	-1,02	0,275	6,94	0,342

Результаты и обсуждение. В среднем живая масса бычков казахской белоголовой породы по исследованному массиву при рождении составляла 27,7 кг, на 210 дней – 206,3 кг, в годовалом возрасте – 315,3 кг, телок – соответственно 25,8, 192,4 и 281,7 кг; бычков геррефордской породы – 28,9, 215,1 и 318,5 кг, телок – 28,1, 203,2 и 301,3 кг (табл. 2).

По расчетным показателям индексной оценки живая масса бычков крупного рогатого скота казахской белоголовой породы при рождении должна составлять 24...28 кг, при отъеме – 185...249 кг, скорректированная на 210 дней – 161,1...219,4 кг, в 12 месяцев – 296...350 кг, скорректированная на 365 дней – 292,8...351,5 кг, у телок – соответственно 24...28 кг, 177–206 кг, 157,8...228,9 кг, 275...300 кг и 282,8...299,3 кг.

Точность оценки индекса племенной ценности бычков казахской белоголовой породы при рождении составила 0,509...0,557, телок – 0,534...0,573; при отъеме – соответственно 0,274...0,319 и 0,354...0,368; в 12 месяцев – 0,336...0,418 и 0,388...0,415 (табл. 3). Точность оценки индекса племенной ценности бычков геррефордской породы: при рождении составила 0,531...0,810, телок – 0,511...0,565; при отъеме – 0,330...0,608 и 0,257...0,366 соответственно; в 12 месяцев – 0,386...0,498 и 0,342...0,414 (табл. 4).

При достижении 5 лет и старше крупный рогатый скот, оцененный по живой массе при рождении и отъеме, в возрасте 210 дней и 12 месяцев методом BLUP AM имел живую массу, превосходящую стандарт породы. В частности, средняя живая масса взрослого (5-и летнего) быка геррефордской породы составила 834,1 кг, казахской белоголовой – 801,4 кг, коров – соответственно 508,5 кг и 536,8 кг (табл. 5). Полученные данные демонстрируют эффективность индексной оценки живой массы крупного рогатого скота.

Табл. 5. Средние величины живой массы взрослого (5-и летнего) поголовья крупного рогатого скота казахской белоголовой и геррефордской породы

Порода	Быки		Коровы	
	количество, n	M ± m	количество, n	M ± m
Казахская белоголовая	111	801,4 ± 13,8	4 308	536,8 ± 0,6
Геррефордская	14	834,1 ± 14,5	423	508,5 ± 3,3
Всего	125		4 731	-

Выводы. Использование метода BLUP AM позволяет повысить точность оценки крупного рогатого скота казахской белоголовой и геррефордской породы по живой массе при рождении, отъеме и в годовалом возрасте. Точность оценки индекса племенной ценности бычков казахской белоголовой породы при рождении составила 0,509...0,557, телок – 0,534...0,573; при отъеме – соот-

ветственно 0,274...0,319 и 0,354...0,368; в 12 месяцев – 0,336...0,418 и 0,388...0,415, геррефордской породы – соответственно 0,531...0,810 и 0,511...0,565; 0,330...0,608 и 0,257...0,366; 0,386...0,498 и 0,342...0,414.

Литература

1. Тишкина Т. Н., Вельматов А. П., Тишкина А. Ф. Оценка быков-производителей по мясной продуктивности их потомства // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 2 (58). С. 165–170.
2. Катмаков П. С., Анисимова Е. И., Бушов А. В. Оценка экстерьера быков-производителей симментальской породы и их потомства // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 2 (58). С. 154–158.
3. Проблемы и вопросы при прогнозировании генетической племенной ценности сельскохозяйственных животных / А. Е. Калашиников, А. И. Голубков, Н. Ф. Щегольков и др. // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2022. № 4 (65). С. 77–96.
4. Племенная ценность быков-производителей при оценке их дочерей по продуктивному долголетию / В. И. Дмитриева, Д. Н. Колыцов, М. Е. Гонтов и др. // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 11. С. 88–92.
5. Холодова Л. В. Генетический потенциал и племенная ценность быков-производителей // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2020. № 2 (55). С. 106–113.
6. Алифанов В., Алифанов С. Опыт работы контрольно-селекционных дворов // Молочное и мясное скотоводство. 1996. № 6/7. С. 22–24.
7. Барабаш В. И., Козловская М. В. Отбор быков-улучшителей для стабилизации молочной продуктивности дочерей // Зоотехния. 2002. № 10. С. 2–5.
8. Бич А. И. Селекционная работа с молочным и молочно-мясным скотом // Зоотехния. 2002. № 6. С. 5–8.
9. Болгов А. Е., Карманова Е. Л., Плященко Н. А. Стабильность оценок быков холмогорской породы по резистентности дочерей к маститу // Сельскохозяйственная биология. 1987. № 10. С. 95–99.
10. Карымсаков Т. Н., Абуғалиев С. К., Баймуқанов Д. А. Оценка племенной ценности быков-производителей по геномному анализу // Аграрная наука. 2019. № 10. С. 41–42.
11. Организация проведения заказного спаривания и геномного анализа бычков в молочном скотоводстве / С. К. Абуғалиев, Н. Б. Сейдалиев, Е. К. Далибаев и др. // Научный журнал «Доклады НАН РК», 2018. № 5. С. 41–47.

Поступила в редакцию 17.07.2023
 После доработки 24.08.2023
 Принята к публикации 05.09.2023

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ РОСТА РЕМОНТНЫХ ТЁЛОК ОТ ИХ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ МИКРОЭЛЕМЕНТАМИ ВО ВНУТРИУТРОБНЫЙ ПЕРИОД*

В. А. Сафонов¹, доктор биологических наук, Т. С. Ермилова¹, аспирант,
А. Е. Черницкий², доктор биологических наук

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Российской академии наук,
119991, Москва, ул. Косыгина, 19

E-mail: safrus2003@mail.ru

²Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук,

620142, Екатеринбург, ул. Белинского, 112а

E-mail: cherae@mail.ru

Согласно гипотезе DoHaD (англ. «developmental origins of health and disease») – происхождение здоровья и болезней, связанное с развитием), условия внутриутробного развития оказывают долгосрочное влияние на постнатальный рост и здоровье животных. Целью исследований было определение связи между обеспеченностью плода микроэлементами в последние 3 месяца внутриутробного развития и показателями интенсивности их роста в первые 180 дней после рождения. Объектом исследований служили 40 клинически здоровых тёлки симментальской породы. Образцы покровных непигментированных волос из кисти хвоста у новорожденных отбирали перед 1-м кормлением молозивом. Содержание микроэлементов (селена, меди, цинка, марганца, кобальта, железа, хрома и молибдена) определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (Nexion 300D, Perkin Elmer, США). Массу тёлки измеряли в 1-е сутки жизни и в возрасте 180 дней, после чего рассчитывали среднесуточный прирост. Связи между исследуемыми показателями выявляли с использованием критерия Спирмана в программе IBM SPSS Statistics 20.0 (IBM Corp., США). Достоверных связей между массой новорожденных телят и содержанием микроэлементов в образцах их волос не установлено. Масса тёлки в возрасте 180 дней и ее среднесуточный прирост (в первые 180 дней жизни) коррелировали с содержанием в образцах волос новорожденных селена ($r = 0,349$ и $r = 0,408$ при $p < 0,05$ соответственно), меди ($r = 0,378$ и $r = 0,440$ при $p < 0,01$ соответственно), цинка ($r = 0,455$ и $r = 0,481$ при $p < 0,01$ соответственно) и кобальта ($r = 0,304$ и $r = 0,344$ при $p < 0,05$, соответственно). Для марганца, железа, хрома и молибдена таких связей не установлено.

GROWTH RATE DEPENDENCE ON MICRONUTRIENT PROVISION IN REPLACEMENT HEIFERS DURING THE INTRAUTERINE PERIOD

V. A. Safonov¹, T. E. Ermilova¹, A. E. Chernitskiy²

¹Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences,
119991, Moscow, ul. Kosygina, 19

E-mail: safrus2003@mail.ru

²Ural Federal Agrarian Scientific Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
620142, Yekaterinburg, ul. Belinskogo, 112a

E-mail: cherae@mail.ru

According to the developmental origins of health and disease (DoHaD) hypothesis, the conditions during intrauterine development have a long-term effect on postnatal growth and animal health. This study aimed to determine the relationship between fetal micronutrient provision in the last three months of intrauterine development and growth intensity indicators in the first 180 days after birth. This study focused on 40 clinically healthy Simmental heifers. Samples of non-pigmented tail hair were collected from newborns before their first colostrum feeding. The micronutrient content (selenium, copper, zinc, manganese, cobalt, iron, chromium, and molybdenum) was analyzed using inductively coupled plasma mass spectrometry (Nexion 300D, Perkin Elmer, USA). Calf weight was measured on the first day of life and at 180 days, and average daily weight gain was calculated. The relationships between the variables were analyzed using Spearman's rank correlation coefficient in IBM SPSS Statistics 20.0 (IBM Corp., USA). No significant correlations were found between the weights of the newborn calves and the micronutrient content in their hair samples. However, at 180 days of age, calf weight and average daily weight gain (in the first 180 days of life) correlated with the selenium ($r = 0.349$ and $r = 0.408$, $p < 0.05$, respectively), copper ($r = 0.378$ and $r = 0.440$, $p < 0.01$, respectively), zinc ($r = 0.455$ and $r = 0.481$, $p < 0.01$, respectively), and cobalt ($r = 0.304$ and $r = 0.344$, $p < 0.05$, respectively) contents in the hair samples of newborns. No correlations were found for manganese, iron, chromium, and molybdenum.

Ключевые слова: микроэлементы, постнатальный рост, крупный рогатый скот, ремонтные тёлки.

Key words: trace elements, postnatal growth, cattle, replacement heifers.

Согласно гипотезе DoHaD (англ. «developmental origins of health and disease») – происхождение здоровья и болезней, связанное с развитием) [1], условия внутриутробного развития оказывают долгосрочное влияние на постнатальный рост и здоровье человека и животных [2, 3]. Траектория внутриутробного и постнатально-

го развития организма контролируется материнским питанием, либо непосредственно, путем обеспечения формирующегося эмбриона и плода необходимыми макро- и микронутриентами, либо опосредованно, через регуляцию плацентарной функции [4] или изменение эпигенетических механизмов [5].

*исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23–26–00136).

В отличие от таких макроэлементов, как белки, жиры и углеводы, влияние которых на программирование геномной функции и развитие эмбриона и плода довольно полно изучено за последние годы [6, 7], эпигенетические последствия внутриутробного дефицита микроэлементов исследованы недостаточно [5].

Известно, что ограничение микроэlementного питания в критические периоды развития плода оказывает негативное влияние на формирование мышечной и жировой ткани, эндокринную регуляцию, а также на продолжительность жизни после рождения [6, 8, 9]. Результаты недавних исследований показали, что внутриутробный дефицит микроэлементов у крупного рогатого скота служит фактором риска ряда заболеваний [10, 11] и метаболических нарушений в постнатальном онтогенезе [3, 12], что негативно сказывается на росте и продуктивности животных [2, 3]. Это следует учитывать при выращивании ремонтных тёлочек и планировании воспроизводства стада.

В последнем триместре беременности у коров происходит наиболее активный рост плода, масса которого увеличивается в 2,56...4,85 раза [13]. При такой высокой скорости роста плод особенно остро нуждается в адекватном поступлении энергии, аминокислот, витаминов, макро- и микроэлементов [3, 5, 7]. Считаю, что внутриутробный запас микроэлементов, необходимых для нормального формирования и развития плода у крупного рогатого скота, полностью определяет уровень потребления и обеспеченности ими материнского организма [3, 5, 11]. Более того, недостаточное потребление эссенциальных микроэлементов матерью может приводить к избыточному накоплению плодом потенциально токсичных и токсичных химических элементов, вызывая глубокие нарушения микроэлементного гомеостаза [3, 11, 14].

Одним из способов оценить уровень микроэлементного питания плода в последнем триместре беременности может быть анализ элементного состава волос кисти хвоста, полученных у телят сразу после рождения, поскольку их рост начинается с 7-го месяца гестации [12, 15].

Цель исследований – изучить связи между содержанием микроэлементов в пробах волос кисти хвоста новорожденных тёлочек и показателями интенсивности их роста в течение первых 180 дней после рождения.

Методика. Объектом исследования служили 40 клинически здоровых телочек симментальской породы (*Bos taurus taurus*) в КХ «Речное» (Липецкая область, Россия). Новорожденные были получены от коров 2...5 лактации с продуктивностью 6489...9950 кг, выращенных в том же хозяйстве. Условия содержания и кормления экспериментальных животных в течение 180 дней после рождения были одинаковыми. Первые 14 дней после рождения тёлочек содержали в индивидуальных клетках профилактория, с 15-го дня до 2-х месяцев – в групповых боксах (по 7...9 голов в каждом), с 2-х до 6-и месяцев – в павильонах с выгульной площадкой. За время эксперимента животные получали 520 кг цельного молока, 240 кг люцернового сена, 365 кг кукурузного силоса, 116 кг зерна кукурузы, 100 кг зерна пшеницы и 4,5 кг минерального премикса. Содержание микроэлементов в рационе в целом соответствовало потребностям животных и не превышало максимального допустимых пределов [16].

Массу телочек определяли в 1-е сутки после рождения и в возрасте 180 дней, после чего рассчитывали ее среднесуточный прирост.

Образцы покровных непигментированных волос из кисти хвоста у новорожденных получали вскоре после рождения, перед 1-м кормлением молозивом с использованием ножниц из нержавеющей стали, предварительно обработанных этиловым спиртом. Волос срезали макси-

мально близко к поверхности кожи, срезанные фрагменты тщательно перемешивали и формировали среднюю пробу массой не менее 0,5 г.

Пробоподготовку образцов волос и собственно анализ микроэлементов выполняли по методике, описанной ранее [17], в аккредитованной лаборатории ООО «Микроэлементы» (Москва, Россия), ассоциированной компании IUPAC. Образцы волос погружали в ацетон чда (Химмед, Россия) на 15 мин, трехкратно промывали деионизированной водой, затем сушили при температуре 60 °С до воздушно-сухого состояния с последующим измельчением на фрагменты длиной 2...3 мм. Отбирали навеску массой 50 мг, переносили её в пробирку, добавляли 5 мл концентрированной азотной кислоты осч (Химмед, Россия). Смесь разлагали в микроволновой печи Multiwave 3000 (PerkinElmer, Австрия) при следующем режиме: 5 мин – повышение температуры до 200 °С, 5 мин – стабилизация температуры 200 °С, затем – охлаждение до 45 °С. После этого содержимое переносили в полипропиленовые пробирки и доводили объём деионизированной водой до 15 мл. Пробирки плотно закрывали и тщательно перемешивали встряхиванием. Концентрации микроэлементов (селена, меди, цинка, марганца, кобальта, железа, хрома и молибдена) определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (Nexion 300D, Perkin Elmer, США). Для градуировки спектрометра применяли моноэлементные наборы Universal Data Acquisition Standards Kit (СТ 06484, PerkinElmer, США), для внутренней стандартизации – одноэлементный стандарт чистого иттрия 10 мкг/л (Y, Perkin Elmer, США). В качестве эталона использовали образец волоса GBW09101 Шанхайского института ядерных исследований (Китай).

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили в программе IBM SPSS Statistics 20.0 (IBM Corp., США). Все данные выражали как среднее арифметическое (M) ± стандартная ошибка среднего (SEM), медиана (Me), минимальное (Min) и максимальное значение (Max). Рассчитывали коэффициент вариации. Связи между исследуемыми показателями выявляли с использованием критерия Спирмана.

В работе соблюдались все применимые международные, национальные и/или институциональные рекомендации по уходу и использованию животных. Образцы волос для анализа получали согласно стандартным процедурам без какого-либо вреда для животных. Разрешение на проведение исследований № 2–03/23 от 1 марта 2023 г. выдано комиссией по биоэтике при ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский ветеринарный институт патологии, фармакологии и терапии».

Результаты и обсуждение. Масса новорожденных тёлочек в эксперименте варьировала от 26,5 до 31,5 кг (коэффициент вариации 4,57%) и составляла в среднем $30,2 \pm 0,23$ кг (медиана 30,2 кг), в возрасте 180 дней – от 150,0 до 210,0 кг (коэффициент вариации 10,8%), в среднем $177,3 \pm 3,43$ кг (медиана 180,0 кг). Среднесуточный прирост массы тела животных за 180 дней был равен $658,0 \dots 1013$ г (коэффициент вариации 13,5%), в среднем $820,5 \pm 20,6$ г (медиана 839,0 г).

Содержание исследованных микроэлементов в волосе новорожденных тёлочек отличалось значительной вариабельностью (табл. 1). Это может быть связано, как с различиями их матерей по молочной продуктивности (у высокопродуктивных коров плод может испытывать дефицит микроэлементов вследствие значительного выведения их с молоком матери) [11], так и с нарушениями транспортной функции плаценты [3, 5, 12]. У 15,0% обследованных новорожденных выявлен внутриутроб-

Табл. 1. Содержание микроэлементов в волосе кисти хвоста у новорожденных тёлоч симментальской породы, мкг/г

Микроэлемент (физиологические значения [15])	M ± SEM* (n = 40)	Me; Min...Max (n = 40)
Селен (0,160...0,367)	0,338 ± 0,022	0,352; 0,080...0,714
Медь (5,45...8,63)	6,51 ± 0,36	7,00; 2,10...10,6
Цинк (96,8...128)	95,3 ± 6,36	111,0; 15,9...140,8
Марганец (8,44...11,3)	10,2 ± 0,68	9,34; 5,60...17,4
Кобальт (0,040...0,084)	0,048 ± 0,006	0,044; 0,002...0,167
Железо (31,7...58,2)	51,2 ± 5,13	37,0; 10,2...123,5
Хром (0,015...0,028)	0,018 ± 0,001	0,016; 0,010...0,053
Молибден (0,017...0,062)	0,039 ± 0,006	0,022; 0,014...0,156

*M – среднее арифметическое, SEM – стандартная ошибка среднего, Me – медиана, Min – минимальное значение, Max – максимальное значение.

ный дефицит селена, у 32,5% – меди, у 37,5% – цинка, у 22,5% – марганца, у 40,0% – кобальта, у 32,5% – железа, у 30,0% – хрома и у 25,0% – молибдена.

Результаты недавних исследований [12] свидетельствуют, что для телят с внутриутробной задержкой развития характерно пониженное содержание в волосе кисти хвоста меди, цинка, марганца, селена и кобальта. Логично ожидать, что величины этих показателей могут коррелировать с массой новорожденного. Тем не менее, в нашем эксперименте достоверные связи между этими признаками отсутствовали (табл. 2).

С другой стороны, достоверные связи выявлены между содержанием микроэлементов в волосе новорожденных и массой их тела в 180 дней, а также с ее среднесуточным приростом за первые 180 дней жизни (табл. 2). Так, величины этих показателей коррелировали с содержанием в волосе селена ($r = 0,349$ и $r = 0,408$ при $p < 0,05$ соответственно), меди ($r = 0,378$ и $r = 0,440$ при $p < 0,01$ соответственно), цинка ($r = 0,455$ и $r = 0,481$ при $p < 0,01$ соответственно) и кобальта ($r = 0,304$ и $r = 0,344$ при $p < 0,05$ соответственно). По марганцу, железу, хрому и молибдену таких связей не установлено.

Наши результаты дополняют выводы Glover et al. [18] о том, что масса тела телят при рождении никак не связана со случаями их респираторных заболеваний, неонатальной диареи или гибели в период до отъема. Тёлки с нормальной и избыточной массой при рождении, как и те, которые рождаются с низким весом, могут испытывать внутриутробный дефицит эссенциальных микроэлементов, предрасполагающий к заболеваниям.

Табл. 2. Коэффициенты корреляции между содержанием микроэлементов в волосе кисти хвоста и показателями роста тёлоч симментальской породы в первые 180 дней жизни

Микроэлемент	Масса тела, кг		Среднесуточный прирост массы тела за первые 180 дней жизни, г
	при рождении	в возрасте 180 суток	
Селен	-0,462	0,349*	0,408**
Медь	-0,470	0,378**	0,440**
Цинк	-0,387	0,455**	0,481**
Марганец	-0,244	0,181	0,242
Кобальт	-0,234	0,304*	0,344*
Железо	0,206	0,075	0,030
Хром	0,456	-0,329	-0,335
Молибден	0,412	-0,360	-0,387

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$.

С другой стороны, у тёлоч в эксперименте отмечены значительные межиндивидуальные различия по скорости роста в первые 180 дней жизни после рождения. Поскольку величину этого показателя считают ключевым морфофункциональным критерием для оценки молодняка крупного рогатого скота здоровья [19], наши данные (см. табл. 2) свидетельствуют об отдаленных негативных последствиях внутриутробного дефицита цинка, меди, селена и кобальта для здоровья растущих тёлоч.

Известно, что обеспеченность эссенциальными микроэлементами оказывает значительное влияние на формирование и развитие внутренних органов плода [5, 14]. В нашем исследовании внутриутробный дефицит цинка имел место у 37,5% тёлоч. Недостаточная обеспеченность этим элементом во время беременности может негативно влиять на развитие мозга, легких, сердца и скелета плода [5]. При развитии головного мозга дефицит цинка нарушает функцию генов ZIC (так называемых «цинковых пальцев»), которые необходимы для нормального формирования мозжечка [5]. В эксперименте на крысах показано, что дополнительное введение цинка в рацион беременных улучшало когнитивные способности потомства в результате увеличения экспрессии сигнального преобразователя и активатора транскрипции 3 (STAT3), а также матриксной металлопротеиназы-2/9 (MMP-2/9) [5, 7]. На моделях *in vitro* обнаружено, что при формировании сердца плода дефицит цинка изменяет распределение естественных клеточ-киллеров-1 (HNK-1) и коннексина 43 (Cx43) в миокарде, способствуя развитию сердечно-сосудистых патологий [5, 7].

У 32,5% новорожденных тёлоч мы наблюдали дефицит меди. Известно, что недостаточное поступление этого микроэлемента предрасполагает к оксидативному стрессу и нервно-дегенеративным нарушениям у развивающегося плода [5, 20]. Дефицит меди приводит к подавлению экспрессии металлотioneина 1A (MT1A), снижению активности супероксиддисмутазы и цитохром-с-оксидазы в тканях плода, необратимым изменениям в области красного ядра мозга, связанными с функциональной активностью крупных двигательных нейронов [5, 20]. В критические периоды своего развития плод особенно уязвим для дефицита меди, его последствия негативно влияют на функциональное состояние нервной, опорно-двигательной, иммунной и сердечно-сосудистой систем [5, 20]. Более того, стойкие структурные, биохимические и функциональные нарушения у потомства сохраняются даже в тех случаях, когда дефицит этого элемента начинают восполнять после рождения [20].

У 15,0% тёлоч в эксперименте отмечали низкую обеспеченность селеном. Это один из важнейших элементов, участвующих в регулировании клеточного цикла, развитии и функционировании тканей плода [21]. Известно, что потребность плода в селене значительно возрастает с увеличением срока гестации [5, 21]. Элемент осуществляет свое биологическое действие, входя в состав 25 селенопротеинов, большинство из которых обладают антиоксидантными свойствами, связаны с эндокринной регуляцией, ростом и регуляцией энергетического гомеостаза [21]. Дефицит селена во время беременности приводит к оксидативному стрессу, задержке развития плода и аномальному формированию его тканей [21], что опосредовано эндокринными и метаболическими нарушениями [5, 7]. Известно также, что низкая обеспеченность плода селеном ухудшает функцию двенадцатиперстной кишки, секрецию гормонов щитовидной железы, инсулина и инсулиноподобного фактора роста, негативно влияет на функциональную активность системы «гипоталамус-гипофиз-надпочечники» [21]. Обедненная селеном диета у беременных самок вызывает внутриутробную задержку развития плода со значительным уменьшением массы его сердца и почек, тяжелые нарушения ангио- и миогенеза, формирования щитовидной, поджелудочной желез и органов репродуктивной системы [21].

У 40,0% обследованных тёлоч в эксперименте диагностировали внутриутробный дефицит кобальта. Связь этого элемента со скоростью роста животных после рождения находит своё объяснение через его участие в процессах

кровотворения, синтезе мышечных белков, нуклеиновых кислот, обеспечении тканевого дыхания, регуляции энергетического, белкового и минерального обмена [3, 5, 16]. Показано, что дефицит кобальта у беременных животных ассоциирован с внутриутробной задержкой развития плода, респираторными дисфункциями и служит фактором риска развития бронхопневмонии в неонатальный период [10, 12].

Учитывая синергизм в метаболизме и биологических эффектах рассмотренных микроэлементов, важно отметить, что их дефицит у плода редко проявляется в моноварианте [5, 11, 12]. В нашем исследовании у 30,0% животных наблюдался комбинированный дефицит цинка и кобальта, у 25,0% – цинка и меди, у 22,5% – меди и кобальта, у 12,5% – меди и селена, у 7,5% – селена и кобальта, либо селена и цинка, у 5,0% – селена, цинка и меди, у 2,5% – селена, цинка, меди и кобальта.

Таким образом, внутриутробный дефицит цинка, меди, селена и кобальта у тёлоч (в моно- или комбинированном варианте) может вызывать глубокие морфофункциональные нарушения в их тканях и органах, служить фактором риска ряда заболеваний и ограничивать рост после рождения.

Выводы. Результаты исследования показывают, что масса тёлоч в возрасте 180 дней и среднесуточный прирост массы тела (в первые 180 дней жизни) прямо коррелируют с обеспеченностью их селеном ($r = 0,349$ и $r = 0,408$ при $p < 0,05$ соответственно), медью ($r = 0,378$ и $r = 0,440$ при $p < 0,01$ соответственно), цинком ($r = 0,455$ и $r = 0,481$ при $p < 0,01$ соответственно) и кобальтом ($r = 0,304$ и $r = 0,344$ при $p < 0,05$ соответственно) в последние месяцы внутриутробного развития. Влияния на эти признаки концентрации марганца, железа, хрома и молибдена не установлено. Текущие результаты и анализ литературных данных позволяют считать, что внутриутробный дефицит селена, меди, цинка и кобальта не оказывает воздействия на массу тёлоч при рождении, но, негативно влияя на здоровье животных, ограничивает их рост в первые 180 дней жизни.

Литература

1. Fukuoka H. DOHaD (developmental origins of health and disease) and birth cohort research // *J. Nutr. Sci. Vitaminol.* 2015. Vol. 61. P. S2–S4. doi: 10.3177/jnsv.61.S2.
2. Greenwood P. L., Bell A. W. Developmental programming and growth of livestock tissues for meat production // *Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract.* 2019. Vol. 35. No. 2. P. 303–319. doi: 10.1016/j.cvfa.2019.02.008.
3. Van Emon M., Sanford C., McCoski S. Impacts of bovine trace mineral supplementation on maternal and offspring production and health // *Animals.* 2020. Vol. 10. No. 12. 2404. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/10/12/2404> (дата обращения: 02.09.2023). doi: 10.3390/ani10122404.
4. Robinson J. J., Sinclair K. D., McEvoy T. G. Nutritional effects on foetal growth. *Anim. Sci.* 1999. Vol. 68. No. 2. P. 315–331. doi: 10.1017/S1357729800050323.
5. Maternal mineral nutrition regulates fetal genomic programming in cattle: a review / M. Anas, W. J. Diniz, A. C. Menezes, et al. // *Metabolites.* 2023. Vol. 13. No. 5. 593. URL: <https://www.mdpi.com/2218-1989/13/5/593> (дата обращения: 02.09.2023). doi: 10.3390/metabo13050593.
6. Patel M. S., Srinivasan M. Metabolic programming in the immediate postnatal life // *Ann. Nutr. Metab.* 2011. Vol. 58. No. 2. P. 18–28. doi: 10.1159/000328040.
7. Wu G., Imhoff-Kunsch B., Girard A. W. Biological mechanisms for nutritional regulation of maternal health and fetal development // *Paediatr. Perinat. Epidemiol.* 2012. Vol. 26. No. 1. P. 4–26. doi: 10.1111/j.1365-3016.2012.01291.x.

8. Board-invited review: Intrauterine growth retardation: implications for the animal sciences / G. Wu, F. W. Bazer, J. M. Wallace, et al. // *J. Anim. Sci.* 2006. Vol. 84. No. 9. P. 2316–2337. doi: 10.2527/jas.2006-156.
9. Programming of embryonic development / C. R. Dahlen, P. P. Borowicz, A. K. Ward, et al. // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22. No. 21. 11668. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/22/21/11668> (дата обращения: 02.09.2023). doi: 10.3390/ijms222111668.
10. Incidence risk of bronchopneumonia in newborn calves associated with intrauterine diselementosis / E. Kalaeva, V. Kalaev, A. Chernitskiy, et al. // *Vet. World.* 2020. Vol. 13. No. 5. P. 987–995. doi: 10.14202/vetworld.2020.987-995.
11. Diselementosis as a risk factor of embryo loss in lactating cows / S. Shabunin, A. Nezhdanov, V. Mikhalev, et al. // *Turk. J. Vet. Anim. Sci.* 2017. Vol. 41. No. 4. P. 453–459. doi: 10.3906/vet-1609-76.
12. Safonov V. A., Mikhalev V. I., Chernitskiy A. E. Antioxidant status and functional condition of respiratory system of newborn calves with intrauterine growth retardation // *Agricultural Biology.* 2018. Vol. 53. No. 4. P. 831–841. doi: 10.15389/agrobiology.2018.4.831eng.
13. Growth-and breed-related changes of fetal development in cattle / W. H. Mao, E. Albrecht, F. Teuscher, et al. // *Asian-Aust. J. Anim. Sci.* 2008. Vol. 21. No. 5. P. 640–647.
14. Goff J. P. Invited review: Mineral absorption mechanisms, mineral interactions that affect acid-base and antioxidant status, and diet considerations to improve mineral status // *J. Dairy Sci.* 2018. Vol. 101. No. 4. P. 2763–2813. doi: 10.3168/jds.2017-13112.
15. Скрининг элементного состава волос у новорожденных телят как способ диагностики внутриутробного дисэлементоза / В. А. Сафонов, Т. С. Ермилова, Э. А. О. Салмзаде и др. // *Ветеринария и кормление.* 2022. № 5. С. 48–50. doi: 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2022-5-14.
16. Suttle N. F. *Mineral nutrition of livestock.* 5th ed. Boston: CABI, 2022. 600 p.
17. The reference intervals of hair trace element content in Hereford cows and heifers (*Bos taurus*) / S. A. Miroshnikov, O. A. Zavyalov, A. N. Frolov, et al. // *Biol. Trace Elem. Res.* 2017. Vol. 180. No. 1. P. 56–62. doi: 10.1007/s12011-017-0991-5.
18. Glover I. D., Barrett D. C., Reyher K. K. Little association between birth weight and health of preweaned dairy calves // *Vet. Rec.* 2019. Vol. 184. No. 15. 477. URL: <https://bvajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1136/vr.105062> (дата обращения: 02.09.2023). doi: 10.1136/vr.105062.
19. Билан Е. А., Дерхо М. А. Масса тела как индикатор морфобиохимического состава крови тёлоч в условиях интенсивной технологии выращивания // *Генетика и разведение животных.* 2022. № 2. С. 76–82. doi: 10.31043/2410-2733-2022-2-75-82.
20. Influence of copper on early development: prenatal and postnatal considerations / J. Y. Uriu-Adams, R. E. Scherr, L. Lanoue, et al. // *Biofactors.* 2010. Vol. 36. No. 2. P. 136–152. doi: 10.1002/biof.85.
21. Fetal programming is deeply related to maternal selenium status and oxidative balance; experimental offspring health repercussions / M. L. Ojeda, F. Nogales, I. Romero-Herrera, et al. // *Nutrients.* 2021. Vol. 13. No. 6. 2085. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6643/13/6/2085> (дата обращения: 02.09.2023). doi: 10.3390/nu13062085.

Поступила в редакцию 15.09.2023
После доработки 02.10.2023
Принята к публикации 24.10.2023

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ УРОВНЯ ЭКСПРЕССИИ ГЕНОВ PRM1, STK35 И IFT27 С ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА СЕМЕНИ БЫКОВ ГОЛШТИНСКОЙ ПОРОДЫ***О. Ю. Баркова¹**, кандидат биологических наук, **Д. А. Старикова¹**, кандидат биологических наук, **И. В. Чистякова¹**, кандидат биологических наук*Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных, филиал Федерального научного центра животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста, 196601, Пушкин, Московское ш., 55 А
e-mail: barkoffws@list.ru*

Исследования проводили с целью корреляционного анализ между уровнем экспрессии мРНК генов PRM1, STK35 и IFT27 и показателями качества нативной и декриоконсервированной спермы быков голштинской породы для поиска эффективных транскриптомных биомаркеров семени быков. В ходе исследования использованы нативная и декриоконсервированная сперма семи быков голштинской породы. Для решения задач исследования изучали восемь показателей качества спермы, проводили анализ экспрессии изучаемых генов в нативных и декриоконсервированных сперматозоидах в реальном времени. При обработке результатов применяли непараметрические вероятностно-статистические методы, анализ ранговой корреляции проводили с использованием критерия Спирмена. Более высокую экспрессию изучаемых генов преимущественно отмечали в замороженно-оттаянной сперме, по сравнению с нативной. Между уровнем экспрессии мРНК гена протамина (PRM1) и показателями качества спермы достоверной корреляции не установлено. Уровень экспрессии мРНК гена IFT27 достоверно положительно коррелировал с содержанием дефектных клеток из замороженно-оттаянной спермы (0,714, $p=0,05$) и мертвых клеток (0,714, $p=0,0545$) из нативной спермы. Отрицательная связь отмечена с концентрацией нормальных клеток в замороженно-оттаянной сперме (-0,750, $p=0,038$) и живых клеток (-0,714, $p=0,0545$) в нативной сперме. Транскрипт (мРНК) гена IFT27 отрицательно коррелировал (-0,703, $p=0,0545$) с показателем дефекта акросомы замороженно-оттаянных сперматозоидов. Содержание активных форм кислорода (АФК) достоверно коррелировало (0,786, $p=0,0251$) с мРНК гена IFT27. Транскрипт (мРНК) гена STK35 был единственным из всех исследуемых мРНК, который имел среднюю отрицательную корреляцию с показателем подвижности сперматозоидов в нативной (-0,692, $p=0,052$) и замороженно-оттаянной сперме (-0,876, $p=0,035$). Результаты этих исследований могут быть использованы для создания системы неинвазивных транскрипционных маркеров качества спермы быков.

CORRELATION ANALYSIS OF THE PRM1, STK35 AND IFT27 LEVEL OF EXPRESSION GENES WITH THE QUALITY OF NATIVE AND DEPOSITED SEED OF HOLSTING BULLS**Barkova O.Yu., Starikova D. A., Chistyakova I. V.***Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding – Branch of the L. K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, 196601, Pushkin, Moskovskoe sh., 55 A
e-mail- barkoffws@list.ru.*

The research aim is a correlation analysis of the PRM1, STK35 and IFT27 genes mRNA expression with the native and decryoconserved sperm quality indicators of Holstein bulls to search for effective transcriptomic biomarkers of bull semen. In the study course, native and decryoconserved sperm of seven Holstein bulls were used. To solve the study problems, eight indicators of sperm quality were studied, the studied genes in native and decryoconserved spermatozoa expression was analyzed in real time PCR. Nonparametric probabilistic and statistical methods were used, the analysis of rank correlation was carried out using Spearman's criterion. Higher expression of the studied genes was mainly noted in frozen-thawed sperm compared to native. The mRNA expression level of the protamine gene (PRM1) did not give a reliable correlation with sperm parameters: The level IFT27 gene mRNA expression was significantly positively correlated with the content of defective cells from frozen-thawed sperm (0.714, $p=0.05$) and dead cells (0.714, $p=0.0545$) from native sperm. A negative correlation was noted with the content of normal cells in frozen-thawed sperm (-0.750, $p=0.038$) and live cells (-0.714, $p=0.0545$) in native sperm. The IFT27 gene transcript (mRNA) showed a negative correlation (-0.703, $p=0.0545$) in terms of the acrosome defect of frozen-thawed spermatozoa. In terms of the content of reactive oxygen species (ROS), the mRNA of the IFT27 gene had a significant positive correlation (0.786, $p=0.0251$). The STK35 gene transcript (mRNA) was the only one of all the studied mRNAs that had an average negative correlation with sperm motility in native (-0.692, $p=0.052$) and frozen-thawed sperm (-0.876, $p=0.035$). These studies can be used to create a system of non-invasive transcriptional markers of bull sperm quality.

Ключевые слова: сперматозоиды, быки, качество семени, криоконсервация, мРНК, транскрипты, биомаркеры криорезистентности, митохондрии, PRM1, STK35, IFT27.

Key words: spermatozoa, bulls, semen quality, cryopreservation, RNA, transcripts, cryoresistance biomarkers, mitochondria, PRM1, STK35, IFT27.

Несмотря на совершенствование сред и протоколов процедуры криоконсервации, значительное число спермиев гибнет после процедур заморозки/оттаивания семени [1]. Относительно новый подход к использованию омиксных технологий в репродуктивной криоби-

ологии позволил выявить гены, транскрипты и белки, связанные с оплодотворяющей способностью и криорезистентностью сперматозоидов, но объем данных о РНК-профайлах, ассоциированных с устойчивостью к заморозке-оттаиванию весьма ограничен [2]. Транс-

*работа выполнена в рамках работ по гранту Российского Фонда Науки № 22-76-10041.

криптом в сперматозоиде ассоциирован с фертильностью, а также участвует в оплодотворении и раннем развитии эмбриона [3, 4, 5]. Сведения о ассоциациях транскриптома с качеством сперматозоидов могут быть использованы для создания эффективной неинвазивной системы биомаркеров. С применением методики полногеномного секвенирования РНК (RNA-Seq) в замороженных-оттаянных сперматозоидах быков были идентифицированы транскрипты таких потенциально оказывающих влияние на оплодотворяющие свойства спермы генов, как PRM1, STK35, и IFT27. Протамин-1 (PRM1) экспрессируется в клетках спермы и относится к распространённым основным белкам, содержащимися в головке сперматозоида. Он важен для защиты генома самца от повреждений во время и после упаковки нитей ДНК с помощью гистонов [6]. Аномальная структура протаминов приводит к бесплодию или ухудшению репродуктивных результатов из-за снижения количества, подвижности и жизнеспособности сперматозоидов [7]. Серин-треонинкиназа 35 (STK35), также известная как CLK1 и STK35L1, – новая киназа, компонент комплексов ремоделирования хроматина и, следовательно, может напрямую влиять на основную механизм транскрипции и экспрессии генов [8]. STK35 регулирует такие функции, как миграция, пролиферация, выживание и ангиогенез клеток. Он характеризуется высоким уровнем экспрессии в семенниках. Существует предположение, что локализованный в ядре белок импортин- α 2 (IMP- α 2) участвует в регуляции транскрипции STK35 во время сперматогенеза [9]. Среди генов IFT особый интерес представляет компонент внутрижгутикового транспортного комплекса IFT27 (RABL4), который играет критическую роль в подвижности и метаболизме сперматозоидов и в высокой степени экспрессируется в семенниках. Комплекс IFT25/IFT27 принимает участие в сборке структуры ядра аксономы сперматозоидов [10]. Результаты предыдущих исследований подтвердили, что однонуклеотидные полиморфизмы (SNP) в промоторах генов STK35 и IFT27, экспрессируемых в сперматозоидах хряков, влияют на транскрипционную активность генов и связаны с плохой замораживаемостью эякулятов и смертность эмбрионов [11].

Цель исследований – корреляционный анализ экспрессии генов PRM1, STK35 и IFT27 с показателями качества нативной и декриоконсервированной спермы быков голштинской породы для поиска эффективных транскриптомных биомаркеров семени быков.

Методика. Исследования проводили на базе АО «Невское» на 7 быках голштинской породы в возрасте от 1 года до 3 лет. Всего было исследовано 7 проб нативной и 7 проб декриоконсервированной спермы по 3 пайеты с дозой спермы объемом 0,5 мл в каждой. Объем каждой пробы нативной спермы составлял 1000...1500 мкл, концентрация варьировала от 0,7 до 1,65 млрд клеток/мл. Стандартную процедуру криоконсервации спермы проводили на АО «Невское» с использованием разбавителем OptiXcell (IMV technologies, Франция) в соотношении 1:1. Концентрация клеток в пайете достигала 4...9×10⁶ клеток/мл. Подвижность и концентрацию половых клеток свежего эякулята оценивали с использованием ка-

меры Маклера (Sefi Medical Instrument, Италия). Перед проведением экспериментов свежий эякулят разбавляли в среде HBSS (Hank's Balanced Salt Solution), доводя до объема 500 мкл, так чтобы итоговая концентрация клеток не превышала 2...4×10⁶ клеток/мл. Концентрацию клеток проверяли на фотометре SDM 1 (Minitube, Германия). Затем клетки дважды осаждали путем центрифугирования при 1500 об/мин в течение 10 минут и 37°C, супернатант удаляли, а осадок ресуспендировали в 1,5 мл среды HBSS. После этого образцы использовали для получения РНК, оценки морфологии клеток, анализа биохимических показателей мужских гамет. До выделения РНК образцы спермы очищали от соматических и мертвых клеток путем градиентного центрифугирования с использованием раствора Фиколла [12]. Анализ морфологии сперматозоидов проводили под иммерсией на световом микроскопе Olympus Vanox-t (Япония) после окрашивания мазка эякулята с помощью тест набора Дифф-Квик (АБРИС+ НПФ, РОССИЯ), согласно рекомендациям производителя. На каждом суховоздушном препарате наблюдали по 200 сперматозоидов. Для оценки мембранного потенциала митохондрий клетки сперматозоидов окрашивали флуоресцентным липофильным карбоцианиновым красителем JC-1. Оценку жизнеспособности и целостности клеточных мембран сперматозоидов осуществляли путем окрашивания интеркалирующими красителями: пропидиумом йодидом, контрастного красителя для ядер и хромосом, окрашивающего мертвые клетки, и SYBR Green I, специфичного к двухцепочечной ДНК. Уровень генерации активных форм кислорода в нативных и деконсервированных сперматозоидах оценивали путем окраски спермы красителем H2DCFDA (2',7'-дихлородигидрофлуоресцеин диацетат). Анализ целостности мембран, жизнеспособности, мембранного потенциала митохондрий и уровня генерации активных форм кислорода проводили с использованием проточного цитометра CytoFLEX, BeckmanCoulter (США). Прибор был настроен на низкую скорость сбора данных проточной цитометрии с максимальное разрешение. Результаты анализировали с помощью программы CytExpert 2.4.

РНК из нативной и деконсервированной спермы предварительно отмытой средой HBSS и реагентом Фиколл выделяли с использованием набора ExtractRNA (Евроген) тщательно следуя указаниям производителя. Полученные образцы РНК обрабатывали термолабильной ДНКазой EM 100 (Биолабмикс) в соответствии с рекомендацией производителя. Концентрация РНК, измеренная на спектрофотометре NanoDrop ND-1000, находилась в диапазоне от 500 до 1000 нг/мл. Дизайн олигонуклеотидов-праймеров для анализа экспрессии последовательности генов-кандидатов, влияющих на качество спермы, проводили на основании информации из баз данных сети интернет (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/> и www.ensembl.org) с использованием компьютерной программы PRIMER_3 (www.genome.wi.mit.edu). Синтез односторонней кДНК осуществляли при помощи обратной транскриптазы Mint (Евроген), следуя указаниям производителя. Реакцию выполняли в объеме 20 мкл. Анализ экспрессии РНК из нативной и замороженно-оттаянной спермы быков про-

Табл. 1. Последовательность олигонуклеотидов-праймеров генов-кандидатов ассоциированных с качеством сперматозоидов

Название гена	Последовательность праймера и температура отжига (°C)		Размер продукта, п.н.
	прямой	обратный	
PRM1	ATGGCCAGATACCGATGCTG, 59,96	ACCTCTTCACSTCTCCTCC, 59,96	123
STK35	GTGGAGACCTCGCTCAAAGG, 60,39	GGAAAGGAGGGTGTGTCCG, 60,00	152
IFT27	GACAACAGGGGTGGATCTGG, 60,00	TCTCCAGAGTGGAGGACAG, 60,00	153
SLC2A5 (GLUT5)	TGACCTACCACCAACCCTGA, 60,10	CATGCCTGTGGCTACCAGAA, 60,04	194
GAPDH	CCGCAAGGAGAACTCAAGGT, 59,96	CGGCCAAGCAAAAATTGGA, 59,97	163

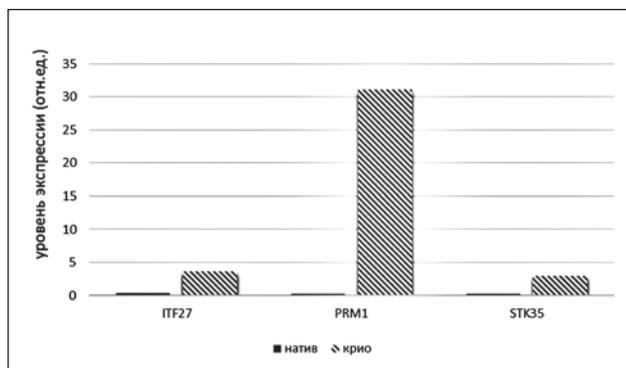


Рис. 1. Изменение уровня экспрессии генов-кандидатов в нативных и декриоконсервированных сперматозоидах.

водили с использованием олигонуклеотидов-праймеров (табл. 1).

Далее осуществляли амплификацию смеси однонитевой кДНК с использованием 5x реакционной смеси qPCRmix-HS SYBR (Евроген), предназначенной для ПЦР в реальном времени, с интеркалирующим красителем SYBR Green I в соответствии с рекомендациями производителя. Реакции выполняли на амплификаторе в реальном времени CFX96 Touch (Bio-Rad, США) в следующем режиме: амплификация кДНК и детекция сигнала (40 циклов): 95 °C – 5 мин; 95 °C – 15 с; 59 °C – 15 с; 72 °C – 20 с (этап сбора данных). Реакции ОТ-ПЦР в реальном времени для каждого образца проводили в трех повторениях. В дальнейшем использовали среднее арифметическое значение. Расчет изменения экспрессии отдельных молекул микроРНК выполняли методом –2dCt (delta cycle threshold) [13]. Статистическую значимость различий исследуемых параметров между группами оценивали методами непараметрического однофакторного анализа ANOVA по Kruskal-Wallis и Holm-Sidak, анализ ранговой корреляции проводили с использованием критерия Спирмена в программе SigmaPlot 14. Все эксперименты проводили с одобрения комиссии по этике Российской научно-исследовательского института генетики и селекции сельскохозяйственных животных – филиала ФГБНУ Федерального научного центра животноводства имени Л. К. Эрнста (протокол от 03.03.2020 № 2020–4).

Всего было отобрано 3 гена-кандидата, влияющих на криорезистентность и оплодотворяющие качества спермы: кодирующие белки протамина 1 (PRM1), серин/треонинкиназы 35 (STK35) и компонент внутрижутикового транспортного комплекса (IFT27). Для измерения уровня экспрессии в качестве референсных генов использовали SLC2A5 (GLUT5) и GAPDH (см. табл. 1), которые

имеют относительно постоянный уровень экспрессии практически во всех тканях и клетках.

Результаты и обсуждение. Экспрессия изучаемых генов в замороженно-оттаянной сперме была преимущественно выше, чем в нативной (рис. 1). Статистически значимые различия между ее уровнями были отмечены для генов IFT27 (p=0,04) и PRM1 (p=0,02).

Ген IFT27 оказывал отрицательное влияние на продуктивные качества спермы. Его транскрипт (мРНК) характеризовался достоверной положительной корреляцией с содержанием дефектных клеток в замороженно-оттаянной сперме и мертвых клеток в нативной сперме (табл. 2). В то же время отмечена отрицательная связь с содержанием нормальных клеток в замороженно-оттаянной сперме и живых клеток в нативной сперме. У транскрипта гена IFT27 установлена отрицательная корреляция с величиной показателя дефекта акросомы у замороженно-оттаянных сперматозоидов, и достоверная положительная с содержанием активных форм кислорода (АФК). При этом известно, что образование АФК – одна из основных причин повреждения сперматозоидов при криоконсервации, что в свою очередь, снижает их подвижность, жизнеспособность и другие параметры качества после оттаивания.

Ген STK35 был единственным из всех исследуемых, который имел среднюю отрицательную корреляцию с показателем подвижности в образцах нативной и замороженно-оттаянной спермы. Других достоверных связей уровня экспрессии гена STK35 с признаками сперматозоидов не выявлено (см. табл. 2).

Результаты наших исследований отчасти подтверждаются данными польских ученых [11], согласно которым экспрессия генов серин/треонинкиназы 35 (STK35) и внутрижутикового транспорта 27 (IFT27), обнаруженная с использованием пакета Bioconductor (DESeq), повышалась в эякулятах хряков с плохой криорезистентностью.

Достоверная связь между уровнем экспрессии протамина (PRM1) и показателями спермы не установлена.

Выводы. На основе полученных данных можно сделать предположение, что транскрипты генов (мРНК) серин/треонинкиназы 35 (STK35) и компонент внутрижутикового транспортного комплекса (IFT27) могут быть использованы как биомаркеры, позволяющие быстро и неинвазивно выявлять причины низкой устойчивости конкретных проб к заморозке-оттаиванию. Повышение экспрессии этих генов негативно сказывается на качестве сперматозоидов. Пополнение фундаментальных знаний о связи конкретных механизмов низкой криорезистентности с определенными транскриптами позволит выработать возможные способы решения проблемы.

Табл. 2. Анализ корреляционных связей уровня относительной экспрессии исследуемых генов с некоторыми показателями качества спермы быков

Признак сперматозоидов	Состояние спермы	PRM1		IFT27		STK35	
		R, Spearman	p-value	R, Spearman	p-value	R, Spearman	p-value
Подвижность	нативное	0,342	0,297	-0,168	0,660	-0,692	0,052
	деконсервированное	-0,617	0,121	-0,243	0,545	-0,876	0,035
Дефектные	нативное	0,015	0,968	0,600	0,350	0,321	0,438
	деконсервированное	0,357	0,380	0,714	0,054	0,500	0,217
Норма	нативное	0,015	0,968	0,107	0,781	-0,321	0,438
	деконсервированное	-0,536	0,181	-0,750	0,038	-0,571	0,150
Дефект акросомы	нативное	0,037	0,905	0,000	0,968	0,185	0,660
	деконсервированное	-0,054	0,843	-0,703	0,054	0,450	0,255
Мертвые SYBR/PI	нативное	-0,643	0,096	0,714	0,054	0,393	0,341
	деконсервированное	0,491	0,217	0,600	0,121	0,179	0,660
Живые YBR/PI	нативное	0,643	0,096	-0,714	0,054	-0,393	0,341
	деконсервированное	0,321	0,438	0,321	0,438	0,536	0,181
Степень поляризации митохондриальных мембран, n (%) (JC-1)	нативное	0,071	0,843	0,036	0,905	-0,179	0,660
	деконсервированное	0,000	0,968	0,571	0,150	0,071	0,843
Содержание АФК (DFC)	нативное	-0,200	0,714	0,200	0,714	-0,600	0,242
	деконсервированное	-0,500	0,217	0,786	0,025	-0,500	0,217

Литература

1. *Recent advances in bovine sperm cryopreservation techniques with a focus on sperm post-thaw quality optimization* / L. G. Grötter, L. Cattaneo, P. E. Marini, et al. // *Reprod Domest Anim.* 2019. Vol. 54. No. 4. P. 655–665. doi: 10.1111/rda.13409.
2. Khan M. Z., Sathanawongs A., Zhang Y. *Impact of cryopreservation on spermatozoa freeze-thawed traits and relevance OMICS to assess sperm cryo-tolerance in farm animals.* // *Front Vet Sci.* 2021. Vol. 8. 609180. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fvets.2021.609180> (дата обращения: 14.09.2023). doi: 10.3389/fvets.2021.609180.
3. *The presence, role and clinical use of spermatozoal RNAs* / M. Jodar, S. Selvaraju, E. Sendler, et al. // *Hum Reprod Update.* 2013. Vol. 19. No. 6. P. 604–24. doi: 10.1093/humupd/dmt031.
4. *Integrated analysis of mRNAs and long noncoding RNAs in the semen from Holstein bulls with high and low sperm motility.* / X. Wang, C. Yang, F. Guo, et al. // *Sci Rep.* 2019. Vol. 9. 2092. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-38462-x> (дата обращения: 14.09.2023). doi: 10.1038/s41598-018-38462-x.
5. *Transcriptome analysis of boar spermatozoa with different freezability using RNA-Seq.* / L. Fraser, P. Brym, C. S. Pareek, et al. // *Theriogenology.* 2020. Vol. 142. P. 400–413. doi: 10.1016/j.theriogenology.2019.11.001.
6. *Nucleotide variability of protamine genes influencing bull sperm motility variables* / Y. M. H, S. Kumar, R. Chaudhary, et al. // *Anim Reprod Sci.* 2018. Vol. 193. P. 126–139. doi: 10.1016/j.anireprosci.2018.04.060.
7. *Orchestrating the expression levels of sperm mRNAs reveals CCDC174 as an important determinant of semen quality and bull fertility* / S. Selvaraju, D. Swathi, L. Ramya, et al. // *Syst Biol Reprod Med.* 2021. Vol. 67. No. 1. P. 89–101. doi: 10.1080/19396368.2020.1836286.
8. *The STK35 locus contributes to normal gametogenesis and encodes a lncRNA responsive to oxidative stress.* / Y. Miyamoto, P. A. F. Whiley, H. Y. Goh, et al. // *Biol Open.* 2018. Vol. 7. No. 8. P. 26–31. doi: 10.1242/bio.032631.
9. *Importin alpha mRNAs have distinct expression profiles during spermatogenesis* / C. A. Hogarth, S. Calanni, D. A. Jans, et al. // *Dev Dyn.* 2006. Vol. 5. No. 1. P. 253–262. doi: 10.1002/dvdy.20569.
10. *Intraflagellar transporter protein (IFT27), an IFT25 binding partner, is essential for male fertility and spermiogenesis in mice.* / Y. Zhang, H. Liu, W. Li, et al. // *Dev Biol.* 2017. Vol. 432. No. 1. P. 125–139. doi: 10.1016/j.ydbio.2017.09.023.
11. *Promoter polymorphisms in STK35 and IFT27 genes and their associations with boar sperm freezability* / A. Mańkowska, P. Brym, P. Sobiech et al. // *Theriogenology.* 2022. Vol. 189. P. 199–208. doi: 10.1016/j.theriogenology.2022.06.023.
12. *Ficoll-400 density gradient method as an effective sperm preparation technique for assisted reproductive techniques* / H. N. Highland, A. S. Rishika, S. S. Almira, et al. // *J Hum Reprod Sci.* 2016. Vol. 9. No. 3. P. 194–199. doi: 10.4103/0974-1208.192070.
13. *Livak K. J., Schmittgen T. D. Analysis of relative gene expression data Using realtime quantitative PCR and the 2(Delta DELta C(T)) method* // *Methods.* 2001. Vol. 25. No. 4. P. 402–408. doi: 10.1006/meth.2001.1262.

Поступила в редакцию 31.08.2023

После доработки 08.10.2023

Принята к публикации 24.10.2023

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

УДК 621:620.171:664

DOI: 10.31857/S2500262723060145, EDN: NIXIRM

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДОЗИРОВАНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ВИБРАЦИОННО-ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ СМЕШИВАНИИ

В. А. Шахов, доктор технических наук, **В. А. Пушко**, кандидат технических наук, **И. Г. Бойко**, кандидат технических наук, **В. В. Герасименко**, доктор биологических наук, **П. Г. Учкин**, кандидат технических наук, **И. В. Попов**, кандидат технических наук

*Оренбургский государственный аграрный университет,
460014, Оренбург, ул. Челюскинцев, 18
E-mail: shahov-v@yandex.ru*

Перспективное направление повышения сбалансированности рациона животных и птиц по микроэлементному составу – обогащение ультрадисперсными частицами дефицитных микроэлементов. При этом важно, чтобы они равномерно распределялись во всем объеме кормосмеси. Цель исследования – повышение равномерности распределения ультрадисперсных частиц в кормосмеси путем разработки специального оборудования и модернизации технологического процесса. Использование новых технологий приготовления кормосмесей на основе контроля технологических параметров позволяет получать продукт с заданными функциональными параметрами и сохранением питательных свойств. Анализ теоретических исследований процесса дозирования и смешивания ультрадисперсных частиц показал, что наилучший вариант их движения в потоке смеси – ламинарный. Спроектированная технологическая линия предусматривает отдельную подачу предварительно смешанной кормосмеси и ультрачастиц в вибросмеситель. Оценка эффективности процесса смешивания в вибрационном смесителе проводили по трем сечениям кормосмеси с ультрачастицами порошков железа, цинка, кобальта и молибдена. Оптимальные параметры работы достигаются при угловой скорости вибросмесителя – 3...7 рад/с, частоте колебаний – 9...37 Гц, времени вибросмешивания – 113...333 с, времени открытия управляемого дозатора (подача ультрадисперсных частиц в вибросмеситель) – 5...15 с. При использовании управляемого дозатора ультрачастиц и сферической крыльчатки частицы в корме распределялись более равномерно. Самое низкое влияние на величину этого показателя по трем сечениям кормосмеси отмечали для цинка (до 2,7 %), далее следовали порошки железа (до 3,6 %) и молибдена (до 9,5 %). Наибольшее воздействие разработанное оборудование оказало на равномерность распределения кобальта (до 20,5 %). При этом отклонение от нормы (0,5 мг/кг) не превышало 2 %, то есть величина качественного показателя равномерности распределения была равна 98 %.

IMPROVING THE PROCESS OF DOSING ULTRAFINE PARTICLES WITH VIBRATION-ELECTROMECHANICAL MIXING

V. A. Shakhov, V. A. Pushko, I. G. Boyko, V. V. Gerasimenko, P. G. Uchkin, I. V. Popov

*Orenburg State Agrarian University
460014, Orenburg, ul. Chelyuskintsev, 18
E-mail: shahov-v@yandex.ru*

A promising direction for improving the balance of the diet of livestock and birds by trace element composition is the enrichment of ultradisperse particles of scarce trace elements. At the same time, it is important that they are evenly distributed throughout the entire volume of the feed mixture. The purpose of the study is to increase the uniformity of the distribution of ultrafine particles in the feed mixture by developing special equipment and modernizing the technological process. The use of new technologies for the preparation of feed mixtures based on the control of technological parameters makes it possible to obtain a product with specified functional parameters and preservation of nutritional properties. Analysis of the theoretical studies of the process of dosing and mixing of ultrafine particles has shown that the best option for their movement in the flow of the mixture is laminar. The designed processing line provides for the separate supply of pre-mixed feed mixture and ultraparticles to the vibrating mixer. The efficiency of the mixing process in a vibrating mixer was evaluated using three sections of a feed mixture with ultraparticles of iron, zinc, cobalt and molybdenum powders. The optimal working parameters are achieved at the angular velocity of the vibrating mixer – 3...7 rad / s, the oscillation frequency – 9...37 Hz, the vibration mixing time – 113...333 s, the opening time of the controlled dispenser (feeding ultrafine particles into the vibrating mixer) – 5 ... 15 s. When using a controlled ultraparticle detector and a spherical impeller, the particles in the feed were distributed more evenly. The lowest effect on the value of this indicator in three sections of the feed mixture was noted for zinc (up to 2.7 %), followed by iron powders (up to 3.6 %) and molybdenum (up to 9.5 %). The developed equipment had the greatest impact on the uniformity of cobalt distribution (up to 20.5 %). At the same time, the deviation from the norm (0.5 mg/kg) did not exceed 2 %, that is, the value of the qualitative indicator of uniformity of distribution was equal to 98 %.

Ключевые слова: дозирующее устройство, точность дозирования, агрегация, ультрадисперсные частицы, диффузионные потоки, коэффициент сцепления, относительная влажность, мелкодисперсный материал, высота падения материала, наклон дозатора, вибрационные и электромеханические воздействия, сегрегация, цифровое производство.

Key words: dosing device, dosing accuracy, aggregation, ultrafine particles, diffusion flows, coupling coefficients, relative humidity, fine-dispersed material, material drop rate, dispenser slope, vibration and electromechanical effects, segregation, digital production.

Разработка оборудования нового поколения дозирования и смешивания компонентов при изготовлении кормов, а также его совершенствование – актуальная и востребованная в современных условиях задача [1, 2].

При этом на сегодняшний день выполнено недостаточно исследований по анализу потерь качественных

характеристик витаминно-минеральных компонентов, в том числе ультрадисперсных частиц. Имеются существенные недостатки при смешивании и дозировании компонентов смеси. Это не всегда позволяет учитывать свойства наноматериалов и их изменения в процессе смешивания. Для повышения эффективности процесса

смешивания необходимо контролировать режимы подачи ультрадисперсных частиц [3, 4, 5].

Один из приоритетов развития перерабатывающего производства – технологическая модернизация производственных процессов. В особенности это касается вопросов повышения энергоэффективности и энергосбережения, решение которых возможно только при использовании современного смесительного оборудования вибрационного типа. Особое место среди них занимают менее энергоемкие силовые электромеханические вибрационные системы периодического действия с виброизбудителем [3, 6].

Процесс интенсификации развития ведущих отраслей сельского хозяйства (животноводства, птицеводства и др.) невозможен без серьезной кормовой базы. При формировании современной кормовой базы необходимо учитывать условия быстрого развития животных и птицы, которое возможно при потреблении определенной нормы (суточной) питательных веществ и микроэлементов. Процесс подачи необходимого количества указанных компонентов возможен с комбинированными кормами. Однако при этом возникает проблема их эффективного смешивания, что связано с очень низкими нормами ввода микроэлементов, высокой их плотности, а также микро- и наноразмерах частиц [7].

В современных условиях, наряду с модернизацией технической базы и повышением эффективности, важнейшим резервом роста конкурентоспособности отечественных производителей сыпучих и не сыпучих смесей служит процесс совершенствования системы управления. В этом случае становится очевидным факт необходимости принятия не отдельных мер, а формирования системного развития на основе вибрационных технологий [3, 8].

Для смешивания компонентов кормовых смесей в современных условиях используют широкое разнообразие технических средств. Они делятся по назначению на специальные, универсальные и комбинированные и могут быть периодического и непрерывного действия. На сегодняшний день наибольшее распространение получили порционные дозаторы со смесителями периодического действия [9].

На сегодняшний день наиболее изучен процесс внедрения ультрадисперсных частиц в виде водной суспензии после предварительного диспергирования. Однако подобная технология не предусматривает длительного хранения приготовленной смеси. Поэтому более приемлемым считают приготвление сухих кормосмесей [3, 10].

Изучение процесса сухого дозирования ультрадисперсных частиц с последующим смешиванием с компонентами кормосмеси привело к выводу, что структурно дозирующее устройство представляет собой функционал большого числа факторов, которые можно разделить на две большие группы: систематические и случайные. Систематические – это производительность питателя основного резервуара в момент закрытия задвижки, высота падения смеси, случайные – форма и площадь поверхности частиц смеси, их взаимное расположение, коэффициент взаимной адгезии частиц смеси и материала конструкции (смесителя-дозатора и приемной камеры), влажность материала смеси и др. [11, 12].

Наиболее эффективным при смешивании комбикормов на сегодняшний день считают процесс вибрации с использованием соответствующей техники. В этом случае его ускорение может достигать десятков раз. Вибрационные машины значительно проще и эффективнее обычных, потребляют меньше энергии [9, 13]. Вместе с интенсификацией технологических процессов произ-

ходит качественное улучшение конечной продукции. При перемешивании сыпучих материалов достигается высокая степень однородности смеси, при формировании обеспечиваются одинаковые свойства по всему объему продукта.

Для реализации вибрационных технологических процессов, используемых в перерабатывающей промышленности, необходимо специальное оборудование или комплектующие для модернизации традиционной техники [6].

Цель исследований – повышение равномерности распределения ультрадисперсных частиц в кормосмеси.

Методика. Известно, что использование простого наполнителя негативно сказывается на распределении ультрачастиц в составе кормовой смеси, а также приводит к снижению продуктивного эффекта у животных и ухудшению состояния их иммунной системы. При этом рост и развитие животных будет проходить неравномерно, увеличится неоднородность стада [14]. Нормализованная по физико-механическим свойствам кормовая смесь обеспечивает получение всего ассортимента микроэлементов всеми животными в заданном количестве и оптимальном соотношении.

Процесс производства кормовых смесей изучен достаточно подробно. Однако применение в современных условиях ультрачастиц, в частности металлов, для ее обогащения привело к появлению эффекта электростатичности. Это происходит в силу того, что ультрачастицы взаимодействуют с материалами бункеров, каналов движения смеси, смесителя, дозатора и др. В результате получения электростатического заряда эти частицы прилипают к поверхностям перечисленных конструкций, сделанных из электронепроводящих материалов.

Это приводит к образованию сегрегационных участков, в результате нарушается степень однородности смеси. Поэтому актуально изучение процесса концентрации электростатических зарядов и их влияния на формирование однородности смеси. Для этого необходимы две составляющие – теоретические предпосылки и эксперименты с высокоскоростным оборудованием, способным фиксировать движение ультрачастиц в процессе образования смеси [4, 6].

Потери энергии в дозирующих и смешивающих устройствах могут достигать 20...30 %. Поэтому необходимо исследовать их формирование и определить возможные варианты снижения. Для этого следует изучить процесс подачи ультрадисперсных частиц и дать теоретическое обоснование их взаимодействия с компонентами кормосмеси в процессе смешивания. Возможным вариантом учета энергетических потерь может послужить введение соответствующего теоретического уравнения.

Анализ результатов фундаментальных исследований процессов образования и расходования энергии привел к формированию гипотезы о возможности применения изученных процессов движения потоков кормосмеси для снижения энергетических потерь при дозировании и смешивании, а также обоснования конструктивных параметров дозатора и смесителя [4, 6, 9].

С учетом изложенного, базовую модель строили на предположении о том, что движение смеси с ультрадисперсными частицами имеет ламинарный режим. Поэтому возникла необходимость в поиске критерия, позволяющего отразить возможный процесс перехода режима движения от ламинарного к турбулентному и обратного, исходя из теоретических работ Есеева Е. А. [4].

Известно, что уравнения движения ультрачастицы в проекциях на абсолютные полярные оси R и Φ имеют вид:

$$\begin{cases} \rho_1 \frac{dV_R}{dt} = -k_1 \cdot V_R + 2k_2 \cdot \rho \cdot \omega (U_\phi - V_\phi), \\ \rho_1 \cdot \frac{dV_\phi}{dt} = -k_1 \cdot (U_\phi - V_\phi) + g \cdot (\rho_1 - \rho) + 2k_2 \cdot \rho \cdot \omega \cdot V_R, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ_1 – плотность микрочастицы, кг/м³; V_R , V_ϕ – абсолютные радиальная и тангенциальная составляющие скорости ультрачастицы, м/с; k_1 – коэффициент сопротивления (по Стоксу) движению ультрачастицы, относительно дисперсионной среды, для случая $Re < 1,0$, кг/м³·с; ρ – плотность среды, кг/м³; ω – частота, с⁻¹; k_2 – безразмерный коэффициент, с использованием которого приближенно учитываются поправки на допущения, связанные с распространением теоремы Жуковского для плоско-параллельного обтекания бесконечного цилиндра на рассматриваемый случай ультрачастицы произвольной формы в кольцевом пространстве; g – ускорение свободного падения, м/с²; t – время, с.

В результате Есеевым Е. А. была введена переменная $U = U_\phi - V_\phi$, для предельного случая, когда $\rho_1 = \rho$, в системе (1) представляется в более простом виде:

$$\begin{cases} \frac{dV_R}{dt} = -\frac{k_1}{\rho_1} \cdot V_R + 2k_2 \cdot \omega \cdot U, \\ \frac{dU}{dt} = \omega(1 - 2k_2) \cdot V_R - \frac{k_1}{\rho_1} \cdot U. \end{cases} \quad (2)$$

Перейдя в системе (2) к относительным переменным, получим:

$$t' = t / \tau, \quad U' = U / \tilde{U}, \quad V'_R = V_R / \tilde{U}$$

Тогда она примет вид:

$$\begin{cases} \frac{dV'_R}{dt'} = -\frac{\tau \cdot k_1}{\rho_1} \cdot V'_R + 2k_2 \cdot \omega \cdot \tau \cdot U', \\ \frac{dU'}{dt'} = (1 - 2k_2) \cdot \omega \cdot \tau \cdot V'_R - \frac{\tau \cdot k_1}{\rho_1} \cdot U', \end{cases} \quad (3)$$

где τ – время виброрелаксации ультрачастицы, с; \tilde{U} – характерная скорость, м/с.

С учетом результатов исследований Есеева Е. А., кинетику межфазных взаимодействий возможно представить с рядом допущений на основании диффузионных процессов с точки зрения сопряжения и переключения потоков. Процесс дозирования ультрадисперсных частиц испытывает многовекторный эффект многокомпонентной системы, которая в свою очередь находится в многопараметрическом поле внешних воздействий [4].

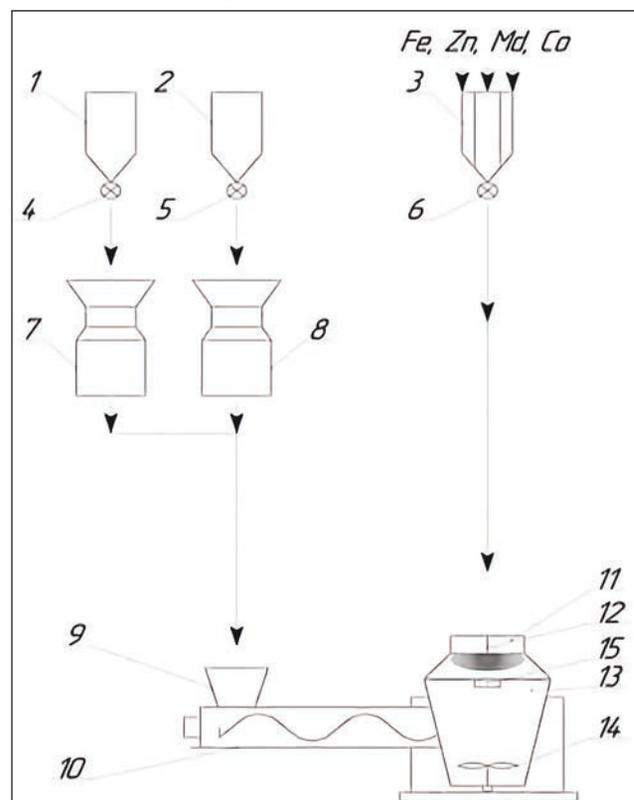
Для повышения эффективности процесса распределения ультрадисперсных частиц в составе кормосмеси с учетом теоретических выражений (1)...(3) была разработана технологическая линия (см. рисунок). Она реализует технологию, которая включает предварительное смешивание кормосмеси и дальнейшее ее смешивание в вибросмесителе с ультрадисперсными частицами. Процесс смешивания ультрадисперсных частиц с кормосмесью в вибраторном смесителе изучали в лабораторных условиях.

Анализ проб кормосмеси выполняли в аккредитованном центре ФНЦ биологических систем и агротехнологий с использованием атомно-абсорбционного спектрометра «Формула ФМ 400» и «Квант-2АТ», микроволнового пробоотборника ПЛП-01. В ходе проведения исследований измеряли степень однородности кормосмеси, а именно равномерность распределения ультрадисперсных частиц в пробах, которые отбирали после смешивания (продолжительностью до 360 с) зер-

нового и минерального сырья по трем сечениям: 1 – верхнее, 2 – среднее, 3 – нижнее.

Процесс смешивания компонентов кормосмеси исследовали при изменении работы управляемого дозатора (время открытия (подача ультрадисперсных частиц в вибросмеситель) – от 3 до 19 с) и вибросмесителя (угловая скорость резервуара – от 2 до 10 рад/с, частота колебаний – от 2 до 58 Гц, время вибросмешивания – от 25 до 377 с). Шаг варьирования составлял соответственно 2 с, 1 рад/с, 7 Гц и 44 с, общее число опытов – 5040. В процессе эксперимента учитывали степень однородности проб кормосмеси с ультрадисперсными частицами. Движение ультрадисперсных частиц, их взаимодействия с компонентами кормосмеси и распределение после смешивания (в пробах кормосмеси) изучали в лабораторных условиях. Ультрадисперсные частицы дозировали в следующих концентрациях: Fe (d=80...90 нм) – 20 мг/кг; Zn (d=60...70 нм) – 1,2 мг/кг; Mo – (d=85...90 нм) – 0,5 мг/кг; Co (d=50...70 нм) – 0,5 мг/кг кормосмеси.

Результаты и обсуждение. Процесс производства комбинированных кормов с ультрадисперсными частицами (см. рисунок) происходит следующим образом. В бункер 1 загружают зерновое сырье, в бункер 2 минеральное сырье в виде хлорида натрия, или карбоната кальция, или смеси этих компонентов в пропорции 1:1. В бункер 3 загружаются ультрадисперсные частицы микроэлементов (Fe, Cu, Zn, Mo и др.). Кроме того, можно загружать смесь ультрадисперсных частиц в пропорциях, необходимых для приготовления соответствующей кор-



Линия приготовления кормосмеси с ультрадисперсными частицами: 1 – бункер для зернового сырья, 2 – бункер для минерального сырья, 3 – бункер для ультрадисперсных частиц, 4 – управляемая заслонка бункера 1, 5 – управляемая заслонка бункера 2, 6 – управляемый дозатор бункера 3, 7 – дробилка зернового сырья, 8 – дробилка минерального сырья, 9 – конусный приемник смесителя, 10 – смеситель, 11 – цилиндрический распределитель, 12 – лопастной веер, 13 – вибросмеситель, 14 – крыльчатка, 15 – видеокамера.

Табл. 1. Результаты экспериментов (фрагмент)

№ п.п.	Варьируемые показатели				Степень однородности смеси
	время от-крытия управляе-мого доза-тора, с	угловая скорость виброс-месителя, рад/с	частота колебаний, Гц	время виброс-мешива-ния, с	
19	5	3	9	113	0,93
333	7	4	16	113	0,93
664	11	4	16	157	0,94
756	13	5	23	201	0,94
3658	13	5	23	245	0,96
4530	15	6	30	245	0,93
4752	15	7	30	289	0,95
5020	15	7	37	333	0,98

мосмеси. Из бункеров 1 и 2 компоненты смеси попадают через управляемые заслонки 4 и 5 в дробилки 7 и 8 соответственно. После дробления зерновое и минеральное сырье подаются через конусный приемник 9 в смеситель 10 (патент на изобретение RU№ 2800937). Процесс смешивания регулируется изменением угла наклона смесителя 10 относительно горизонтальной плоскости. Смешанные компоненты, зерновое и минеральное сырье, подаются в вибросмеситель 13. Одновременно через управляемый дозатор 6 ультрадисперсные частицы подаются в цилиндрический распределитель 11 и попадают на лопасть

Табл. 2. Результаты измерений проб на содержание ультрадисперсных частиц

Показатель	Пробы по сечениям без регулируемого дозатора			Пробы по сечениям с регулируемым дозатором		
	1	2	3	1	2	3
Коэффициент однородности смеси	0,80±0,01	0,80±0,01	0,78±0,01	0,98±0,01	0,94±0,01	0,93±0,01
Железо, мг/кг	19,0	19,6	19,8	19,7	19,8	19,9
Цинк, мг/кг	1,15	1,18	1,2	1,16	1,18	1,2
Кобальт, мг/кг	0,38	0,39	0,44	0,45	0,47	0,49
Молибден, мг/кг	0,42	0,42	0,46	0,46	0,46	0,48
Обменная энергия, мДж/кг	11,4	11,4	11,5	11,4	11,7	11,8
Питательность корма, ед./кг	1,14	1,14	1,16	1,16	1,19	1,2

вер 12. В нижней части вибросмесителя 13 вертикально расположена сферическая крыльчатка 14. Сформированная смесь в вибросмесителе 13 находится во взвешенном состоянии. Образуется воздушно-продуктовая, равно сбалансированная по объему кормосмесь. Процесс движения ультрадисперсных частиц фиксируется высокочувствительной видеокамерой 15.

Управляемый дозатор работает в автоматическом режиме. Регулировка величины проходного сечения осуществляется посредством увеличения или уменьшения степени перекрытия, расположенных в нем, лепестков. Применение подобного способа дозирования ультрадисперсных частиц обусловлено их незначительным количеством в общем объеме кормосмеси. При этом вероятность равномерного распределения частиц при непосредственной подаче в вибросмеситель 13 повышается. Следует отметить, что ультрадисперсные частицы обладают повышенной поверхностной энергией и находятся в нестабильном состоянии.

По результатам проведенного эксперимента (табл. 1) наибольшая степень однородности смеси была отмечена при времени открытия управляемого дозатора (подача ультрадисперсных частиц в вибросмеситель) – 5...15 с, угловую скорость резервуара вибросмесителя – 3...7 рад/с, частоте колебаний – 9...37 Гц, времени вибросмешивания – 113...333 с.

Результаты исследований по определению степени влияния дозирования и смешивания на структурно-механические и энергетические показатели кормосмеси свидетельствуют, что при использовании управляемого дозатора для ультрадисперсных частиц 6 и цилиндрического распределителя 11 (см. рисунок) происходит более интенсивное и однородное смешивание компонентов

зернового и минерального сырья. При этом, вероятно, значительную роль играет применение сферической крыльчатки 14, которая формирует псевдооживленное состояние кормосмеси, благодаря чему рабочее пространство вибросмесителя заполняется более равномерно. Затем, по мере снижения интенсивности подачи исходных компонентов в смеситель, часть ультрадисперсных частиц начинает «прилипать» к его стенкам. Это обусловлено формированием статического напряжения при движении использовавшихся ультрадисперсных частиц металлов.

Наименьшая разница между пробами кормосмеси по трем сечениям, с дозатором и без дозатора, степень однородное отмечена у цинка. Разница по трем сечениям смеси в пробах составляла более 2 % (0...2,7 %). Наибольшая разница в пробах по железу составила 3,6 % (в верхнем сечении). Для молибдена максимальная в опыте разница отмечена в верхнем сечении – 9,5 %. Самую высокую разницу наблюдали у кобальта. В среднем сечении она составила 20,5 % (табл. 2). Следовательно, наибольшее воздействие разработанное оборудование оказало на повышение равномерности распределения кобальта. Отклонение от нормы (0,5 мг/кг) составило менее 2 %, то есть качественный показатель равномерности распределения был равен 98 %.

Выводы. Оптимальными режимами работы смесителя обеспечивающими степень однородности кормосмеси с внесением ультрадисперсных частиц на уровне 93...98 % следует считать время открытия управляемого дозатора (подача ультрадисперсных частиц в вибросмеситель) – 5...15 с, угловую скорость резервуара вибросмесителя – 3...7 рад/с, частоту колебаний – 9...37 Гц, продолжительность вибросмешивания – 113...333 с.

Наибольшее воздействие разработанное оборудование оказало на равномерность распределения кобальта. Отклонение от нормы (0,5 мг/кг) составило менее 2 %, то есть качественный показатель равномерности распределения составил 98 %.

Литература

1. Сыроватка В.И., Жданова Н.В., Обухов А.Д. Исследование кинетики движения ингредиентов лечебных кормов в шаровом смесителе // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2021. № 2. С. 59-63.
2. Мудров А.Г. Совершенствование смесителя «Турбула» // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14. № 3 (54). С. 108-111.
3. Построение математической модели процесса смешивания компонентов комбикормов / А.Г. Белов, В.А. Шахов, С.А. Соловьёв и др. // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2019. № 4.(78). С. 140-143.
4. Есеев Е.А. Разработка процессов пневмосепарации с классификацией дисперсных материалов в динамическом кольцевом пространстве применительно к мукомольно-крупяному производству: дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук. Барнаул, 2008. 216 с.

5. Chkalova M., Shahov V., Pavlidis V. Effectiveness analysis of ways or-ganizing production of combined feeds // *Engineering for Rural Development*. 2019. Vol. 18. P. 462–468.
6. Современные инновационные подходы приготовления микродобавок в специализированной установке / В. А. Пушко, В. А. Шахов, С. В. Лебедев и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2018. № 4. Т. 32. С. 65–68.
7. Каширин Д. Е., Полякова А. А. Исследование влияния конструктивно-технологических параметров смесителя – обогатителя концентрированных кормов на энергоемкость процесса смешивания // *Вестник КрасГАУ*. 2016. № 9(120). С. 107–113.
8. Баротермическая обработка ингредиентов комбикормов / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Н. Расказов и др. // *Инженерные технологии и системы*. 2019. Т. 29. № 3. С. 428–442.
9. Булатов С. Ю. Повышение эффективности приготовления кормов путем совершенствования конструкции и технологического процесса кормоприготовительных машин // *Пермский аграрный вестник*. 2017. № 1(17). С. 55–64.
10. Development of equipment for producing feed mixtures with nanoparticles of scarce micronutrients / A. Belov, V. Shakhov, Y. Ushakov, et al // *Engineering for Rural Development*. 2020. Vol. 19. P. 1757–1762.
11. Аналитическая модель смешивания сыпучих растительных компонентов / В. В. Матюшев, А. С. Аветисян, И. А. Чаплыгина и др. // *Вестник КрасГАУ*. 2023. № 4 (193). С. 202–209.
12. Савиных П. А., Турубанов Н. В., Зырянов Д. А. Результаты экспериментальных исследований процесса смешивания в горизонтальном ленточном смесителе // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. № 7. С. 32–36.
13. Theoretical studies of the interaction between screw surface and material in the mixer / A. Marczuk, V. Sysuev, A. Aleshkin? et al. // *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 4. P. 1–29. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/4/962> (дата обращения: 11.09.2023). doi: 10.3390/ma14040962.
14. Морфо-биохимические показатели крови у бройлеров при коррекции рациона солями и наночастицами Си / Е. А. Сизова, В. П. Королев, Ш. А. Макаев и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2006. Т. 51. № 6. С. 903–911.

Поступила в редакцию 04.10.2023

После доработки 25.10.2023

Принята к публикации 14.11.2023

Правила для авторов

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

Авторам высылается журнал в электронном виде.

С аспирантов плата за публикацию не взимается.

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

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