

ISSN 2500-2627

Номер 4

Июль - Август 2023



РОССИЙСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ НАУКА

www.sciencejournals.ru

Научно-теоретический журнал



Растениеводство, защита и биотехнология растений

- А. А. Гончаренко, А. В. Макаров, Т. В. Семенова, В. Н. Точилин, Н. А. Клочко, М. С. Гончаренко, П. А. Плотников**
Генетический анализ признака масса 1000 зерен у межлинейных гибридов озимой ржи (*Secale cereale* L.) 3
- Е. Н. Вологжанина, Г. А. Баталова**
Оценка адаптивности ярового пленчатого овса по урожайности и качеству зерна в условиях Кировской области 8
- А. В. Пасынков, А. А. Завалин, Е. Н. Пасынкова**
Совершенствование метода прогноза содержания белка в зерне пшеницы 13
- С. А. Ушакова, А. А. Тихомиров, В. В. Величко, С. В. Хижняк, С. А. Герасимов, И. В. Грибовская, Н. А. Сурин**
Экспериментальное моделирование влияния условий минерального питания на растения ярового двурядного ячменя в условиях светокультуры 18
- Н. Г. Власенко, С. В. Бурлакова, М. Т. Егорычева**
Биофунгициды в технологии выращивания яровой пшеницы 25
- Л. Е. Колесников, И. И. Новикова, В. А. Павлюшин, Е. В. Зуев, Ю. Р. Колесникова**
Моделирование эффективности штаммов *Bacillus subtilis* в зависимости от природно-климатических факторов при возделывании мягкой пшеницы 29
- А. М. Шпанев, В. В. Смук**
Вклад факторов в формирование засоренности полей зернотравянопропашного севооборота на северо-западе Российской Федерации 38

Агропочвоведение и агроэкология

- Н. Е. Завьялова, М. Т. Васбиева, Д. Г. Шишков, И. В. Казакова**
Азотный режим дерново-подзолистой почвы при длительном применении различных видов и сочетаний минеральных удобрений 43
- Н. Н. Дубенок, А. В. Лебедев**
Динамика таксационных показателей лесных культур сосны по данным долговременных наблюдений 48

Зоотехния и ветеринария

- Н. А. Безбородова, М. В. Бытов, Н. А. Мартынов, О. В. Соколова, М. В. Петропавловский, С. В. Вольская**
Оценка частоты распространения аллельных вариантов полиморфизма экзона 2 гена *BoLA-DRB3* с использованием ПЦР-ПДРФ 52
- О. В. Татуева, Д. Н. Кольцов**
Влияние голштинизации на продуктивное долголетие коров черно-пестрой породы в условиях Смоленской области 56
- А. Е. Черницкий, И. А. Шкуратова, А. П. Порываева, Е. В. Печура, О. Г. Томских**
Информативность L-лактата крови и интегральных лейкоцитарных индексов для прогнозирования тяжелого течения микоплазмоза у телят 62

Хранение и переработка сельскохозяйственной продукции

- М. А. Смирнов, И. И. Бартенев, О. М. Нечаева**
Перспективы использования химических и физических способов защиты сырья в семеноводстве сахарной свеклы 67

Contents

Crop production, plant protection and biotechnology

A. A. Goncharenko, A. V. Makarov, T. V. Semenova, V. N. Tochilin, N. A. Clochko, M. S. Goncharenko, P. A. Plotnikov Genetic analysis of the 1000 grain weight trait in interlinear hybrids of winter rye (<i>Secale cereale</i> L.)	3
Vologzhanina E. N., Batalova G. A. Assessment of the adaptability of spring film oats in terms of yield and grain quality in the conditions of the Kirov region	8
A. V. Pasynkov, A. A. Zavalin, E. N. Pasynkova Improvement of the method of protein content prediction in wheat kernels	13
S. A. Ushakova, A. A. Tikhomirov, V. V. Velichko, S. V. Khizhnyak, S. A. Gerasimov, I. V. Gribovskaya, N. A. Surin Experimental modeling of the influence of mineral nutrition conditions on the plants of spring double	18
N. G. Vlasenko, S. V. Burlakova, M. T. Egorycheva Biofungicides in the cultivation technology of spring wheat	25
L. E. Kolesnikov, I. I. Novikova, V. A. Pavlyushin, E. V. Zuev, Yu. R. Kolesnikova Modeling the effectiveness of <i>Bacillus subtilis</i> strains depending on natural and climatic factors in the soft wheat cultivation	29
A. M. Shpanev, V. V. Smuk The contribution of factors to the formation of pollution of grain-grass-rowed crops in the north-west of the Russian Federation	38

Agro-soil science and agroecology

N. E. Zavyalova, M. T. Vasbieva, D. G. Shishkov, I. V. Kazakova Nitrogen regime of soddy-podzolic soil with long-term use of different types and combinations of mineral fertilizers	43
N. N. Dubenok, A. V. Lebedev Dynamics of stand indicators of pine plantations according to the data of long-term observations	48

Animal science and veterinary medicine

N. A. Bezborodova, M. V. Bytov, N. A. Martynov, O. V. Sokolova, M. V. Petropavlovsky, S. V. Volskaya Evaluation of allelic frequencies distribution of the <i>BoLA-DRB3</i> gene polymorphisms within exon 2 using PCR-RFLP	52
O. V. Tatueva, D. N. Koltsov The effect of holstein on the productive longevity of cows' black-and-white breed in the conditions of the Smolensk region	56
A. E. Chernitskiy, I. A. Shkuratova, A. P. Poryvaeva, E. V. Pechura, O. G. Tomskikh Informative value of blood l-lactate and integral leukocyte indices for predicting severe course of mycoplasmosis in calves	62

Storage and processing of agricultural products

M. A. Smirnov, I. I. Bartenev, O. M. Nechaeva Prospects of using chemical and physical methods of raw material protection in sugar beet seed-growing	67
--	----

Растениеводство, защита и биотехнология растений

УДК 633.14:575.222.6

DOI: 10.31857/S2500262723040014, EDN: JWQQLX

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИЗНАКА МАССА 1000 ЗЕРЕН У МЕЖЛИНЕЙНЫХ ГИБРИДОВ ОЗИМОЙ РЖИ (*Secale cereale* L.)**А.А. Гончаренко**, академик РАН, **А.В. Макаров**, доктор сельскохозяйственных наук, **Т.В. Семенова**, **В. Н. Точилин**, **Н.А. Ключко**, **М.С. Гончаренко**, кандидаты сельскохозяйственных наук, **П.А. Плотников**Федеральный исследовательский центр «Немчиновка»,
143026, Московская обл., пос. Новоивановское, ул. Агрохимиков, 6
E-mail: goncharenko05@mail.ru

Исследования проводили с целью количественной оценки вклада аддитивной, доминантной и эпистатической дисперсий в общую генетическую вариацию признака массы 1000 зерен для повышения эффективности селекции гетерозисных гибридов озимой ржи. Опыты выполняли в Московской области. Исходным материалом послужили 10 мужски стерильных гомозиготных линий, несущих цитоплазму типа Пампа. Их скрещивали с двумя мужски фертильными линиями-тестерами *mf* H-842 и *mf* H-1247. Тестовые скрещивания провели в 2019 г. на двух изолированных участках по схеме топкросса. Полученные гибриды и их родительские формы испытывали в 2020–2021 гг. на делянках 8 м² в двухкратной повторности. Тест на эпистаз и разложение генетической вариации на аддитивную и доминантную компоненты осуществляли по методу Jinks J., et al. (1969). Основную роль в детерминации признака крупнозерности играет аддитивное взаимодействие генов, а также неполное доминирование. Отмечено устойчивое соотношение этих взаимодействий по годам: доля аддитивных эффектов варьировала на уровне 83,9...84,7%, доминантных – 15,3...16,1%. Степень доминирования $\sqrt{H1/D}$ была меньше единицы и также слабо варьировала по годам. То есть доминантные аллели, влияющие на крупнозерность, не полностью подавляют действие рецессивных. По этой причине простые межлинейные гибриды наследуют промежуточный фенотип. Наиболее крупнозерные гибриды (с массой 1000 зерен 29,3...30,7 г) отмечены при скрещивании крупнозерных линий *ms* H-1054, *ms* H-649 и *ms* H-1090 с крупнозерным тестером *mf* H-1247. При синтезе коммерческих гибридов ржи необходимо стремиться к тому, чтобы все родительские формы были крупнозерными. Для создания таких линий целесообразно использовать методы рекуррентного отбора, а также конвергентную и кумулятивную селекцию.

GENETIC ANALYSIS OF THE 1000 GRAIN WEIGHT TRAIT IN INTERLINEAR HYBRIDS OF WINTER RYE (*Secale cereale* L.)**A.A. Goncharenko**, **A.V. Makarov**, **T.V. Semenova**, **V.N. Tochilin**, **N.A. Clochko**, **M.S. Goncharenko**, **P.A. Plotnikov**Federal Research Center «Nemchinovka»,
143026, Moskovskaya obl., pos. Novoivanovskoe, ul. Agrokhimikov, 6
E-mail: goncharenko05@mail.ru

The aim of the study is to quantify the contribution of additive, dominant and epistatic dispersions to the overall genetic variation of the 1000 grain weight trait to increase the efficiency of breeding heterotic hybrids of winter rye. The experiments were carried out at the experimental base of the Federal Research Center «Nemchinovka» (Moscow region). The starting material was 10 male sterile homozygous inbred lines carrying the Pump-type cytoplasm. These lines were crossed with two male fertile test lines: *mf* H-842 and *mf* H-1247. Test crosses were carried out in 2019 on two isolated plots according to the topcross scheme. The resulting hybrids and their parent forms were tested in 2020 and 2021 on plots of 8 m² in two-fold repetition. The test for epistasis and decomposition of the genetic variance into additive and dominant components was carried out by the method of Jinks J., Perkins L.M., Brees E.L. (1969). The data show that the additive interaction of genes, as well as incomplete dominance, plays the main role in determining the trait of granularity. A stable ratio of these interactions was established over the years: the proportion of additive effects varied at the level of 83.9–84.7%, and the proportion of dominant effects at the level of 15.3–16.1%. The indicator of the degree of dominance $\sqrt{H1/D}$ was less than one and varied slightly over the years. It follows from this that dominant alleles affecting gross grain do not completely suppress the effect of their recessive alleles. For this reason, simple interlinear hybrids inherit an intermediate phenotype compared to the parent forms. The most coarse-grained hybrids were obtained by crossing lines *ms* H-1054, *ms* H-649 and *ms* H-1090 with the coarsegrained tester *mf* H-1247. It is concluded that, in the synthesis of commercial rye hybrids, it is necessary to strive to ensure that all parent forms are gross-grained. To obtain such lines it is advisable to use methods of recurrent selection as well as convergent and cumulative breeding.

Ключевые слова: озимая рожь (*Secale cereale* L.), масса 1000 зерен, гомозиготная линия, тестер, гибрид, эпистаз, доминирование, аддитивное взаимодействие генов.

Key words: winter rye (*Secale cereale* L.), 1000 grain weight, homozygous line, tester, hybrid, epistasis, dominance, additive gene interaction.

Озимую рожь считают относительно мелкозерной культурой среди зерновых колосовых. И это несмотря на длительную народную селекцию, в процессе которой признак крупнозерности служил главным критерием отбора при улучшении местных сортов ржи. Это можно объяснить происхождением культуры. Изучая генезис культурной ржи, Н. И. Вавилов установил, что основным

исходным материалом для образования сорнополеовой ржи, из которой затем произошли местные сорта, послужили дикие мелкозерные виды [1]. Однако многие исследователи связывают слабый селекционный прогресс в улучшении этого признака с трудностью его изучения на основе гибридологического анализа с использованием инбредных линий [2, 3, 4]. Это обусловлено аллогамно-

стью вида *Secale cereale*, строгой самонесовместимостью и гетерогенностью сортов-популяций, а также трудностью создания гомозиготных линий, необходимых для синтеза межлинейных гибридов. Такие сложности возрастают, если изучаемый признак детерминируют многие гены, вклад каждого из которых невелик, а суммарный эффект в значительной степени модифицируется условиями внешней среды [5]. В совокупности это послужило причиной того, что информация о генетическом контроле признака масса 1000 зерен у ржи в литературе весьма ограничена.

Между тем рассматриваемый признак вносит существенный вклад в формирование урожая, характеризуется большим размахом фенотипического варьирования и высокой степенью наследуемости ($H^2 = 0,55...0,82$) [6]. Это делает его важным фактором в селекционном процессе. Известно, что при межлинейных скрещиваниях гибриды озимой ржи проявляют высокий эффект гетерозиса [7]. Рост урожайности происходит благодаря увеличению массы зерна с колоса и массы 1000 шт. У ржи варiances общей комбинационной способности по большинству признаков преобладает над вариансой специфической комбинационной способности, за исключением урожайности и массы 1000 зерен [8, 9]. Поэтому в ее гетерозисной селекции признак крупнозерности должен постоянно находиться в поле зрения селекционера, чтобы не допустить изменений в нежелательном направлении. Причина в том, что при инцухте растения подвергаются сильной инбредной депрессии [10], в результате которой масса 1000 зерен неуклонно снижается.

Генетическая варианса признака – часть его общей фенотипической вариансы, которая обусловлена влиянием генетических факторов. К основными ее составляемым относят аддитивную дисперсию, дисперсию доминирования и эпистаз. При выборе методов селекции весьма важно знать, какая из них преобладает [11]. Если основная часть вариансы обусловлена неаддитивным действием генов, например, сверхдоминированием или эпистазом, необходимо снизить интенсивность отбора, чтобы не сузить популяцию и не ухудшить ее генетические свойства. В случае массового отбора его эффективность будет зависеть от доли аддитивной генетической вариансы. При гетерозисной селекции особый интерес представляет варианса доминирования. Эта компонента вытекает из разницы между гетерозиготой и средним значением двух гомозигот – чем она больше, тем выше эффект гетерозиса у гибрида F_1 [12].

Однозначного мнения насчет соотношения этих компонент у исследователей нет. Польские ученые, исследуя генотипическую вариансу массы 1000 зерен у сортов ржи Даньковске злате, Карстен и Кустро, выявили большую разницу в коэффициентах наследуемости и пришли к заключению о преобладании эффектов доминантного действия генов над аддитивным [13]. Наследование массы 1000 зерен у короткостебельных линейно-штаммовых гибридов на стерильной основе шло по типу сверхдоминирования [14]. Изучая инцухт-депрессию у ржи, исследователи выявили широкий диапазон изменчивости этого признака и пришли к выводу, что его генетическое улучшение на гибридном уровне более перспективно, чем на популяционном [15].

В то же время имеются сведения о том, что аддитивный генетический компонент имеет важное значение в детерминации признака крупности зерна. При изучении структуры гетерозиса у межлинейных гибридов ржи было показано, что гетерозис по массе 1000 зерен проявлялся в 2 раза слабее, чем по массе зерна с колоса [16]. По результатам наших исследований, при сравнительной

оценке инбредных линий ржи в системе диаллельных скрещиваний, в генетическом контроле признака масса 1000 зерен большую роль играла аддитивная варианса, а степень доминирования была неполной [17]. В этих опытах средняя величина гипотетического гетерозиса по массе 1000 зерен составила 31,4%, а доля вклада общей комбинационной способности в генотипическую вариансу 60,6%.

Таким образом, детерминацию признака массы 1000 зерен у ржи контролируют различные типы взаимодействия генов, что, по-видимому, обусловлено генетическими различиями исходного материала, взятого для изучения. За последние годы в Федеральном исследовательском центре «Немчиновка» в рамках гибридной селекции ржи созданы новые гомозиготные линии со стерильной цитоплазмой типа Пампа, в связи с чем возникла необходимость изучить структуру генетической дисперсии этого признака и определить основные ее компоненты.

Цель исследования – количественная оценка вклада аддитивной, доминантной и эпистатической дисперсий в общую генетическую вариансу признака массы 1000 зерен для повышения эффективности селекции гетерозисных гибридов озимой ржи.

Методика. Эксперименты выполняли в 2019–2021 гг. на базе Федерального исследовательского центра «Немчиновка» (Московская обл.). Почва опытного участка – дерново-подзолистая, среднесуглинистая. Пахотный слой в годы исследований характеризовался высокой обеспеченностью подвижным фосфором и повышенной калием. Содержание гумуса в слое 0...20 см (по Тюрину) варьировало в диапазоне 1,4...2,1%, что характерно для средней окультуренности, $pH_{КС}$ изменялась в пределах 5,2...6,7 ед., Ng –0,94...3,50 мг/100 г. Доза азота при предпосевном внесении во все годы составляла 50 кг/га.

Самоопыленные линии создавали методом многократного инцухта растений из гибридных популяций от скрещивания различных сортов ржи с донорами самофертильности; мужски стерильные аналоги инбредных линий – методом насыщающих скрещиваний; простые межлинейные гибриды – путем скрещивания стерильных линий с фертильными. В качестве материнских родителей использовали 10 мужски стерильных линий, относящихся к немчиновскому генопулу: ms H-577, ms H-649, ms H-700, ms H-732, ms H-451, ms H-1054, ms H-1058, ms H-1078, ms H-1090, ms H-1185. За годы исследований они значительно различались по крупности зерна – наиболее мелкозерной была линия ms H-451 (24,4 г), а самой крупнозерной – линия ms H-1054 (28,3 г). В качестве отцовской формы были взяты мужски фертильные линии mf H-842 и mf H-1247, которые относятся соответственно к немчиновскому и саратовскому генопулам и служат закрепителями стерильности. По массе 1000 зерен они также существенно различались между собой: по среднему многолетним данным линия mf H-842 была более мелкозерной (23,5 г), чем mf H-1247 (27,5 г).

Тестовые скрещивания провели в 2019 г. на изолированных участках по схеме топкросса. Каждую материнскую линию высевали на делянке 5 м². В результате получили 20 межлинейных гибридов F_1 , полевые испытания которых вместе с родительскими формами проводили в 2020–2021 гг. на делянках площадью 8,0 м² в 2-х кратной повторности при норме высева 500 семян на 1 м².

Метеоусловия в годы испытаний сильно различались. В 2020 г. обильные осадки в июне и июле (выпало 274,6 мм при норме 161,7 мм) вызвали раннее и сильное полегание растений, что послужило причиной фор-

Табл. 1. Масса 1000 зерен у межлинейных гибридов F_1 и их материнских форм, г

Материнская линия	Гибрид F_1			Материнская линия
	тестер- опылитель mf H-842	тестер- опылитель mf H-1247	среднее по двум тестерам	
2020 г.				
ms H-577	24,0	24,6	24,3	22,5
ms H-649	24,5	24,8	24,6	23,2
ms H- 700	23,0	23,4	23,2	22,9
ms H-732	22,8	23,0	22,9	22,9
ms H-451	23,0	24,0	23,5	21,5
ms H-1054	23,8	23,4	23,6	22,4
ms H-1058	23,0	22,8	22,9	21,4
ms H-1078	22,2	21,8	22,0	20,0
ms H-1090	23,6	24,8	24,2	22,8
ms H-1185	20,4	23,4	21,9	21,8
Среднее	23,0	23,6	23,3	22,2
HCP ₀₅	1,8			
2021 г.				
ms H-577	33,0	35,4	34,2	30,1
ms H-649	34,7	35,6	35,2	32,5
ms H-700	35,1	35,0	35,0	32,9
ms H-732	35,3	35,0	35,2	32,2
ms H-451	30,8	32,4	31,6	27,3
ms H-1054	35,1	35,2	35,2	33,4
ms H-1058	33,2	34,6	33,9	32,2
ms H-1078	33,4	33,4	33,4	30,1
ms H-1090	35,9	36,5	36,2	32,4
ms H-1185	34,0	35,0	34,5	31,1
Среднее	34,0	34,8	34,4	31,4
HCP ₀₅	1,5			
Среднее за 2020–2021 гг.				
ms H-577	28,5	30,0	29,3	26,3
ms H-649	29,6	30,2	29,9	27,9
ms H-700	29,0	29,2	29,1	27,7
ms H-732	29,0	29,0	29,0	27,6
ms H-451	26,9	28,2	27,6	24,4
ms H-1054	29,5	29,3	29,4	28,3
ms H-1058	28,1	28,3	28,4	26,8
ms H-1078	27,8	27,6	27,7	25,0
ms H-1090	29,8	30,7	30,2	27,6
ms H-1185	27,2	29,2	28,2	26,5
Среднее	28,5±0,3	29,2±0,3	28,9±0,3	26,8±0,4

мирования очень низкой массы 1000 зерен. У мужских стерильных линий средняя величина этого показателя составила 22,2 г, у межлинейных гибридов – 23,3 г. В 2021 г. преобладала сухая и жаркая погода, осадков выпало 86,7% от многолетней нормы, растения не полегли и сформировали относительно крупное зерно: у мужских стерильных линий средняя масса 1000 зерен составила – 31,4 г, у межлинейных гибридов – 34,4 г.

Экспериментальные делянки убирали в фазе полной спелости и определяли массу 1000 зерен в пересчете на 14%-ную влажность. Среднюю пробу отбирали с каждой делянки.

Достоверность различий между вариантами оценивали методом дисперсионного анализа при уровне вероятности $P=0,95$. Проверку на наличие эпистаза и разложение генетической вариации на аддитивную и доминантную компоненты осуществляли по методу J. Jinks, L. M. Perkins, E. L. Brees [18] в интерпретации М. А. Федина, Д. Я. Силис и В. А. Драгавцева [19]. Экспериментальные данные подвергали дисперсионному анализу, который состоял из двух этапов – испытание на наличие эпистаза, а при его отсутствии на аддитивную и доминантную компоненты.

Результаты и обсуждение. Из-за сильного полегания растений в 2020 г. масса 1000 зерен у материнских линий была ниже, чем в 2021 г., на 9,2 г, у гибридов F_1 – на 11,1 г (табл. 1). Среднее превосходство гибридов F_1 над самоопыленными линиями по величине этого показателя в 2020 г. составило 5,0%, в 2021 г. – 9,5%. Важно отметить, что почти все гибриды F_1 с участием

тестера mf H-1247 продемонстрировали большее увеличение крупнозерности, по сравнению с генотипами, где тестером была мелкозерная линия mf H-842 (на 0,6 г в 2020 г. и на 0,8 г в 2021 г.). Лучшими по массе 1000 зерен за годы испытаний были гибриды F_1 , созданные с участием стерильных линий ms H-649, ms H-1090 и ms H-1054, сравнительно мелкозерными – при скрещивании обоих тестеров с линиями ms H-451 и ms H-1078.

За годы исследований эпистатические эффекты генов на 5%-ном уровне значимости выявить не удалось (табл. 2). На это указывают относительно низкие значения критерия $F_{факт.}$ по сравнению со стандартным $F_{табл.}$ (в 2020 г. $F_{факт.} = 2,3 < F_{табл.} = 3,2$; в 2021 г. $F_{факт.} = 2,2 < F_{табл.} = 3,2$). Следовательно, у изучаемых гибридов в генетической вариации признака масса 1000 зерен эпистатическая компонента достоверно не проявилась. Об отсутствии эпистатического действия генов по этому признаку сообщают и другие авторы [20].

Табл. 2. Тест на эпистатическое взаимодействие генов у межлинейных гибридов ржи по признаку масса 1000 зерен

Источник дисперсии	Сумма квадратов	Степень свободы	Средний квадрат	$F_{факт.}$	$F_{05 табл.}$
2020 г.					
Общая	47,0	19			
Повторности	1,9	1	1,9		
Линии	31,6	9	3,5	2,3	3,2
Ошибка	13,5	9	1,5		
2021 г.					
Общая	38,4	19			
Повторности	0,2	1	0,2		
Линии	26,1	9	2,9	2,2	3,2
Ошибка	12,1	9	1,3		

Отсутствие такого типа взаимодействия служит важным основанием для проведения дальнейшего анализа с целью выявления аддитивного взаимодействия и доминирования генов. Если эпистаз присутствует, то дальнейший анализ усложняется, так как этот феномен может существенно влиять на степень наследования признака, вызывая его усиление или ослабление [13].

Тест на аддитивное взаимодействие генов выявил достоверную значимость этого компонента (табл. 3): в 2020 г. $F_{факт.} = 3,9 > F_{табл.} = 3,2$; в 2021 г. $F_{факт.} = 7,9 > F_{табл.} = 3,2$. Это подтверждает более ранее наше заключение о том, что аддитивное взаимодействие генов – важный компонент генетической вариации [17]. Оно вносит основной вклад в генотипическую дисперсию многих признаков и служит главной причиной сходства между родственными генотипами.

Однако чисто аддитивный характер взаимодействия генов встречается сравнительно редко, чаще всего картина наследования более сложна и причины тому могут быть эффекты доминирования. Результаты нашего теста свидетельствуют, что этот компонент вариации достоверно влиял на изменчивость признака массы

Табл. 3. Тест на аддитивное взаимодействие генов у межлинейных гибридов ржи по признаку масса 1000 зерен

Источник дисперсии	Сумма квадратов	Степень свободы	Средний квадрат	$F_{факт.}$	$F_{05 табл.}$
2020 г.					
Общая	72,4	19			
Повторности	1,4	1	1,4		
Линии	56,4	9	6,3	3,9	3,2
Ошибка	14,6	9	1,6		
2021 г.					
Общая	124,4	19			
Повторности	0,7	1	0,7		
Линии	106,9	9	11,9	7,9	3,2
Ошибка	13,8	9	1,5		

1000 зерен во все годы исследований: в 2020 г. $F_{факт.} = 5,9 > F_{табл.} = 3,2$; в 2021 г. $F_{факт.} = 5,3 > F_{табл.} = 3,2$ (табл. 4). Важно отметить, что наличие доминирования в локусах, детерминирующих крупнозерность, вполне ожидаемо и подтверждается проявлением инбредной депрессии по этому признаку у самоопыленных линий ржи [15].

Табл. 4. Тест на доминирование аллельных генов у межлинейных гибридов ржи по признаку масса 1000 зерен

Источник дисперсии	Сумма квадратов	Степень свободы	Средний квадрат	$F_{факт.}$	$F_{05 табл.}$
2020 г.					
Общая	21,6	19			
Повторности	1,6	1	1,6		
Линии	17,1	9	1,9	5,9	3,2
Ошибка	2,9	9	0,3		
2021 г.					
Общая	28,2	19			
Повторности	0,3	1	0,3		
Линии	23,4	9	2,6	5,3	3,2
Ошибка	4,6	9	0,5		

Подтверждением изложенного может служить сравнительная оценка линий и гибридов по средним данным за годы испытания (см. табл. 1). Наиболее крупнозерные гибриды были получены при скрещивании крупнозерных линий ms Н-1054, ms Н-649 и ms Н-1090 с крупнозерным тестером mf Н-1247, а самые мелкозерные – при сочетании мелкозерных линий ms Н-451 и ms Н-1078 с мелкозерным тестером mf Н-842.

Однако следует учитывать, что долевое соотношение эффектов аддитивных и доминантных генов значимо варьирует в зависимости от метеоусловий года [20]. С целью выяснения стабильности этого соотношения были рассчитаны генетические параметры D и $H1$, отражающие вклад соответственно аддитивных и доминантных эффектов генов. В 2020 г. они находились на уровне соответственно 5,40 и 1,04, в 2022 г. – 11,35 и 2,05. Обращает на себя внимание их устойчивое соотношение по годам – доля аддитивных эффектов варьировала на уровне 83,9...84,7%, доминантных – 15,3...16,1%. Следовательно, в детерминации признака масса 1000 зерен преобладающую роль играет аддитивное взаимодействие генов. Однако и доля аллельного доминирования была существенной. На степень его проявления указывает соотношение $H1/D$, величина которого в наших опытах была меньше единицы и очень мало изменялась по годам: в 2020 г. – 0,19, в 2022 г. – 0,18. Причем степень доминирования (показатель $\sqrt{H1/D}$) была неполной и также практически не изменялась по годам: в 2020 г. – 0,44, а в 2021 г. – 0,43. Это указывает на устойчивое проявление неполного доминирования признака, то есть доминантная аллель, детерминирующая крупнозерность, не полностью подавляет действие рецессивного аллеля, в результате чего гетерозиготные растения гибрида F_1 формируют промежуточный генотип по массе 1000 зерен.

Выводы. Экспериментально доказано отсутствие неаллельного взаимодействия генов в генетической детерминации признака масса 1000 зерен у межлинейных гибридов озимой ржи. В его наследственную вариацию определяющий вклад вносят аддитивные и частично доминантные эффекты генов. Особенность состояла в том, что степень доминирования была неполной и слабо варьировала по годам. Однако соотношение генетических параметров D и $H1$, измеряющих вклад соответственно аддитивных и доминантных эффектов генов, было относительно устойчивым по годам и варьировало на уровне 83,9...84,7% для параметра D и 15,3...16,1% для параметра $H1$. Из этого следует, что в гетерозисной селекции

озимой ржи первостепенную важность приобретает поиск инбредных линий с высокой общей и специфической комбинационной способностью и выявление таких комбинаторных пар, которые проявляют высокий эффект гетерозиса по массе 1000 зерен. Важно также стремиться к тому, чтобы все родительские формы синтезируемых гибридов были крупнозерными.

В наших опытах наиболее крупнозерные гибриды (на уровне 29,3...30,7 г) были созданы при скрещивании относительно крупнозерных линий ms Н-1054, ms Н-649 и ms Н-1090 с крупнозерным тестером mf Н-1247. В практической селекции для получения таких линий целесообразно использовать методы рекуррентного отбора, а также конвергентные и кумулятивные схемы скрещиваний.

Литература.

1. Вавилов Н.И. О происхождении культурной ржи // Труды Бюро по прикладной ботанике. 1917. № 7/10. С. 561–590.
2. Гончаренко А. А. Актуальные вопросы селекции озимой ржи. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. 369 с.
3. Пономарева М. Л., Пономарев С. Н. Научные основы селекции озимой ржи. Казань: Изд-во ФЭН, 2019. 351 с.
4. Урбан Э. П., Гордей С. И. Селекция и проблемы возделывания гетерозисных гибридов F_1 озимой ржи в Республике Беларусь // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. 2018. Т. 56. № 4. С. 448–455. doi: 10.29235/1817-7204-2018-56-4-448-455.
5. Becker H. Pflanzenzüchtung. 2 überarbeitete Auflage. Stuttgart. Verlag Eugen Ulmer. 2010. 368 p.
6. Кобылянский В. Д. Рожь. Генетические основы селекции. М.: Колос, 1982. 271 с.
7. Miedaner T., Laidig F. Hybrid Breeding in Rye (*Secale cereale* L.) // Advances in Plant Breeding Strategies: Cereals. 2019. Vol. 5. P. 343–372.
8. Селекция инбредных линий озимой ржи на общую и специфическую комбинационную способность и ее связь с селекционными признаками / А. А. Гончаренко, С. А. Ермаков, А. В. Макаров и др. // Сельскохозяйственная биология. 2019. Т. 54. № 1. С. 88–92.
9. Wilde P., Miedaner T. Hybrid Rye Breeding. // In Rabanus-Wallace. M. T. Stein N. The Rye Genome. Compendium of Plant Genomes. Stuttgart: Springer. Cham. 2021. P. 13–41. doi: 10.1007/978-3-030-83383-12.
10. Wolski T. Studies on the inbreeding of rye // Genetica Polonica. 1970. Vol. 11. No. 1. P. 1–26.
11. Кедров-Зихман О. О., Шарено Т. И., Белько Н. Б. Оценка наследуемости основных хозяйственных признаков ржи в системе диалельных скрещиваний // Доклады АН БССР. 1985. Т. 29. № 8. С. 750–754.
12. Association between line per se and testcross performance for eight agronomic and quality traits in winter rye / T. Miedaner, D. D. Schwegler, P. Wilde, et al. // Theoretical and Applied Genetics. 2014. Vol. 127. No. 1. P. 33–41.
13. Wegrzyn S., Grochowski L. Zmienność fenotypowa i genotypowa dla kilku cech w populacjach żyta diploidalnego // Hod. Rosl. aklimat. i nasienn. 1978. Vol. 22. No. 2–3. P. 165–178.
14. Кобылянский В. Д., Лапиков Н. С., Катерова А. Г. Взаимосвязь, изменчивость и наследование селекционных признаков озимой ржи // Труды по прикладной ботанике генетике и селекции. 1975. Т. 55. С. 56–59.
15. Wricke G. Inzuchtdepression und Genwirkung beim Roggen // Theor. and appl. Genet. 1973. Vol. 43. No. 2. P. 83–87.

16. Geiger H. H., Wahle G. Struktur der Heterosis von complex Merkmalen bei Winterroggen - Einfachhybriden. // Z. Pflanzenzuchtung. 1978. Vol. 80. No. 3. P. 198–210.
17. А. А. Гончаренко, С. В. Крахмалев, С. А. Ермаков и др. Генетический анализ признаков продуктивности озимой ржи в диаллельных скрещиваниях // Вестник Саратовского госагроуниверситета. 2012. № 10. С. 25–29.
18. Jinks J. L., Perkins J. M., Brees E. L. A general method of detecting additive, dominance and epistatic variation for metrical traits. II. Application to inbred lines // Heredity. 1969. Vol. 24. No. 1. P. 45–57.
19. Федин М. А., Силис Д. Я., Дражавцев В. А. Двутестерный метод в генетике количественных признаков // Сб. Генетический анализ количественных и качественных признаков с помощью математико-статистических методов. М.: ВНИИТЭИсельхоз, 1973. С. 97–101.
20. Змієвська Е. А., Егоров Д. К. Успадкування цінних ознак у гібридів F_1 озимого жита // Селекція і насінництво. Харків. 2015. Вип. 108. С. 92–98.

Поступила в редакцию 27.03.2023
После доработки 29.05.2023
Принята к публикации 11.07.2023

ОЦЕНКА АДАПТИВНОСТИ ЯРОВОГО ПЛЕНЧАТОГО ОВСА ПО УРОЖАЙНОСТИ И КАЧЕСТВУ ЗЕРНА В УСЛОВИЯХ КИРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Е.Н. Вологжанина, кандидат сельскохозяйственных наук, Г.А. Баталова, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук

Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого,
610007, Киров, ул. Ленина, 166 А
E-mail: helen.vol@list.ru

Исследования проводили с целью оценки сортов и линий ярового пленчатого овса по способности формировать стабильные урожаи зерна высокого качества в условиях Кировской области, выделения перспективных высокоадаптивных генотипов, наиболее полно реализующих потенциал урожайности в меняющихся условиях среды. Материалом для исследования служили 11 сортов и перспективных линий. В качестве стандарта использовали включенный в Государственный реестр сорт Кречет. Эксперименты выполняли в 2020–2022 гг. Наиболее близкие к оптимальным условия для роста и развития овса сложились в 2020 и 2022 гг., когда продолжительность периода от всходов до выметывания составила в среднем 46 и 52 суток, а средняя по сортам урожайность – 6,18 и 6,21 т/га соответственно. Наибольшей урожайностью характеризовались перспективные линии 91h18 (6,14 т/га) и 41h18 (5,78 т/га), которые на 0,95 и 0,59 т/га соответственно превосходили стандарт Кречет. При этом линия 91h18 обладала высоким уровнем пластичности ($b_i=1,13$) и стабильности ($S_i^2=0,00$) по признаку «урожайность». Достаточно высокой пластичностью и стабильностью по урожайности ($b_i=1,12$, $S_i^2=0,01$) и показателям качества зерна (для белка – $b_i=1,12$, $S_i^2=0,20$, жира – $b_i=1,11$, $S_i^2=0,00$) характеризуется сорт интенсивного типа Медведь. Высокие показатели пластичности ($b_i=1,42$) и стабильности ($S_i^2=0,00$) по признаку «содержание белка в зерне» отмечены у линии 162h15. Наибольшим содержанием жира в зерне (5,3...5,6 %) характеризовались линии 178h13, 4h14, 41h18. Почти у всех изученных сортов и линий отмечена высокая стабильность этого признака ($S_i^2=0,00...0,21$). При повышении пластичности и стабильности сортов по урожайности наблюдали снижение показателей качества зерна, а также тесную отрицательную связь между содержанием белка в зерне и урожайностью ($r=-0,83$). Установлена положительная зависимость высокой степени продолжительности периода «всходы – выметывание» с ГТК ($r=0,97$) и урожайностью ($r=0,79$).

ASSESSMENT OF THE ADAPTABILITY OF SPRING FILM OATS IN TERMS OF YIELD AND GRAIN QUALITY IN THE CONDITIONS OF THE KIROV REGION

E.N. Vologzhanina, G.A. Batalova

Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky
610007, Kirov, ul. Lenina, 166 A
E-mail: helen.vol@list.ru

Studies were carried out in order to assess the varieties and lines of spring covered oats by the ability to form stable high quality grain yields in the conditions of the Kirov region; to identify promising highly adaptive, plastic genotypes that most fully realize their yield potential in changing environmental conditions. The results of the study of 11 varieties and promising lines of spring covered oats in the nursery of competitive variety testing in the Kirov region in the period from 2020 to 2022 are presented. The Krechet varieties were used as standards generally accepted in the Volga-Vyatka region (during the research period), which are included in the State Register. The most optimal conditions for the growth and development of oats were in 2022 and 2020 when the duration of the period from seedlings to heading averaged 52 and 46 days, and the average yield in varieties was 6.21 and 6.18 t/ha, respectively. Promising lines 91h18 (6.14 t/ha) and 41h18 (5.78 t/ha), which is 0.95 and 0.59 t/ha higher than the Krechet standard. Were characterized by the highest yield while line 91h18 had a high level of plasticity ($b_i=1.13$) and stability ($S_i^2=0.00$) based on «yield» parameter. A fairly high plasticity ($b_i=1.12$) and stability ($S_i^2=0.01$) in terms of yield and grain quality indicators (for protein - $b_i=1.12$, $S_i^2=0.20$, fat - $b_i=1.11$, $S_i^2=0.00$) is characterized by an intensive 'Medved' type variety. High indices of plasticity ($b_i=1.42$) and stability ($S_i^2=0.00$) on the basis of the parameter «grain protein content» were noted at line 162h15. The highest grain fat content was characterized for lines 178h13 (5.3 %), 4h14 (5.4 %), and 41h18 (5.6 %). Almost all the studied varieties have a high stability ($S_i^2=0.00...0.21$) of the sign. When increasing the plasticity and stability of varieties in terms of yield, a decrease in these grain quality indicators was observed, as well as a close negative relationship of the grain protein content with yield ($r=-0.83$). A high degree of positive dependence of the duration of the germination-heading period with HTC ($r=0.97$) and yield ($r=0.79$) has been established.

Ключевые слова: овес (*Avena sativa* L.), урожайность, период вегетации, пластичность, стабильность, условия вегетации.

Key words: oats (*Avena sativa* L.), yield, growing season, plasticity, stability, growing conditions.

Овес – универсальная культура, продукцию которой используют как на продовольственные, так и на кормовые цели. Благодаря высокому кормовым и пищевым качествам зерна, а также адаптивным свойствам ее считают одной из основных культур во многих регионах России [1, 2, 3].

В современных условиях большое внимание уделяют выращиванию экологически безопасной продукции

высокого качества с минимальными затратами на производство. Наибольшую ценность имеют сорта с высоким содержанием белка в зерне, количество которого напрямую зависит от почвенно-климатических условий и варьирует по годам [4]. Среди зерновых культур именно продукция овса характеризуется максимально сбалансированным аминокислотным составом белка, высоким содержанием жира, крахмала и других микро-

Табл. 1. Метеорологические условия периода вегетации овса

Период вегетации	Сумма эффективных температур выше 10 °С			Сумма осадков, мм			ГТК		
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Посев – всходы	120,4	213,7	116,8	41,4	2,1	9,0	3,41	0,10	0,77
Всходы – вымётывание	702,4	699,2	719,0	127,4	64,4	198,7	1,81	0,92	2,76
Вымётывание – созревание	724,5	811,9	772,4	131,8	139,9	111,1	1,82	1,72	1,44
Всходы – созревание	1379,4	1489,0	1470,3	244,4	185,3	309,8	1,77	1,24	2,11

элементов, что играет важную роль при приготовлении комбикормов для крупного рогатого скота [5, 6]. Природно-климатические условия Кировской области характеризуются нестабильностью – годы с избыточным увлажнением чередуются с засушливыми. Поэтому существует потребность в сортах, отвечающих современным технологическим процессам в растениеводстве, способных формировать стабильные урожаи зерна высокого качества, как в благоприятных, так и в стрессовых условиях среды [7, 8, 9].

Цель исследований – оценить сорта и линии ярового пленчатого овса по способности формировать стабильные урожаи зерна высокого качества в условиях Кировской области и выделить перспективные высокоадаптивные, пластичные генотипы, наиболее полно реализующие потенциал урожайности в меняющихся условиях среды.

Методика. Работу проводили в 2020–2022 гг. на базе Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н. В. Рудниченко (Кировская область, г. Киров). Изучали 11 перспективных и включенных в Госреестр РФ сортов и линий ярового пленчатого овса питомника конкурсного испытания. В качестве стандарта использовали общепринятый в период исследований по Волго-Вятскому региону, включенный в Государственный реестр, сорт Кречет. Индекс условий среды (I_s), коэффициент регрессии (b_s) и индекс стабильности (S_i^2) определяли по S. A. Eberhart, W. A. Russell в редакции В. З. Пакудина, Л. М. Лопатиной [10], вклад генотипа и условий среды в формирование урожайности – по Н. А. Плохинскому [11], гидротермический коэффициент (ГТК) – по А. И. Селянинову [12], показатель селекционной ценности (Sc) и гомеостатичность (Hom) – по В. В. Хангильдину [13].

Почва опытного участка – дерново-подзолистая среднесуглинистая на элювии пермских глин с небольшой мощностью перегнойного горизонта. Содержание гумуса низкое – 2,43...2,51 % (по И. В. Тюрину, ГОСТ 26213-91), подвижного фосфора и калия – 334...339 мг/кг и 200...245 мг/кг почвы соответственно (по А. Т. Кирсанову, ГОСТ 26207-91), кислотность – 5,7...6,0 ед. рН (ГОСТ 26212-91).

Анализ метеорологических условий в период исследований выполнен по данным Кировского областного центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Условия вегетации 2020 г. в период от посева до всходов характеризовались неустойчивой по температуре погодой, от очень тёплой до холодной с небольшими, временами сильными, осадками. В первой половине июля преобладала очень теплая и жаркая, преимущественно сухая или с небольшими, временами сильными, ливнями погода.

В период вегетации 2021 г. чаще было тепло и жарко. Повышенный температурный режим мая обусловил интенсивное накопление эффективного тепла, на 31 мая сумма эффективных температур достигала 320,4 °С, что на 120 °С больше средней многолетней (табл. 1). В июне и июле наблюдали от умеренно теплой до жаркой, сухую или с периодически выпадающими грозовыми дождями разной интенсивности погоду. Вегетационный период 2022 г. отличался крайне контрастными метеорологическими условиями. В мае отмечали небольшие, в отдельные дни значительные, осадки. Среднесуточная температура воздуха составляла 6...11 °С, что на 1...6 °С ниже обычных значений. В июне и июле преобладала тёплая, временами жаркая, погода, периоды с частыми дождями чередовались с сухими. Август характеризовался аномально жаркой погодой с редкими дождями.

Максимальное за годы исследований количество осадков (309,8 мм) в период «всходы–созревание» отмечено в 2022 г., что привело к переувлажнению (ГТК=2,11). Самые высокие суммы эффективных температур наблюдали в 2021 (1489,0 °С) и 2022 (1470,3 °С) гг. Наиболее благоприятные условия для посева овса сложились в 2020 г. (ГТК=3,41).

Результаты и обсуждение. На формирование урожайности и качества зерна овса влияют, как условия среды, так и генотип сорта. Кировская область – зона рискованного земледелия в связи с неустойчивыми, часто меняющимися в период роста и развития зерновых культур погодными условиями [14]. В годы исследований они были контрастными, что отразилось на продолжительности вегетации и, как следствие, формировании урожайности и качества зерна овса. Значительное влияние метеоусловия оказывают в период наиболее активного роста и развития овса «всходы – вымётывание», когда происходит формирование вегетативных и закладка генеративных органов [15, 16].

В наших исследованиях наиболее благоприятные условия для развития овса сложились в 2022 г. при переувлажнении в период от всходов до вымётывания. Обильные осадки (198,7 мм) и повышенный температурный фон (сумма эффективных температур – 719,0 °С) привели к увеличению продолжительности периода «всходы – вымётывание» в среднем до 52 суток (табл. 2). При этом по сортам отмечали незначительное варьирование признака ($V=1,4\%$). Метеоусловия 2020 г. (ГТК=1,81) были близки к сложившимся в 2022 г. и достаточно благоприятными для роста и развития овса.

Табл. 2. Зависимость продолжительности периода «всходы – вымётывание» от условий года

Год	Продолжительность периода, сутки		Вариабельность продолжительности периода по сортам (V), %
	min...max	среднее	
2020	44...48	46	2,9
2021	37...42	40	3,1
2022	51...53	52	1,4

Наибольшую вариабельность признака (3,1 %) в среднем по сортам наблюдали в менее благоприятных условиях 2021 г. Известно, что чем выше среднесуточная температура воздуха, тем быстрее происходит вымётывание метелки и созревание зерна [7, 15]. В наших исследованиях теплая погода и дефицит влаги (сумма осадков 64,4 мм) так же привели к уменьшению продолжительности периода от всходов до вымётывания в 2021 г. в среднем до 40 суток. Согласно коэффициенту вариации, сорта овса по-разному реагировали на стрессовые условия. Минимальная в опыте продолжительность периода от всходов до вымётывания (37 суток) отмечена у сорта Кировский 2 в 2021 г., максимальная (53 суток) – у линий 178h13 и 25h18 в 2022 г.

Табл. 3. Параметры экологической адаптивности и пластичности сортов пленчатого овса по признаку «урожайность зерна»

Сорт, линия	Урожайность, т/га				V , %	b_i	S_i^2	Sc	Hom
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	среднее					
162h15	6,74	3,45	5,81	5,33±0,98	31,8	1,08	0,46	2,73	5,10
178h13	5,53	3,34	4,94	4,60±0,65	24,6	0,72	0,19	2,78	8,54
Медведь	6,39	3,42	6,30	5,37±0,98	31,5	1,12	0,01	2,87	5,75
Кировский 2	6,78	3,67	6,22	5,56±0,96	29,8	1,08	0,17	3,01	5,99
25h18	5,98	4,06	6,49	5,51±0,74	23,2	0,83	0,12	3,45	9,77
4h14	5,74	3,82	5,82	5,13±0,65	22,1	0,75	0,00	3,36	11,58
79h14	5,03	2,37	6,08	4,49±1,10	42,6	1,22	0,52	1,75	2,85
91h18	7,12	4,17	7,12	6,14±0,98	27,8	1,13	0,00	3,59	7,49
41h18	6,14	3,91	7,28	5,78±0,99	29,7	1,08	0,62	3,10	5,78
50h18	6,30	3,62	6,47	5,46±0,92	29,3	1,06	0,01	3,06	6,55
Кречет (стандарт)	6,25	3,58	5,75	5,19±0,82	27,3	0,93	0,14	2,98	7,12
Среднее	6,18	3,58	6,21	5,32±0,87					
HCP ₀₅	0,60	0,20	0,60						
I_j	0,86	-1,74	0,88						

В среднем за годы исследований наибольшую стабильность продолжительности периода вегетации продемонстрировали линии 25h18 и 91h18 ($S_i^2=0,02$), при среднем уровне пластичности ($b_i=0,89$). Наименее стабильной по величине этого показателя по годам была линия 41h18 ($S_i^2=1,18$), что подтверждает высокий уровень коэффициента вариации ($V=14,4\%$).

Установлена тесная положительная связь продолжительности периода «всходы–выметывание» с ГТК ($r=0,97$), суммой эффективных температур ($r=0,88$) и количеством осадков ($r=0,97$) (статистически значимо при $p \leq 0,05$) в этот период.

Метеоусловия оказали влияние как на продолжительность периода вегетации, так и на урожайность зерна. При благоприятной погоде в период «всходы — кушение», достаточном увлажнении и жаркой погоде в период созревания в 2020 г. (ГТК=1,82) и 2022 г. (ГТК=1,44) отмечена наибольшая средняя по сортам урожайность — 6,18 т/га ($I_j=0,86$) и 6,21 т/га ($I_j=0,88$) соответственно (табл. 3). Менее благоприятные погодные условия 2021 г. способствовали уменьшению продолжительности периода от всходов до выметывания (период, когда растение накапливает наибольшее количество питательных веществ) и, как следствие, снижению урожайности. Установлена высокая достоверная (статистически значимая при $p \leq 0,05$) положительная связь урожайности с продолжительностью периода вегетации «всходы — выметывание» ($r=0,79$) и ГТК ($r=0,78$). В разрезе изученных генотипов наибольшая урожайность отмечена у линий 41h18 (5,78 т/га) и 91h18 (6,14 т/га), у которых она была выше, чем у стандарта Кречет, на 0,59 т/га и 0,95 т/га соответственно.

Более полную характеристику сорта позволяет дать оценка по параметрам пластичности и фенотипической стабильности. К наиболее ценным по этим показателям можно отнести сорт Медведь и линию 91h18, у которых отмечен высокий уровень пластичности ($b_i=1,12$ и 1,13) и стабильности ($S_i^2=0,01$ и 0,00 соответственно). При этом линия 91h18 характеризуется высокой селекционной ценностью ($Sc=3,59$) и средним уровнем гомеостаза ($Hom=7,49$). Наименее продуктивная линия 79h14 отличалась самой высокой отзывчивостью на улучшение условий возделывания ($b_i=1,22$). Однако при их ухудшении урожайность снижается, что подтверждает высокий коэффициент вариации ($V=42,6\%$) и низкая стабильность ($S_i^2=0,52$) признака. Схожие показатели характерны для линии 41h18 ($b_i=1,08$, $S_i^2=0,62$). Высокая селекционная ценность и гомеостатичность характерны для линий 25h18 и 4h14, которые слабо реагируют на изменение условий возделывания ($b_i=0,83$ и 0,75) и в неблагоприятных условиях при минимальных затратах формируют стабильный, ($S_i^2=0,12$ и 0,00) на уровне стандарта Кречет,

урожай. Урожайность линии 25h18 составила 5,51 т/га, 4h14 — 5,13 т/га, при 5,19 т/га у стандарта.

Важная характеристика сорта — не только высокий стабильный урожай, но и его хорошее качество. За период исследований отмечена тесная (при $p \leq 0,05$) отрицательная связь содержания белка в зерне с урожайностью ($r=-0,83$) и показателем ГТК ($r=-0,86$) в период «всходы — выметывание». Отмечена значимая (при $p \leq 0,05$) положительная зависимость количества белка от суммы эффективных температур в период «выметывание — созревание» ($r=0,73$) и количества выпавших осадков ($r=0,74$).

Погодные условия, сложившиеся в 2022 г. негативно отразились на содержании белка в зерне овса ($I_j=-1,46$) и обусловили большую изменчивость признака ($V=8,1\%$ при 4,1 % в 2021 г.). В 2021 г. среднее по сортам содержание белка составило 14,6%, что на 4% выше, чем в 2022 г. (табл. 4). Среди изученных генотипов у линии 162h15 отмечены наибольшая пластичность и стабильность, а также высокая степень соответствия признака условиям внешней среды (генетическая гибкость — 12,89).

У линии 79h14 с высокой пластичностью и низкой стабильностью по признаку «урожайность» наблюдали средней степени пластичность ($b_i=1,00$), высокие показатели стабильности ($S_i^2=0,07$), селекционной ценности ($Sc=1,75$), генетической гибкости (13,08) и эффекта генотипа (0,39) по содержанию белка в зерне. В благоприятных условиях произрастания она способна формировать высокие урожаи зерна (6,08 т/га в 2022 г.) со стабильно высоким содержанием белка (15,0 % в 2022 г.). Пластичный и стабильный по урожайности сорт Медведь также характеризуется высокой пластичностью ($b_i=1,12$), средней стабильностью ($S_i^2=0,20$), и генетической гибкостью (12,55) по признаку «содержание белка в зерне».

Табл. 4. Показатели адаптивности и стрессоустойчивости по признаку «содержание белка» в зерне

Сорт, линия	Содержание белка, %			b_i	S_i^2	Sc	Генетическая гибкость	Эффект генотипа
	min*	max*	среднее					
162h15	10,1	15,7	12,2±1,8	1,42	0,00	7,84	12,89	0,07
178h13	9,5	14,4	11,7±1,4	1,11	0,97	7,71	11,93	-0,36
Медведь	10,2	14,9	12,2±1,4	1,12	0,20	8,34	12,55	0,06
Кировский 2	9,8	14,5	12,1±1,4	1,02	1,34	8,19	12,17	0,00
25h18	10,6	13,7	11,7±1,0	0,79	0,19	9,05	12,13	-0,39
4h14	10,6	13,6	12,0±0,9	0,62	0,89	9,37	12,10	-0,13
79h14	11,2	15,0	12,5±1,2	1,00	0,07	9,33	13,08	0,39
91h18	10,5	14,5	12,1±1,2	0,95	0,72	8,70	12,48	-0,03
41h18	10,8	14,8	12,4±1,2	0,95	0,63	9,04	12,80	0,27
50h18	11,1	14,3	12,2±1,1	0,83	0,19	9,44	12,69	0,14
Кречет (стандарт)	9,6	15,0	12,1±1,6	1,19	1,36	7,76	12,28	0,02

* min — минимальные значения признака; max — максимальные значения признака.

У линии 25h18 как по урожайности, так и по содержанию белка отмечали низкую пластичность и средней степени стабильность, что свидетельствует о ее слабой реакции на улучшение условий выращивания, соответствующей экстенсивному типу. Для линий 91h18 и 50h18 характерна конкуренция признаков, то есть при высокой пластичности и стабильности по урожайности наблюдали низкую пластичность и стабильность по содержанию белка.

Высокое содержание жира – важная составляющая для кормопроизводства, которая определяет питательность зерна. В среднем по сортам отмечено незначительное варьирование признака от 7,2 % у линии 41h18 до 10,9 % у линии 25h18. Вегетационный сезон 2022 г. был наиболее благоприятным для образования жира в зерне овса (5,6 %), при индексе условий среды $I_f=0,47$, минимальное в опыте содержание – 4,7 % наблюдали в 2021 г. ($I_f=-0,42$).

В исследованиях О. А. Юсовой, П. Н. Николаева [1] отмечена тесная положительная связь между содержанием белка и жира в зерне овса. В наших исследованиях наблюдали тесную (статистически значимая при $p \leq 0,05$) обратную корреляционную зависимость между содержанием жира и белка ($r=-0,67$), при положительной зависимости содержания жира от количества осадков ($r=-0,81$) и ГТК ($r=-0,64$) в период «выметывание – созревание», высокой положительной от суммы эффективных температур ($r=0,79$), количества осадков ($r=0,82$) и ГТК ($r=0,82$) периода «всходы – выметывание».

При возделывании овса на продовольственные цели ценятся сорта с низким содержанием жира в зерне, на фуражные – с высоким. В разрезе изученных генотипов наибольшее содержание жира отмечено в продукции линий 41h18 – 5,6 %, 4h14 – 5,4 %, 178h13 – 5,3 % (табл. 5), что подтверждает величина показателя эффекта генотипа (0,43; 0,29; 0,15 соответственно).

Табл. 5. Показатели адаптивности и стрессоустойчивости по признаку «содержание жира» в зерне

Сорт, линия	Содержание жира, %			b_i	S_i^2	Sc	Генетическая гибкость	Эффект генотипа
	lim	opt	среднее					
162h15	4,8	5,7	5,2±0,3	0,99	0,00	4,38	5,23	0,04
178h13	4,8	5,9	5,3±0,3	1,19	0,00	4,34	5,34	0,15
Медведь	4,6	5,6	5,1±0,3	1,11	0,00	4,22	5,15	-0,02
Кировский 2	4,4	5,4	4,9±0,3	1,09	0,00	3,98	4,88	-0,27
25h18	4,5	5,4	4,8±0,3	1,12	0,05	3,98	4,96	-0,30
4h14	4,8	5,8	5,4±0,3	0,91	0,21	4,56	5,30	0,29
79h14	4,7	5,6	5,2±0,3	1,07	0,01	4,27	5,15	0,01
91h18	4,8	5,7	5,2±0,3	1,03	0,01	4,34	5,22	0,02
41h18	5,1	5,9	5,6±0,2	0,83	0,04	4,84	5,51	0,43
50h18	4,6	5,4	5,0±0,2	0,68	0,18	4,18	4,99	-0,19
Кречет	4,6	5,4	5,0±0,3	0,99	0,00	4,18	5,01	-0,16
(стандарт)								

Для продовольственного использования по признаку «содержание жира» в зерне подойдут сорта Кировский 2 и Кречет, линии 25h18 и 50h18, у которых величина этого показателя варьирует от 4,8 до 5,0 %. Почти у всех сортов и линий признак отличается высокой стабильностью ($S_i^2=0,00...0,05$). Менее стабильно его проявление было линий 50h18 и 4h14, при этом они имели слабую реакцию на улучшение условий возделывания ($b_i=0,68$ и 0,91 соответственно). У линий 4h14 и 41h18 отмечена высокая степень соответствия условиям внешней среды (генетическая гибкость) и селекционная ценность по признаку. Наибольшей отзывчивостью на изменение условий среды отличались линии 178h13, 25h18 и сорт Медведь ($b_i=1,19, 1,12, 1,11$ соответственно).

При этом для сорта Медведь и линии 178h13 характерна высокая селекционная ценность (4,22 и 4,34

соответственно). У высокоурожайной линии 91h18 наблюдали высокую пластичность ($b_i=1,03$), стабильность ($S_i^2=0,01$) и селекционную ценность ($Sc=4,34$) по содержанию жира в зерне.

Выводы. Таким образом, в годы исследований (2020–2022 гг.) наблюдали варьирование урожайности в среднем по изученным сортам ($V=1,4...3,1$ %), содержания белка ($V=4,1...8,1$ %) и жира ($V=3,1...7,5$ %) в зерне овса, обусловленное изменчивостью климатических условий. Отмечена высокая зависимость урожайности зерна ($r=0,78$) и показателей его качества (для белка $r=-0,86$, для жира $r=0,82$) от ГТК в период «всходы – выметывание». В результате исследований по признаку «урожайность» выделены линии высокоинтенсивного типа 79h14 и 41h18, которые отзывчивы на улучшение условий среды, но при их ухудшении снижают урожайность. Высокой пластичностью и стабильностью по урожайности ($b_i=1,13$; $S_i^2=0,00$) и содержанию жира ($b_i=1,03$; $S_i^2=0,01$) в зерне характеризуется перспективная линия интенсивного типа 91h18. Линии 25h18 и 4h14 обладают низкой пластичностью ($b_i=0,83$ и 0,75), способны формировать стабильную ($S_i^2=0,12$ и 0,00) урожайность и могут быть отнесены к экстенсивному типу. У большинства изученных сортов и линий при высокой пластичности и стабильности по признаку «урожайность», происходит снижение этих показателей по качеству зерна. Так, у линии 50h18 наблюдали высокие показатели пластичности и стабильности по урожайности ($b_i=1,06$; $S_i^2=0,01$) и низкие по качеству зерна ($b_i=0,83$; $S_i^2=0,19$ по содержанию белка; $b_i=0,68$; $S_i^2=0,18$ – жира), у линии 79h14 обратная зависимость ($b_i=1,22$; $S_i^2=0,52$ – по урожайности; $b_i=1,00$; $S_i^2=0,07$ – по содержанию белка; $b_i=1,07$; $S_i^2=0,01$ – жира).

Выделен сорт интенсивного типа Медведь, сочетающий высокую стабильность и адаптивность как по урожайности, так и по показателям качества, зерно которого можно использовать как на продовольственные, так и на фуражные цели (содержание белка и жира 12,2 и 5,1 % соответственно). Линия 162h15 так же характеризуется высокой пластичностью по урожайности ($b_i=1,08$) и содержанию жира в зерне ($b_i=0,99$), высокой стабильностью содержания белка ($S_i^2=0,00$) и жира ($S_i^2=0,00$), генетической гибкостью по содержанию белка (12,89) и селекционной ценностью (4,38) по содержанию жира в зерне.

Литература.

1. Изменение урожайности и качества зерна овса с повышением адаптивности сортов / О. А. Юсова, П. Н. Николаев, И. В. Сафонова и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2020. № 181 (2). С. 42–49. doi: 10.31367/2079-8725-2021-74-2-75-80.
2. «Тоболяк» – сорт овса ярового универсального использования / М. Н. Фомина, Ю. С. Иванова, О. А. Пай и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2021. Т. 182. № 2. С. 107–113. doi: 10.30901/2227-8834-2021-2-107-113.
3. Фомина М. Н., Брагин Н. А. Влияние элементов технологии на реализацию биологического ресурса у сортов овса нового поколения в зоне северной лесостепи Тюменской области // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 3. С. 22–25. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10304.
4. Бездогов А. В., Ялунина А. Д. Оценка сортов голозерного овса по продуктивности и реакции на климатические условия Среднего Урала // Интерактивная наука. 2016. № 10. С. 94–101. doi: 10.21661/r-114765.

5. Власов А. Г., Халецкий С. П., Булавина Т. М. Адаптивные свойства и особенности формирования урожайности сортов овса белорусской селекции // Вестник Марийского государственного университета. Серия: сельскохозяйственные науки. Экономические науки. 2020. Т. 10. № 4 (24). С. 397–405. doi: 10.30914/2411-9687-2020-6-4-397-404.
6. Адаптивный потенциал образцов овса по химическим и физическим характеристикам зерна / В. И. Полонский, С. А. Герасимов, А. В. Сумина и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2022. № 183 (1). С. 57–75. doi: 10.30901/2227-8834-2022-1-57-75.
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. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10511.
8. Оценка адаптивных параметров коллекционных образцов овса плёчатого по урожайности в условиях Кировской области / М. В. Тулякова, Г. А. Баталова, И. Г. Лоскутов и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2021. № 182 (1). С. 72–79. doi: 10.30901/2227-8834-2021-1-72-79.
9. Параметры пластичности и стабильности сортов озимой твёрдой пшеницы по различным предшественникам в условиях Ростовской области / А. В. Алабушев, Т. С. Макарова, Н. Е. Самофалова и др. // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019. № 20 (6). С. 557–566. doi: 10.307766/2072-9081.2019.20.6.557-566.
10. Пакудин В. З., Лопатина Л. М. Оценка экологической пластичности и стабильности сортов сельскохозяйственных культур // Сельскохозяйственная биология. 1984. № 4. С. 109–113.
11. Плохинский Н. А. Биометрия. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1961. 364 с.
12. Селянинов Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165–177.
13. Хангильдин В. В. О принципах моделирования сортов интенсивного типа // Генетика количественных признаков сельскохозяйственных растений. М.: Наука, 1978. С. 111–116.
14. Methodology of Breeding Ecologically Resistant Varieties of Oats / G. A. Batalova, S. N. Shevchenko, E. M. Lisitsyn, et al. // Russian Agricultural Sciences. 2018. Vol. 44. No. 1. P. 3–6. doi: 10.3103/S1068367418010068.
15. Баталова Г. А. Овес в Волго-Вятском регионе. Киров: ООО «Орма», 2013. 288 с.
16. Вологжанина Е. Н., Баталова Г. А. Новые перспективные сорта и линии плёчатого и голозерного овса укосного и универсального направления // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 4. С. 3–7. doi: 10.31857/S2500262722040019.

Поступила в редакцию 26.05.2023

После доработки 21.06.2023

Принята к публикации 08.08.2023

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗА СОДЕРЖАНИЯ
БЕЛКА В ЗЕРНЕ ПШЕНИЦЫ**

А. В. Пасынков¹, доктор биологических наук, **А. А. Завалин²**, академик РАН,
Е. Н. Пасынкова¹, доктор биологических наук

¹Ленинградский научно-исследовательский институт сельского хозяйства «Белогорка» –
филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха,
188338, Ленинградская обл., Гатчинский р-н, пос. Белогорка, ул. Институтская, 1

²Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д. Н. Прянишникова,
127550, Москва, ул. Прянишникова, 31 а
E-mail: pasynkova.elena@gmail.com

Исследование проводили с целью расширения возможности использования разработанного уравнения множественной нелинейной регрессии, отражающего зависимость содержания белка в зерне пшеницы (Y , %) от количества сырой клейковины (X_p , %) и массы 1000 зерен (X_z , г). Показана возможность практического использования разработанного и трех усовершенствованных уравнений для прогноза белковости зерна пшеницы. Представлен алгоритм и результаты проверки прогностических возможностей и точности прогноза уравнений по независимым данным. Обобщение экспериментальных данных из 288 публикаций отечественных и зарубежных авторов с общим числом наблюдений $n = 4604$ на более чем трехстах сортах озимой и яровой мягкой и твердой пшеницы в период с 1959 по 2020 гг. в России и за рубежом (Албания, Беларусь, Болгария, Египет, Казахстан, Литва, Польша, Словакия и Украина) показало, что за пределы отклонений, допускаемых ГОСТ 10846-91 «Метод определения белка», выходило 75,5, или 16,4 %. При этом оправдываемость прогноза содержания белка достигала 83,6 %. Разработанные уравнения могут быть использованы для прогноза содержания белка практически во всех случаях, когда результаты анализа содержания белка и сырой клейковины в зерне пшеницы, а также масса 1000 зерен приводятся при фактической или фиксированной влажности либо в пересчете на абсолютно сухое вещество.

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF PROTEIN CONTENT PREDICTION IN WHEAT KERNELS

A.V. Pasynkov¹, A.A. Zavalin², E.N. Pasynkova¹

¹Leningrad Research Agricultural Institute «Belogorka»,
the branch of the Lorkh Federal Research Center of Potato Breeding,
188338, Leningradskaya obl., Gatchinskiy r-n, pos. Belogorka, ul. Institutskaya, 1

²Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry,
127550, Moskva, ul. Pryanishnikova, 31 a
E-mail: pasynkova.elena@gmail.com

The study was conducted in order to expand the possibilities of using the developed multiple nonlinear regression equation, reflecting the dependence of the protein content in wheat grain (Y , %) on the content of raw gluten (X_p , %) and the mass of 1000 grains (X_z , g). The possibility of practical use of the developed and three improved equations for predicting the protein content of wheat grain is shown. An algorithm and results of checking the prognostic capabilities and accuracy of predict equations from independent data are presented. Generalization of experimental data from 288 literature sources of domestic and foreign authors with a total number of observations $n = 4604$ on more than three hundred varieties of winter and spring soft and durum wheat grown in the period from 1959 to 2020 in Russia and abroad (Albania, Belarus, Bulgaria, Egypt, Kazakhstan, Lithuania, Poland, Slovakia and Ukraine) showed that the number of values that go beyond to limits regulated by GOST 10846-91 «Protein determination method» was 75.5 or 16.4 %. At the same time, the accuracy of prediction the protein content reached 83.6 %. The developed equations can be used to predict of protein content in almost all cases: when the results of the analysis of protein content and raw gluten in wheat kernel, as well the 1000-kernels weight are given at actual or fixed moisture content, or in terms of dry matter.

Ключевые слова: пшеница (*Triticum aestivum* L.), белок, масса 1000 зерен, сырая клейковина, множественный регрессионный анализ, прогноз содержания белка.

Key words: wheat (*Triticum aestivum* L.), protein, raw gluten, 1000-kernels weight, multiple regression analysis, protein content prediction.

Содержание белка, наряду с количеством сырой клейковины, служит одним из важнейших показателей качества зерна пшеницы, регламентируемых ГОСТом Р 52554–2006 «Пшеница. Технические условия», который, в свою очередь, определяет его пригодность для хлебопечения. Для определения содержания белка в зерне наиболее широкое распространение в последние годы получил химический метод Кьельдаля, который выступает стандартным методом, используемым ICC, AACC и ISO. При этом считается, что он довольно длительный, трудоемкий, относительно низко производительный и представ-

ляет определенную опасность для персонала и окружающей среды [1, 2].

Большую практическую значимость может иметь создание целостной системы уравнений, позволяющих прогнозировать наиболее важные показатели качества сельскохозяйственных культур на основе зависимостей изменений отдельных (наиболее простых и экспрессных в определении) качественных признаков [3]. Для пшеницы к их числу можно отнести содержание сырой клейковины, регламентируемое ГОСТ Р 52554–2006 и массу 1000 зерен [4, 5].

Известно, что в большинстве случаев зависимости между различными показателями в биологических исследованиях наиболее точно отражают нелинейные уравнения (логарифмические, полинома половинной степени, второго, третьего и более высоких порядков) [6, 7]. Не претендуя на полноту изложения опубликованных данных по вопросам прогнозирования содержания белка в зерне пшеницы, в научной литературе не удалось найти сведений, подтверждающих существование нелинейных уравнений множественной регрессии, отражающих его зависимость (Y) от содержания сырой клейковины (X_1) и массы 1000 зерен (X_2), что и определило исследование в этом направлении [8].

Проведение статистической обработки экспериментальных данных позволило получить уравнение множественной нелинейной регрессии, отражающее зависимость содержания белка в зерне пшеницы от содержания сырой клейковины и массы 1000 зерен [8]. Затем был разработан алгоритм и представлены результаты проверки точности прогноза белковости зерна по независимым данным, полученным другими авторами экспериментальным путем. Проверка прогностических возможностей и точности прогноза разработанного уравнения показала, что зависимость содержания белка в зерне пшеницы от содержания сырой клейковины и массы 1000 зерен подтверждается как при модификационных, так и генотипических различиях, что позволяет использовать такие данные в селекционном процессе. При этом уравнение со сравнительно высокой степенью вероятности может быть применено для прогноза содержания белка в зерне различных сортов озимой и яровой мягкой и твердой пшеницы, а также для косвенной проверки качества проведения аналитических работ [9].

Цель исследования – совершенствование уравнения множественной нелинейной регрессии, отражающего зависимость содержания белка в зерне пшеницы от содержания сырой клейковины и массы 1000 зерен.

Методика. Для разработки уравнения второго порядка, отражающего зависимость содержания белка (Y , %) в зерне пшеницы от содержания сырой клейковины (X_1 , %) и массы 1000 зерен (X_2 , г) использовали метод множественного нелинейного регрессионного анализа [7, 8, 9], алгоритм которого реализован в пакете статистических программ «Statistica 6» (Stat-Soft Inc., США):

$$Y(1) = 16,0570 + 0,6768X_1 - 0,0032X_1^2 - 0,7891X_2 + 0,0083X_2^2 \quad (1)$$

В разработанном уравнении содержание белка приведено к абсолютно сухому веществу (а.с.в.), а содержание сырой клейковины и масса 1000 зерен – к 12 % влажности или воздушно-сухому веществу (в.с.в.). Анализ разработанного уравнения и его графического отображения показал (рис. 1), что с увеличением содержания сырой клейковины содержание белка в зерне возрастает ($+X_1$). Однако каждое последующее повышение содержания сырой клейковины приводит к меньшему его увеличению, по сравнению с предыдущим ($+X_1 - X_1^2$). Следует отметить, что точка экстремума по содержанию клейковины находится за пределами полученных экспериментальных данных. Независимо от содержания клейковины, с возрастанием массы 1000 зерен содержание белка снижается ($-X_2$). При этом каждое последующее увеличение массы 1000 зерен замедляет темпы снижения белковости зерна ($-X_2 + X_2^2$). После того, как масса 1000 зерен достигает точки экстремума (47,5 г),

Табл. 1. Проверка точности прогноза белковости зерна различных сортов пшеницы (X_1 и X_2 – без учета влажности зерна или на в.с.в.; $Y_э$ – на а.с.в.)¹

Данные по X_1 , X_2 и $Y_э$ из [10]. n = 18. Озимая пшеница Подольнка (Украина)						Данные по X_1 , X_2 и $Y_э$ из [11]. n = 25. 5 сортов мягкой пшеницы (Албания)					
X_1	X_2	$Y_э$	Y_T	($N_э - N_T$)	ДО	X_1	X_2	$Y_э$	Y_T	($N_э - N_T$)	ДО
18,7	36,1	10,5	9,92	0,101	0,121	19,2	42,1	9,6	9,36	0,042	0,115
19,8	36,5	11,0	10,46	0,095	0,125	22,3	42,6	12,7	11,01	0,297*	0,134
21,2	36,5	11,2	11,22	-0,004	0,129	24,2	42,2	13,1	12,04	0,186*	0,139
22,7	36,8	11,9	11,97	-0,013	0,134	26,8	42,2	13,6	13,38	0,039	0,146
22,8	37,1	12,1	11,97	0,022	0,135	27,0	42,1	13,5	13,49	0,002	0,147
24,9	37,3	12,8	13,04	-0,042	0,142	21,4	46,6	11,4	10,33	0,188*	0,126
19,4	36,5	10,8	10,24	0,099	0,123	25,3	47,4	12,9	12,38	0,092	0,140
21,8	36,7	11,6	11,51	0,016	0,131	27,5	46,3	13,8	13,51	0,052	0,148
22,5	37,3	11,9	11,78	0,021	0,133	28,9	46,5	14,2	14,20	0,000	0,152
26,0	37,5	13,3	13,57	-0,048	0,146	29,6	46,1	14,4	14,55	-0,026	0,154
24,4	37,9	12,7	12,68	0,003	0,140	18,5	43,0	10,6	8,90	0,299*	0,117
27,0	37,9	13,6	14,01	-0,072	0,149	22,1	43,7	11,7	10,82	0,155*	0,129
21,1	37,0	11,5	11,08	0,074	0,129	24,4	42,4	12,5	12,13	0,065	0,137
23,2	37,5	12,5	12,12	0,067	0,137	26,7	42,9	12,6	13,27	-0,117	0,142
23,5	37,6	12,6	12,26	0,060	0,138	26,3	42,7	13,0	13,08	-0,014	0,143
26,3	38,0	13,2	13,64	-0,078	0,146	23,1	39,7	12,3	11,74	0,099	0,135
25,9	38,3	13,0	13,39	-0,069	0,144	26,7	39,4	13,5	13,64	-0,025	0,147
26,6	38,4	13,3	13,73	-0,076	0,147	28,6	39,4	14,2	14,59	-0,068	0,154
ЧЗ = 0 ОП = 100% $\Sigma = 0,0697$						29,9	38,7	14,9	15,33	-0,075	0,159
Данные по X_1 , X_2 и $Y_э$ из [12]. n = 5. Озимая пшеница Бунчак (Россия)						30,4	38,7	15,1	15,57	-0,082	0,161
25,3	36,5	12,8	13,39	-0,103	0,143	20,3	41,5	11,1	10,02	0,189*	0,123
18,8	32,8	11,4	10,70	0,123	0,127	23,6	41,8	12,3	11,76	0,094	0,135
19,7	35,1	11,9	10,68	0,215*	0,129	24,8	41,7	12,8	12,40	0,070	0,139
22,6	35,9	12,2	12,09	0,020	0,136	25,7	41,8	13,4	12,85	0,096	0,144
24,6	36,2	12,5	13,08	-0,102	0,141	26,3	40,6	13,1	13,29	-0,033	0,144
ЧЗ = 1 ОП = 80,0% $\Sigma = 0,0827$						ЧЗ = 6 ОП = 76,0% $\Sigma = 0,3915$					

*значения выходят за пределы допустимых отклонений;

¹здесь и в таблицах 2, 3 и 4: n – общее число наблюдений; X_1 – содержание сырой клейковины, % в.с.в.; X_2 – масса 1000 зерен, г в.с.в.; $Y_э$ – экспериментальное содержание белка (Нобиц. $\times 5,7$), % а.с.в.; Y_T – теоретическое (прогнозируемое) содержание белка, % а.с.в. (расчет по уравнению (1) или (2)); ($N_э - N_T$) – отклонения экспериментальных величин содержания общего азота ($N_э$) в зерне от теоретических (N_T), % а.с.в.; ДО – допустимые отклонения (ГОСТ 10846-91), $\pm$; ЧЗ – число значений, выходящих за пределы ДО; ОП – точность (оправдываемость) прогноза, %; Σ – сумма квадратов отклонений экспериментальных величин от теоретических или $\Sigma (N_э - N_T)^2$.

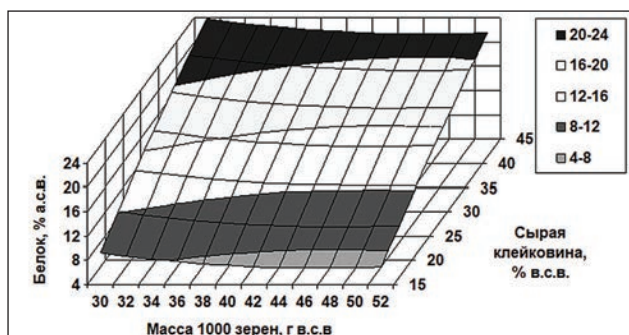


Рис. 1. Зависимость содержания белка (Y , % а.с.в.) в зерне пшеницы от содержания сырой клейковины (X_1 , % в.с.в.) и массы 1000 зерен (X_2 , г в.с.в.).

каждое последующее ее повышение приводит к большему увеличению содержания белка в зерне пшеницы, по сравнению с предыдущим [8, 9].

Проверка точности прогноза содержания белка в зерне пшеницы заключалась в использовании независимых данных. Подставляя в разработанное уравнение результаты экспериментальных исследований других авторов и используя простые математические действия, рассчитывали теоретическое (Y_t , %) или прогнозируемое содержание белка в зерне пшеницы (табл. 1). Следующий этап предусматривал сравнение величин, рассчитанных по уравнению, с экспериментальными данными ($Y_{\text{э}}$) или ($Y_{\text{э}} - Y_t$). Оценку точности разработанного уравнения проводили на основании положения ГОСТ 10846-91 «Метод определения белка», согласно которому допускаемые расхождения при контрольных определениях общего азота (Нобщ.) не должны превышать $0,045X + 0,04$, где X – среднее арифметическое первоначального (в нашем случае – экспериментального или $N_{\text{э}} = Y_{\text{э}}$; 5,7) и контрольного (рассчитанного по разработанному уравнению или $N_t = Y_t$; 5,7) определений. Один из критериев оценки точности прогноза – сумма квадратов отклонений экспериментальных величин содержания общего азота ($N_{\text{э}}$) в зерне от теоретических (N_t) или $\sum (N_{\text{э}} - N_t)^2$. Второй критерий – точность (оправдываемость) прогноза или отношение количества значений, когда расхождения экспериментальных величин содержания общего азота в зерне пшеницы от теоретических ($N_{\text{э}} - N_t$) не превышали регламентируемые ГОСТ 10846-91 допускаемые

отклонения к общему числу наблюдений (n), выраженные в процентах [8, 9].

Результаты и обсуждение. Обобщение экспериментальных данных из 147 источников, опубликованных отечественными и зарубежными (Албания, Беларусь, Болгария, Египет, Казахстан, Литва, Польша, Словакия и Украина) авторами, частично представленных в этой публикации и ранее в работах [8, 9] с общим числом наблюдений $n = 2328$ на более чем двухстах сортах озимой и яровой мягкой и твердой пшеницы показало, что за пределы допускаемых отклонений, регламентируемых ГОСТ 10846-91, выходило 384 значения, или 16,5 % от общего числа наблюдений. При этом точность прогноза содержания белка в зерне пшеницы у уравнения (1) составила 83,5 % (табл. 2).

Табл. 2. Результаты оценки точности прогноза уравнений

Число источников	Общее число наблюдений (n)	Число значений, выходящих за пределы допускаемых отклонений	Точность (оправдываемость) прогноза, %
$Y(1) = 16,0570 + 0,6768X_1 - 0,0032X_1^2 - 0,7891X_2 + 0,0083X_2^2$			
147	2328	384	83,5
$Y(2) = 14,1301 + 0,5956X_1 - 0,0028X_1^2 - 0,6944X_2 + 0,0073X_2^2$			
141	2276	371	83,7
Всего		755	83,6
288	4604	755	83,6

В тех случаях, когда содержание белка определяли без учета влажности зерна (или на в.с.в.), а массу 1000 зерен в расчете на а.с.в., при использовании уравнения (1) для прогноза содержания белка требуется проведение перерасчета белка и (или) массы 1000 зерен [8, 9] с применением коэффициента 1,136 (табл. 3).

Необходимость перерасчета показателей качества зерна на постоянную влажность (в этом случае – 12 %) обусловлена, во-первых, тем, что согласно ГОСТ Р 54478–2011 «Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице» содержание клейковины рекомендуется определять без учета влажности. Во-вторых, ГОСТ 10846-91 «Метод определения белка» и ГОСТ ISO 520–2014 «Определение массы 1000 зерен» регламентируют, что указанные признаки могут определяться как при фактической влажности, так и в пересчете на а.с.в.

С целью исключения перерасчета в тех случаях, когда все показатели качества зерна пшеницы (содержание

Табл. 3. Проверка точности прогноза белковости зерна различных сортов пшеницы (X_1 , X_2 и $Y_{\text{э}}$ – без учета влажности зерна или на в.с.в.)

Данные по X_1 , X_2 и $Y_{\text{э}}$ из [13]. $n = 15$. Памяти Азиева и Омская 35 (Россия)						Данные по X_1 , X_2 и $Y_{\text{э}}$ из [14]. $n = 8$. Сорт Gemmeiza 9 (Египет)					
X_1	X_2	$Y_{\text{э}}$	Y_{T}	($N_{\text{э}}-N_{\text{T}}$)	ДО	X_1	X_2	$Y_{\text{э}}$	Y_{T}	($N_{\text{э}}-N_{\text{T}}$)	ДО
28,6	34,5	14,16/16,09*	15,45	0,111	0,164	27,22	52,67	12,36/14,04	13,57	0,082	0,149
28,2	34,5	13,99/15,89	15,25	0,112	0,163	27,85	52,10	12,36/14,04	13,84	0,035	0,150
27,6	34,2	13,80/15,68	15,02	0,115	0,161	28,30	51,45	12,50/14,20	14,02	0,032	0,151
25,8	34,6	12,96/14,72	14,02	0,123	0,153	31,20	49,50	13,28/15,09	15,33	-0,044	0,160
25,8	34,8	12,93/14,69	13,98	0,124	0,153	28,26	53,35	12,41/14,10	14,15	-0,010	0,152
25,1	34,1	12,50/14,20	13,77	0,075	0,150	28,76	52,97	12,47/14,17	14,36	-0,035	0,153
25,0	33,7	12,42/14,11	13,81	0,052	0,150	28,96	52,09	12,54/14,25	14,39	-0,025	0,153
25,0	33,6	12,40/14,09	13,83	0,044	0,150	30,22	48,98	13,30/15,11	14,85	0,046	0,158
24,6	33,6	12,14/13,79	13,63	0,029	0,148	ЧЗ = 0	ОП = 100%	Σ = 0,0149			
27,0	32,1	13,44/15,27	15,22	0,008	0,160				Данные по X_1 , X_2 и $Y_{\text{э}}$ из [15]. $n = 5$. Сорта Akteur, Julius, Fidelius (Польша)		
29,3	36,6	14,52/16,49	15,38	0,196*	0,166	23,5	48,11	10,0/11,36	11,44	-0,014	0,130
24,4	32,1	12,25/13,92	13,89	0,005	0,150	26,3	49,41	12,0/13,63	12,92	0,125	0,145
26,8	36,8	13,33/15,14	14,10	0,183*	0,155	25,6	49,48	11,4/12,95	12,56	0,068	0,141
23,4	31,1	11,73/13,33	13,63	-0,053	0,146	26,2	49,84	11,5/13,06	12,88	0,032	0,142
26,3	36,1	12,90/14,65	13,97	0,119	0,153	25,1	49,14	11,0/12,50	12,29	0,035	0,138
ЧЗ = 2		ОП = 86,7%		Σ = 0,1693		ЧЗ = 0		ОП = 100%		Σ = 0,0229	

*в числителе содержание белка указано при влажности зерна 12 %, в знаменателе – в пересчете на а.с.в.

белка и сырой клейковины, а также масса 1000 зерен) определены без учета влажности зерна, было получено уравнение (2):

$$Y(2) = 14,1301 + 0,5956X_1 - 0,0028X_1^2 - 0,6944X_2 + 0,0073X_2^2 \quad (2)$$

Проверка точности его прогноза (рис. 2) по обобщенным экспериментальным данным из 141 опубликованного источника отечественных и зарубежных авторов, частично представленных в этой публикации (см. табл. 3) и ранее в работе [10] с общим числом наблюдений $n = 2276$ на более чем двухстах сортах пшеницы, показала, что за пределы допускаемых отклонений, регламентируемых ГОСТ 10846-91, выходит 371 значение, или 16,3 % от общего числа наблюдений. При этом точность прогноза содержания белка составила 83,7 % (см. табл. 2), то есть находилась в тех же пределах, что и у уравнения (1).

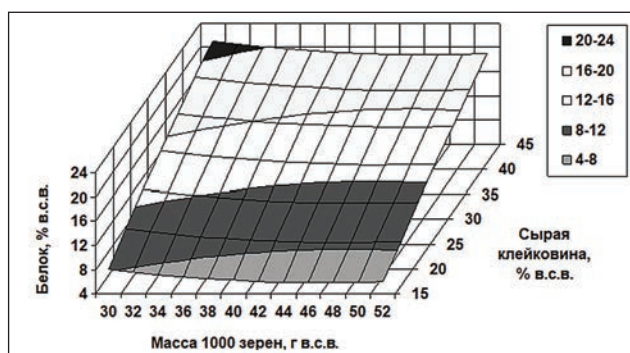


Рис. 2. Зависимость содержания белка (Y , % в.с.в.) в зерне пшеницы от содержания сырой клейковины (X_1 , % в.с.в.) и массы 1000 зерен (X_2 , г в.с.в.).

С целью исключения перерасчета массы 1000 зерен, когда ее экспериментальные величины, как и содержания белка, приведены к а.с.в., а содержание сырой клейковины определено без учета влажности зерна или на в.с.в., было разработано уравнение (3), а когда все показатели технологических качеств зерна пшеницы приведены к а.с.в. – уравнение (4):

$$Y(3) = 16,0570 + 0,6768X_1 - 0,0032X_1^2 - 0,8967X_2 + 0,0107X_2^2 \quad (3)$$

$$Y(4) = 16,0570 + 0,7691X_1 - 0,0041X_1^2 - 0,8967X_2 + 0,0107X_2^2 \quad (4)$$

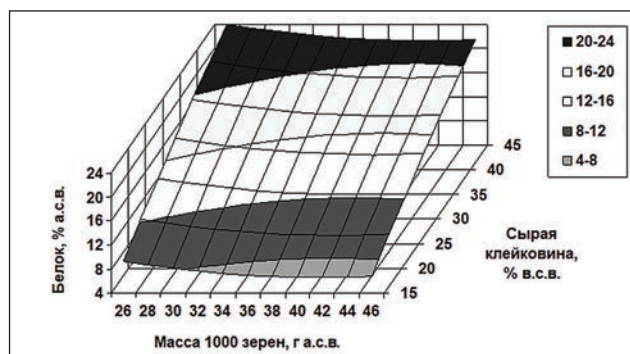


Рис. 3. Зависимость содержания белка (Y , % а.с.в.) в зерне пшеницы от содержания сырой клейковины (X_1 , % в.с.в.) и массы 1000 зерен (X_2 , г а.с.в.).

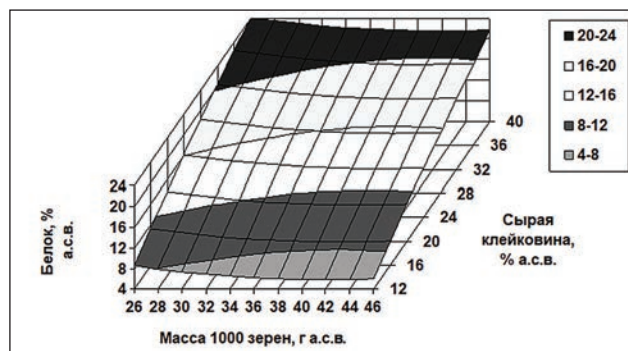


Рис. 4. Зависимость содержания белка (Y , % а.с.в.) в зерне пшеницы от содержания сырой клейковины (X_1 , % а.с.в.) и массы 1000 зерен (X_2 , г а.с.в.).

При этом, как и у уравнения (1), у всех усовершенствованных уравнений (2), (3) и (4), отражающих зависимость содержания белка в зерне от содержания сырой клейковины и массы 1000 зерен, точка экстремума по содержанию клейковины находится вне пределов экспериментальных данных. Однако точка экстремума по массе 1000 зерен у уравнений (3) и (4) сместилась в область меньших величин (рис. 3, 4), по сравнению с уравнениями (1) и (2), и составила 41,9 г.

Сравнение результатов прогноза разработанных уравнений показало (табл. 4), что при одинаковой точ-

Табл. 4. Сравнительная оценка точности прогноза разработанных уравнений

Данные по X_1 , X_2 и Y из [16]. $n = 8$. 7 линий яровой пшеницы и сорт Лада						
X_1	X_2	$Y_{\text{э}}$	$Y_{\text{т}}$	$(N_3 - N_t)$	ДО	$(N_3 - N_t)^2$
$Y(1) = 16,0570 + 0,6768X_1 - 0,0032X_1^2 - 0,7891X_2 + 0,0083X_2^2$						
28,8	47,8	15,0	14,14	0,151	0,155	0,0228
28,0	40,4	13,6	14,17	-0,100	0,150	0,0100
28,1	44,7	14,4	13,86	0,095	0,152	0,0090
28,6	45,3	15,5	14,08	0,249*	0,157	0,0620
30,8	48,0	16,0	15,11	0,156	0,163	0,0243
30,3	47,5	15,1	14,87	0,040	0,158	0,0016
30,7	41,7	15,5	15,35	0,026	0,162	0,0007
24,9	44,2	13,7	12,26	0,253*	0,142	0,0640
$\chi^2 = 2$ ОП = 75% $\sum (N_3 - N_t)^2 = 0,1944$						
$Y(2) = 14,1301 + 0,5956X_1 - 0,0028X_1^2 - 0,6944X_2 + 0,0073X_2^2$						
28,8	47,8	13,20	12,45	0,132	0,141	0,0174
28,0	40,4	11,97	12,47	-0,088	0,136	0,0077
28,1	44,7	12,67	12,20	0,082	0,138	0,0067
28,6	45,3	13,64	12,40	0,218*	0,143	0,0475
30,8	48,0	14,08	13,31	0,135	0,148	0,0182
30,3	47,5	13,29	13,09	0,035	0,144	0,0012
30,7	41,7	13,64	13,51	0,023	0,147	0,0005
24,9	44,2	12,06	10,79	0,223*	0,130	0,0497
$\chi^2 = 2$ ОП = 75% $\sum (N_3 - N_t)^2 = 0,1489$						
$Y(3) = 16,0570 + 0,6768X_1 - 0,0032X_1^2 - 0,8967X_2 + 0,0107X_2^2$						
28,8	42,06	15,0	14,11	0,156	0,155	0,0243
28,0	35,55	13,6	14,14	-0,095	0,150	0,0090
28,1	39,34	14,4	13,83	0,100	0,151	0,0100
28,6	39,86	15,5	14,05	0,254*	0,157	0,0645
30,8	42,24	16,0	15,08	0,161	0,163	0,0259
30,3	41,80	15,1	14,84	0,046	0,158	0,0021
30,7	36,70	15,5	15,32	0,032	0,162	0,0010
24,9	38,90	13,7	12,24	0,256*	0,142	0,0655
$\chi^2 = 2$ ОП = 75% $\sum (N_3 - N_t)^2 = 0,2023$						
$Y(4) = 16,0570 + 0,7691X_1 - 0,0041X_1^2 - 0,8967X_2 + 0,0107X_2^2$						
25,34	42,06	15,0	14,13	0,153	0,155	0,0234
24,64	35,55	13,6	14,16	-0,098	0,150	0,0096
24,73	39,34	14,4	13,85	0,096	0,152	0,0092
25,17	39,86	15,5	14,08	0,249*	0,157	0,0620
27,10	42,24	16,0	15,10	0,158	0,163	0,0250
26,66	41,80	15,1	14,86	0,042	0,158	0,0018
27,02	36,70	15,5	15,35	0,026	0,162	0,0007
21,91	38,90	13,7	12,25	0,254*	0,142	0,0645
$\chi^2 = 2$ ОП = 75% $\sum (N_3 - N_t)^2 = 0,1962$						

ности уравнение (2), не предполагающее перерасчета всех изученных показателей качества зерна пшеницы, представляется более точным, чем три остальных, так как при прочих равных условиях характеризуется меньшей суммой квадратов отклонений экспериментальных величин содержания общего азота в зерне от теоретических ($\sum (N_{\text{э}} - N_{\text{т}})^2 = 0,1489$).

Следует отметить, что в последние годы получили распространение различного вида инфракрасные анализаторы (Infratec 1225, 1241; Инфраскан 3150, 4200), используемые для определения одного или нескольких показателей качества зерна пшеницы (влажности, содержания белка, крахмала, сырой клейковины и др.), исключая массу 1000 зерен. В рассматриваемом случае разработанное уравнение и его усовершенствованные аналоги (после определения массы 1000 зерен) могут быть использованы для косвенной проверки их точности при измерении содержания белка в зерне пшеницы.

Выводы. Усовершенствован метод прогноза содержания белка в зерне пшеницы по содержанию сырой клейковины и массе 1000 зерен, основанный на использовании уравнений множественной нелинейной регрессии. Предложенные уравнения могут быть использованы для прогноза практически во всех случаях, когда результаты анализа содержания сырой клейковины в зерне пшеницы, а также масса 1000 зерен приводятся при фактической или фиксированной влажности, либо в пересчете на сухое вещество.

Литература.

1. Колмаков Ю. В. Оценка материала пшеницы в селекции и повышение потенциала его качества в зернопроизводстве и хлебопечении. Омск: Изд-во ФГОУ ВПО ОмГАУ, 2007. С. 5–19.
2. Шаймерденова Д., Тастанбеков С. Метрологическое обеспечение качества зерна в Казахстане // *Хлебопродукты*. 2009. № 4. С. 49–51.
3. Бегаулов М. Ш. Статистический анализ технологических показателей качества зерна // *Агрохимия*. 2002. № 10. С. 68–73.
4. Драгавцев В. А. Генетика признаков продуктивности яровых пшениц в Западной Сибири. Новосибирск: Наука, СО, 1984. 230 с.
5. Макарова В. М. Структура урожайности зерновых культур и ее регулирование. Пермь: Пермская ГСХА, 1995. 143 с.
6. Иванова Т. И. Прогнозирование эффективности удобрений с использованием математических моделей. М.: Агропромиздат, 1989. С. 32–42.
7. Пасынков А. В., Пасынкова Е. Н. Особенности использования регрессионного анализа в агрохимических исследованиях // *Агрохимия*. 2022. № 10. С. 71–83. doi: 10.31857/S0002188122100088.
8. Сравнительная оценка различных методов прогноза содержания белка в зерне пшеницы / А. В. Пасынков, А. А. Завалин, Е. Н. Пасынкова и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2021. № 3. С. 22–27. doi: 10.31857/s2500262721030054.
9. Пасынков А. В., Пасынкова Е. Н. Эффективность прогноза белковости зерна пшеницы // *Агрохимический вестник*. 2022. № 5. С. 86–92. doi: 10.24412/1029-2551-2022-5-017.
10. Особливості формування урожайності і якості зерна озимої пшениці залежно від строків сівби та азотних підживлень / А. Д. Гирка, С. С. Ярошенко, І. І. Гасанова и др. // *Бюллетень Інституту зернового господарства*. 2010. С. 33–40.
11. Foto Kashta. Effect of nitrogen fertilizer level on the grain yield, some qualitative and technological indices of *Triticum aestivum* L. // *Albanian j. agric. sci.* 2014. P. 187–192.
12. Капустин С. И., Володин А. Б., Капустин А. С. Эффективность весенних подкормок аммиачной селитрой озимой пшеницы, посеянной после сорго на зерно // *Таврический вестник аграрной науки*. 2017. № 4 (12). С. 57–62.
13. Юшкевич Л. В., Пахотина И. В., Щитов А. Г. Эффективность использования агротехнологических приемов возделывания мягкой яровой пшеницы в повышении продуктивности и качества зерна в Омской области // *Вестник Красноярского ГАУ*. 2021. № 7. С. 26–34. doi: 10.36718/1819-4036-2021-7-26-34.
14. Effect of seeding rates on productivity, technological and rheological characteristics of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) / M. F. Seleiman, M. E. Ibrahim, S. M. Abdel-Aal, et al. // *International Journal of Current Research*. 2010. Vol. 4. P. 075–081.
15. The effectiveness of nitrogen-phosphorus fertilization in winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivation / P. Rusek, M. Mikos-Szymanska, M. Karsznia, et al. // *Bulgarian journal Agricultural Sciences*. 2016. No. 5 (22). P. 752–755.
16. Оценка технологических и хлебопекарных свойств новых линий яровой пшеницы / М. А. Кузьмич, И. Ф. Лапочкина, Н. Р. Гайнуллин и др. // *Инновационные разработки по селекции и технологиям возделывания сельскохозяйственных культур*. М.: ФИЦ «Немчиновка», 2018. С. 91–97.

Поступила в редакцию 27.04.2023

После доработки 16.06.2023

Принята к публикации 04.07.2023

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ НА РАСТЕНИЯ ЯРОВОГО ДВУРЯДНОГО ЯЧМЕНЯ В УСЛОВИЯХ СВЕТОКУЛЬТУРЫ*

С.А. Ушакова¹, кандидат биологических наук, **А.А. Тихомиров**^{1,4}, доктор биологических наук, **В.В. Величко**^{1,4}, кандидат биологических наук, **С.В. Хижняк**², доктор биологических наук, **С.А. Герасимов**³, кандидат сельскохозяйственных наук, **И.В. Грибовская**¹, кандидат биологических наук, **Н.А. Сурин**³, академик РАН

¹Институт биофизики – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН», 660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 50

²Красноярский государственный аграрный университет, 660049, Красноярск, проспект Мира, 90

³Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное подразделение «Федерального исследовательского центра Красноярский научный центр СО РАН», 660002, Красноярск, пр. Свободный, 66

⁴Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 660037, Красноярск, просп. им. газет «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sofya-ushakova@yandex.ru

Исследования проводили с целью определения влияния условий минерального питания на морфогенез и поглощение макроэлементов растениями ярового ячменя двух сортов в период от всходов до колошения. Объектами исследования служили растения двурядного ячменя сортов Такмак и Саломе. Растения выращивали методом гидропоники на керамзите в контролируемых условиях среды. Для полива было приготовлено четыре варианта питательных растворов: раствор Кнопа – контроль (вариант 1); раствор с 50 %-ной концентрацией основных макроэлементов от их содержания в растворе Кнопа (вариант 2); раствор с 50 %-ной концентрацией N от его содержания в растворе Кнопа (вариант 3); раствор с 25 %-ной концентрацией P от его содержания в растворе Кнопа (вариант 4). В результате в вариантах 2 и 3 отмечено снижение общей кустистости, по сравнению с контролем, более чем на 30 %. Масса растений в этих вариантах оказалась соответственно на 50 и 35 % меньше, чем в контроле. Ее снижение происходило, в основном, вследствие уменьшения массы боковых побегов. Как дисперсионный, так и дискриминантный, анализ в целом по эксперименту не выявили статистически значимых различий между сортами по динамике поглощения минеральных элементов, величине биомассы и минеральному составу растений. Уровень потребления минеральных элементов, тесно связанный с составом растворов, повлиял не столько на химический состав растительных тканей, сколько на биомассу растений, что проявилось в высоких корреляционных связях между потреблением минеральных элементов и их валовым содержанием в растениях.

EXPERIMENTAL MODELING OF THE INFLUENCE OF MINERAL NUTRITION CONDITIONS ON THE PLANTS OF SPRING DOUBLE

S.A. Ushakova¹, **A.A. Tikhomirov**^{1,4}, **V.V. Velichko**^{1,4}, **S.V. Khizhnyak**²,
S.A. Gerasimov³, **I.V. Gribovskaya**¹, **N.A. Surin**³

¹Institute of Biophysics of the Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS RF», 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, str. 50

²Krasnoyarsk State Agrarian University, 660049, Krasnoyarsk, prosp. Mira, 90

³Krasnoyarsk Agricultural Research Institute, Federal Research Center «Krasnoyarsk Scientific Center», Siberian branch, Russian Academy of Sciences, 660002, Krasnoyarsk, prosp. Svobodnyi, 66

⁴Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 660037, Krasnoyarsk, ul. im. Gazety Krasnoyarskij rabochij, 31
E-mail: sofya-ushakova@yandex.ru

The purpose of the study: to identify the influence of mineral nutrition conditions on morphogenesis and absorption of macronutrients by spring barley plants of two varieties in the period from germination to earing under controlled conditions of light culture. The objects of the study were plants of double-row barley of the Takmak variety and the Salome variety. The plants were grown by hydroponics on expanded clay under controlled environmental conditions. Four variants of nutrient solutions were prepared for watering plants: variant 1 (the control) – Knop solution of standard concentration; variant 2 – Knop solution was prepared with 50 % concentration from its standard concentration; variant 3 – solution was prepared on the basis of Knop solution, but with 50 % of N concentration from its standard concentration; variant 4 – solution was prepared on the basis of Knop solution, but with 25 % of P concentration from its standard concentration. As a result, variants 2 and 3 showed a decrease in total bushiness by more than 30 % compared to the control. The mass of plants in variants 2 and 3 turned out to be 50 % and 35 %, respectively, less than in the control. The decrease in plant mass was mainly due to a decrease in the mass of lateral shoots. The level of consumption of mineral elements, closely related to the composition of solutions, affected not so much the chemical composition of plant tissues as the amount of plant biomass, which manifested itself in high correlations between the consumption of mineral elements and the gross content of these elements in plants with rather weak links between consumption and the content of mineral elements in plants.

Ключевые слова: светокультура, яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.), минеральное питание, поглощение макроэлементов, биомасса.

Key words: light culture, spring barley (*Hordeum vulgare* L.), mineral nutrition, macronutrient absorption, biomass.

*исследования выполнены в рамках тематики Госзаданий Минобрнауки 121052500100-1 и 121101300066-7.

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.), наряду с пшеницей, выступает важнейшей универсальной продовольственной, технической и фуражной зерновой культурой. Поэтому одна из задач земледелия в последние годы – увеличение производства биологически полноценного и экологически безопасного зерна ячменя [1, 2, 3]. Одним из способов решения этой проблемы может быть использование рациональных доз минеральных удобрений, применение которых необходимо разрабатывать не под конкретную культуру в целом, а с учетом особенностей сорта [4, 5, 6].

Поглощение элементов питания в период роста растений происходит неравномерно. Их дефицит в тот или иной период вегетации ведёт к снижению урожая и ухудшению его качества. У всех растений критическим периодом выступает фаза всходов, когда корневая система слабо развита и не может усваивать достаточное количество питательных веществ из почвы. В этот период они должны находиться в прикорневой зоне в доступной форме, но в невысокой концентрации. Последующее нормальное питание азотом и фосфором не может исправить ущерб, нанесённый в начале роста. Второй период, в котором растения весьма чувствительны к недостатку элементов питания, совпадает с интенсивным приростом вегетативной массы, у зерновых культур это выход в трубку и колошение [7, 8, 9]. Содержание питательных элементов в растениях зависит от их вида, возраста, почвенно-климатических условий выращивания, приемов агротехники и др. Наибольшее содержание N отмечается в вегетативных органах молодых растений. По мере их старения азотистые соединения передвигаются во вновь образующиеся листья и побеги. Между содержанием N в определенные фазы роста в вегетативных частях растений и в урожае установлена коррелятивная зависимость [1, 6]. Фосфор находится в тесном взаимодействии с N и белковыми соединениями, выступает их спутником. Распределение P в различных органах растения аналогично распределению N [1, 3, 6].

Предварительную оценку реакции растений на недостаток элементов минерального питания желательно проводить при выращивании в условиях гидропоники и светокультуры, вне зависимости от сложения почвы и ее состава. Это позволяет провести экспериментальное моделирование влияния дефицита того или иного минерального элемента и оценить его воздействие на продукционный процесс исследуемых сортов и урожайность растений [10, 11]. Результаты таких исследований позволят впоследствии оценить перспективность районирования тех или иных селекционных образцов на почвах с определенным минеральным питанием и более рационально использовать минеральные удобрения.

Цель исследования – в контролируемых условиях светокультуры определить влияние условий минерального питания при различной концентрации N и P на морфогенез и поглощение макроэлементов растениями ячменя в период от всходов до колошения.

Методика. В качестве объектов исследования использовали растения двурядного ячменя селекции Красноярского НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН сорта Такмак и германской селекции Саломе.

Сорт Такмак включён в Госреестр по Восточно-Сибирскому региону. Разновидность нутанс. Куст полупрямостоячий. Растение высокорослое. Тип строения колоса двурядный (<https://reestr.gossortrf.ru/sorts/8356368/>). Сорт Саломе полукарликового типа. Разновидность нутанс. Тип строения колоса двурядный. Характеризуется устойчивостью к полеганию и высоким потенциалом продуктивности (<https://reestr.gossortrf.ru/sorts/8853808/>).

Растения ячменя выращивали в двух вегетационных

Табл. 1. Средняя концентрация макроэлементов в питательных растворах для полива растений ячменя сортов Саломе и Такмак в условиях светокультуры в зависимости от варианта опыта, мг/л

Вариант	K	N	Mg	S	Ca	P
1. раствор Кнопа	169	153	25	33	170	57
2. концентрация K, N, Ca и P 50 % от содержания в растворе Кнопа	81	76	25	33	85	27
3. концентрация N 50 % от содержания в растворе Кнопа	167	77	25	33	139	68
4. концентрация P 25 % от содержания в растворе Кнопа	166	153	25	33	170	14

камерах с регулируемыми параметрами внешней среды (температура воздуха, относительная влажность воздуха, интенсивность фотосинтетически активной радиации). Метод выращивания – гидропоника на керамзите [10]. Для оценки влияния условий минерального питания были смоделированы следующие питательные растворы для полива растений (табл. 1): раствор Кнопа (вариант 1 – контроль); раствор с концентрацией K, N, Ca и P 50 % от их содержания в растворе Кнопа (вариант 2); раствор с половинной концентрацией N от его содержания в растворе Кнопа (вариант 3); раствор с концентрацией P 25 % от его содержания в растворе Кнопа (вариант 4). В конце каждого оцениваемого периода роста проводили замену использованного раствора на растворы с исходной концентрацией нутриентов. Во все растворы были добавлены микроэлементы и цитрат железа [12]. Полив происходил автоматически через 6 ч. Эксперимент прекращали в фазе колошения.

В качестве основных морфометрических параметров были выбраны высота растений и главного побега, количество побегов, сухая биомасса отдельных органов. Скорость поглощения макроэлементов оценивали в процессе роста и развития растений на основании изменения их концентрации в питательных растворах за определенный период (0...7, 7...15, 15...21, 21...28, 28...35, 35...42 сут).

Содержание макроэлементов в растворах и биомассе растений ячменя определяли с использованием спектрометра ICP-OES iCAP 6300 Duo (Thermo Scientific, England, 2010), органического азота – методом Кьельдаля, нитратного азота в растворах и водных вытяжках из растительных образцов – фотометрическим методом после редукции до нитритов на кадмиевой колонке и последующим взаимодействием с реактивом Грисса (сульфаниламидом и а-нафтиламином) (РД 52.24.380–2017).

Для проверки статистической значимости различий между вариантами эксперимента по набору показателей использовали дискриминантный анализ, для сравнения вариантов по индивидуальным параметрам, а также для анализа вклада разных факторов и их комбинаций в различия между вариантами – многофакторный дисперсионный анализ. В качестве post-hoc теста при дисперсионном анализе применяли рекомендованный в современной литературе тест Тьюки [13]. При проведении дисперсионного анализа долю влияния фактора определяли по показателю силы влияния (η^2 effect size), равному отношению факториальной дисперсии к общей дисперсии, выраженному в процентах [14]. Для выявления связей между показателями проводили корреляционный анализ, дополненный факторным анализом матриц корреляции. В качестве программного обеспечения использовали пакет StatSoft STATISTICA 8.0.

Результаты и обсуждение. Условия минерального питания практически не влияли на темпы развития растений ячменя сортов Саломе и Такмак вплоть до фазы выхода в трубку. Длительность фазы выхода в трубку в варианте 3 (концентрация N 50 % от концентрации

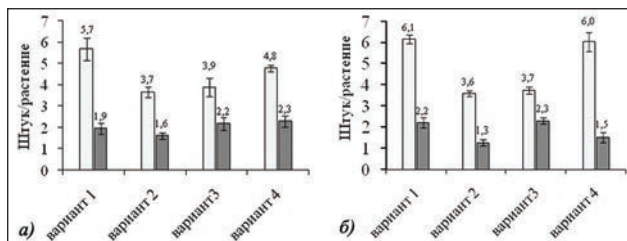


Рис. 1. Влияние условий минерального питания на кущение растений ячменя сортов Саломе (а) и Такмак (б) в условиях светокультуры:
□ – всего побегов; ■ – побегов с колосом.

в растворе Кнопа) у сорта Такмак уменьшилась на 9 сут, Саломе – на 2 сут, по сравнению с контролем. Величина этого показателя у сорта Саломе в вариантах опыта 2 и 4 не отличалась от контроля, и колошение наступало на 42...43 сут после всходов. У растений сорта Такмак в варианте 2 (концентрация К, N, Са и Р 50 % от содержания в растворе Кнопа) длительность фазы выхода в трубку была на 3 сут меньше, чем в контроле, а в варианте 4 (концентрация Р 25 % от содержания в растворе Кнопа) не отличалась от контрольного варианта и колошение начиналось на 45 сутки.

Содержание макроэлементов в питательном растворе оказало существенное влияние на побегообразование растений. Так, у растений ячменя сорта Саломе отмечали уменьшение общей кустистости во всех экспериментальных вариантах, по сравнению с контрольным, но достоверное снижение на 35 % и 32 % – только в вариантах 2 и 3 соответственно (рис. 1). При этом растения в вариантах 3 и 4 незначительно различались по числу побегов с колосом, что привело к увеличению их доли в общем количестве побегов: в варианте 2 она составляла 43 %, в варианте 3 – 56 %, в варианте 4 – 48 % против 33 % в контроле.

У растений ячменя сорта Такмак кущение в вариантах 2 и 3 было на 40 % меньше, чем в контроле, а в варианте 4 фактически не отличалось от контрольного. В отличие от немецкого сорта, у ячменя Такмак количество побе-

гов с колосом в вариантах 2 и 4 достоверно снижалось, по сравнению с остальными. Доля побегов с колосьями была наименьшей в варианте 4 (25 % от общего числа побегов), самой высокой – в варианте 3 (62 %), в контроле и в варианте 2 величина этого показателя находилась на одном уровне (36 %).

Уже в первые 7 суток вегетации отмечена зависимость скорости поглощения $N-NO_3$ растениями ячменя сортов Саломе и Такмак от его концентрации в растворе. У растений сорта Саломе в контроле она была в 1,5 и 1,9 раз выше, чем в вариантах соответственно 2 и 3, и недостоверно больше, чем в варианте 4. У ячменя сорта Такмак скорость поглощения $N-NO_3$ в контроле была в 1,5...2,7 раза больше, чем в вариантах 2, 3 и 4 (рис. 2). При этом в растворах для полива ячменя сорта Саломе в контроле и варианте 4 оставалось примерно 40 % от исходного содержания $N-NO_3$, в вариантах 2 и 3 – около 20 и 30 % соответственно. В растворах для полива сорта Такмак величина этого показателя в контроле и варианте 3 составляла 40 %, варианте 2 – 20 %, варианте 4 – 50 %.

В следующий период роста, включающий фазу начала кущения растений, 7...15 сут у ячменя обоих сортов скорость поглощения $N-NO_3$ оставалась на уровне предыдущего периода. Исключением был ячменя сорта Такмак в варианте 4, где она стала равна скорости поглощения в контроле.

Максимальную в опыте скорость поглощения N у обоих сортов ячменя отмечали с середины фазы кущения и начала выхода в трубку (период 15...21 сут) и до конца эксперимента (см. рис. 2). Во всех питательных растворах почти не оставалось $N-NO_3$, то есть его поглощение лимитировалось содержанием в питательном растворе.

В контроле в период роста сорта Саломе с 15 до 35 сут ежесуточное потребление остальных макроэлементов находилось примерно на одном уровне (табл. 2). При этом в растворе оставалось около 40 % Са, Mg и S, и не более 5 % – К и Р. Только перед началом колошения потребление всех макроэлементов в той или иной степени увеличилось. Начиная с 28...35 сут в растворе оставались только следы К и Р. Поглощение макроэлементов из пи-

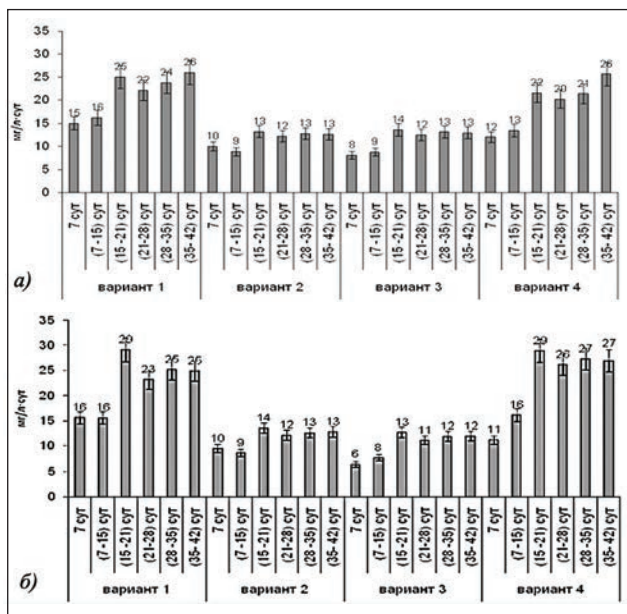


Рис. 2. Изменение концентрации нитратного азота в питательных растворах для полива растений ячменя сортов Саломе (а) и Такмак (б).

Табл. 2. Изменение концентрации макроэлементов в питательных растворах для полива растений ячменя сортов Саломе и Такмак, мг/л·сут

Период роста, сут	Вариант	Ячмень Саломе					Ячмень Такмак				
		Ca	K	Mg	P	S	Ca	K	Mg	P	S
0...7	1	12,8	16,8	1,4	3,3	0,1	9,0	12,9	1,1	2,2	0,3
	2	6,8	11,2	1,8	1,8	0,1	6,0	7,9	1,8	1,2	0,6
	3	10,9	15,9	1,8	3,7	0,1	6,7	9,1	1,1	2,3	0,1
	4	8,7	14,5	1,1	0,8	0,0	6,9	11,7	1,2	0,7	0,0
7...15	1	13,2	18,5	1,6	5,4	3,0	13,1	19,6	1,7	4,9	2,5
	2	6,1	9,9	1,8	2,7	2,7	5,2	10,0	1,7	2,2	2,5
	3	12,2	15,8	1,7	6,5	2,4	9,6	14,8	1,3	4,9	1,8
	4	10,2	16,2	1,5	1,2	2,2	12,1	20,9	1,6	1,3	2,5
15...21	1	18,2	23,5	2,3	6,8	2,9	17,5	22,2	2,4	7,0	3,7
	2	6,5	12,4	1,9	3,6	2,4	4,5	12,0	1,8	3,1	2,3
	3	18,0	22,2	1,9	9,0	2,0	10,9	21,2	1,5	6,9	1,3
	4	15,5	20,1	2,1	1,6	2,2	16,8	27,8	2,6	1,7	3,1
21...28	1	17,1	22,6	2,3	6,5	3,6	19,4	22,4	2,8	6,9	4,1
	2	4,3	10,9	1,5	3,2	2,7	8,0	10,4	2,2	3,3	3,2
	3	15,1	19,8	2,0	8,1	2,8	14,7	16,7	2,0	7,6	2,3
	4	14,3	18,9	2,0	1,4	2,6	23,0	23,7	3,5	1,9	4,9
28...35	1	16,9	25,8	2,8	6,3	4,6	14,5	26,0	3,1	6,4	4,6
	2	4,5	12,6	2,0	3,0	3,6	3,5	12,7	2,1	2,9	3,7
	3	11,9	22,3	2,4	7,6	3,6	10,6	20,3	2,8	6,9	3,7
	4	12,6	22,0	2,3	1,3	3,3	16,1	27,1	3,4	1,6	5,2
35...42	1	33,9	30,5	4,5	8,3	6,0	24,7	21,5	3,2	6,7	5,3
	2	4,3	11,4	1,9	2,9	3,4	2,9	11,5	2,0	2,6	3,6
	3	6,7	24,7	2,2	8,3	5,5	4,1	22,6	2,0	7,1	3,6
	4	20,1	24,2	2,3	1,5	3,5	24,8	29,8	3,5	1,5	5,9

Табл. 3. Масса растений ячменя сортов Саломе и Такмак, выращенных в условиях светокультуры, в зависимости от состава питательного раствора (в расчете на 1 растение)

Вариант	Органы растений ячменя	Сухая масса 1 растения, г	
		Саломе	Такмак
1	колос главного побега	0,25 ± 0,03	0,26 ± 0,03
	листья главного побега	0,28 ± 0,01	0,23 ± 0,03
	стебель главного побега	0,71 ± 0,05	0,66 ± 0,07
	листья боковых побегов	1,07 ± 0,24	1,04 ± 0,01
	стебли боковых побегов	2,48 ± 0,08	2,30 ± 0,15
	корни	0,69 ± 0,07	0,80 ± 0,08
2	сумма	5,48 ± 0,41	5,28 ± 0,29
	колос главного побега	0,22 ± 0,03	0,24 ± 0,03
	листья главного побега	0,21 ± 0,02	0,17 ± 0,02
	стебель главного побега	0,53 ± 0,06	0,51 ± 0,03
	листья боковых побегов	0,33 ± 0,06	0,43 ± 0,02
	стебли боковых побегов	1,02 ± 0,09	1,00 ± 0,01
3	корни	0,49 ± 0,06	0,47 ± 0,06
	сумма	2,79 ± 0,23	2,82 ± 0,10
	колос главного побега	0,29 ± 0,01	0,32 ± 0,03
	листья главного побега	0,18 ± 0,02	0,22 ± 0,01
	стебель главного побега	0,69 ± 0,05	0,67 ± 0,03
	листья боковых побегов	0,32 ± 0,05	0,37 ± 0,08
4	стебли боковых побегов	1,72 ± 0,26	1,32 ± 0,22
	корни	0,53 ± 0,05	0,44 ± 0,05
	сумма	3,72 ± 0,39	3,33 ± 0,37
	колос главного побега	0,24 ± 0,02	0,22 ± 0,02
	листья главного побега	0,27 ± 0,01	0,20 ± 0,03
	стебель главного побега	0,75 ± 0,01	0,48 ± 0,12
	листья боковых побегов	0,76 ± 0,14	1,22 ± 0,34
	стебли боковых побегов	2,36 ± 0,28	1,74 ± 0,31
	корни	0,82 ± 0,08	1,02 ± 0,09
	сумма	5,19 ± 0,45	4,88 ± 0,82

тательного раствора растениями ячменя сорта Такмак в контрольном варианте было таким же, как и у сорта Саломе.

Скорость поглощения макроэлементов в варианте 2 была значительно ниже, чем в контроле, между сортами практически не отличалась и не зависела от периода роста. При этом в питательных растворах оставалось довольно значительное количество Са, Mg и S (около 60 % при выращивании ячменя сорта Саломе и 50 % – сорта Такмак). С периода роста 7...15 сут К поглощался практически полностью, P в растворе в период 7...21 сут оставалось чуть больше 10 %, а затем не более 5 % от количества, внесенного после смены растворов.

В варианте 3 существенных различий в скорости поглощения макроэлементов растениями ячменя обоих сортов, по сравнению с контролем, не отмечали за исключением последнего периода. Растения ячменя сорта Саломе в этот период снизили скорость поглощения Са, и Mg в 2,4 и 2,0 раза соответственно, сорта Такмак – Са в 1,9 раза, Mg и S примерно в 1,5 раза. Как и в предыдущих вариантах, K и P, начиная с периода 15...21 сут, в питательных растворах фактически не оставалось.

Уменьшение в 4 раза концентрации P в питательном растворе (вариант 4) привело к снижению скорости поглощения ячменем сорта Саломе в период 35...42 суток Са, и Mg и S в 1,7...2,0 раза, по сравнению с контролем, и не оказало влияния на поглощение этих макроэлементов растениями сорта Такмак. Поглощение K было таким же как в предыдущих вариантах. В конце периода 0...7 суток в питательном растворе ячменя сорта Саломе оставалось около 17 % P, сорта Такмак – около 13 % от исходного количества. Во все остальные периоды роста в питательных растворах оставались только следовые количества P.

Условия минерального питания оказали существенное влияние на формирование биомассы отдельных органов и растений в целом (табл. 3). Достоверных разли-

чий по массе колоса главного побега между вариантами опыта и сортами не отмечено. Масса листьев и стебля главного побега растений обоих сортов в варианте 2 была на 25 % меньше, чем в контроле. Масса листьев боковых побегов у сортов Саломе и Такмак снизилась соответственно на 69 и 59 %, стеблей боковых побегов у обоих сортов – на 58 %. Лимитирование по макроэлементам привело к уменьшению массы корней: у сорта Саломе – на 29 %, Такмак – на 42 %. В результате масса растений в целом снизилась, по сравнению с контрольным вариантом, почти в 2 раза.

Выращивание ячменя на растворах с лимитированным содержанием N-NO₃ (вариант 3) привело к некоторому увеличению массы колоса и снижению массы листьев главного побега ячменя сорта Саломе на 36 %, но не оказало достоверного влияния на массу стебля главного побега. Масса листьев и стеблей боковых побегов уменьшилась соответственно на 70 и 30 %, корней – на 23 %. У сорта Такмак на аналогичных растворах отмечено увеличение массы колоса, влияния на массу листьев и стебля главного побега не наблюдали. Масса листьев и стеблей боковых побегов уменьшилась соответственно на 65 и 43 %, корней – на 45 %. В результате масса растений ячменя сорта Саломе составляла 68 % величины этого показателя в контроле, Такмак – 63 %.

Снижение содержания P в питательном растворе в 4 раза (вариант 4) не оказало значимого влияния на массу различных органов, за исключением листьев боковых побегов, которая была на 29 % меньше, чем в контроле.

Состав питательного раствора влиял на содержание макроэлементов в надземной биомассе растений в расчете на 100 г биомассы (рис. 3). В варианте 2 в листьях ячменя сорта Саломе содержание N органического было примерно равно величине этого показателя в контроле, но концентрация NO₃⁻ была на 36 % меньше. Количество Mg увеличилось на 29 %, P – на 47 %, S – на 69 %. Различия в содержании Са и K были недостоверны. В листьях ячменя сорта Саломе в варианте 3 концентрация N органического была незначительно меньше, чем в контроле, но NO₃ практически отсутствовали. Количество Са было на 32 % меньше, а P на 47 % больше, чем в контроле. Содержание Са и S в стеблях было меньше, чем в контроле, соответственно на 58 и 53 %, Mg, P и N органического – на 24...28 %. В листьях растений варианта 4 содержание органического азота и NO₃⁻ находилось на уровне контроля, но снижение концентрации P в питательном растворе привело к уменьшению содержания в листьях Са, Mg, P и S. Аналогичные изменения отмечали в стеблях.

Изменения содержания макроэлементов в листьях и стеблях растений ячменя сорта Такмак, с некоторыми вариациями, были подобны изменениям соответствующих элементов в органах растений ячменя сорта Саломе.

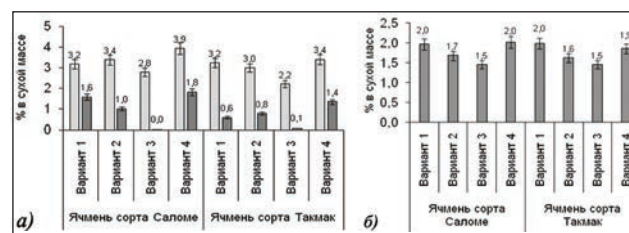


Рис. 3. Содержание азота в листьях (а) и стеблях (б) ячменя, выращенных в условиях светокультуры, в зависимости от концентрации макроэлементов в поливном растворе: □ – N органический; ■ – нитраты.

Табл. 4. Содержание макроэлементов в надземной биомассе ячменя сортов Саломе и Такмак в зависимости от концентрации макроэлементов в питательном растворе, % в сухой массе

Орган растения	Вариант	Ca	K	Mg	P	S	Стехиометрия, моль макроэлемента/моль N органического
Саломе							
Листья	1	1,73	2,91	0,50	0,23	0,63	N Ca _{0,19} K _{0,33} Mg _{0,09} P _{0,033} S _{0,09}
	2	1,72	2,40	0,64	0,34	1,07	N Ca _{0,18} K _{0,26} Mg _{0,11} P _{0,045} S _{0,14}
	3	1,19	3,05	0,40	0,34	0,73	N Ca _{0,15} K _{0,39} Mg _{0,08} P _{0,055} S _{0,11}
	4	1,20	2,77	0,38	0,10	0,47	N Ca _{0,11} K _{0,25} Mg _{0,06} P _{0,012} S _{0,05}
Стебли	1	0,49	2,99	0,21	0,40	0,34	N Ca _{0,09} K _{0,54} Mg _{0,06} P _{0,092} S _{0,08}
	2	0,33	2,34	0,20	0,36	0,26	N Ca _{0,07} K _{0,50} Mg _{0,07} P _{0,097} S _{0,07}
	3	0,20	2,72	0,15	0,30	0,16	N Ca _{0,05} K _{0,67} Mg _{0,06} P _{0,094} S _{0,05}
	4	0,24	2,55	0,14	0,15	0,19	N Ca _{0,04} K _{0,45} Mg _{0,04} P _{0,034} S _{0,04}
Такмак							
Листья	1	1,56	2,98	0,40	0,29	0,69	N Ca _{0,17} K _{0,33} Mg _{0,07} P _{0,040} S _{0,09}
	2	1,31	2,68	0,54	0,32	1,15	N Ca _{0,15} K _{0,32} Mg _{0,10} P _{0,048} S _{0,17}
	3	1,14	4,14	0,34	0,47	0,55	N Ca _{0,18} K _{0,67} Mg _{0,09} P _{0,096} S _{0,11}
	4	1,40	3,05	0,39	0,15	0,76	N Ca _{0,14} K _{0,32} Mg _{0,07} P _{0,019} S _{0,10}
Стебли	1	0,36	2,15	0,16	0,28	0,19	N Ca _{0,06} K _{0,39} Mg _{0,05} P _{0,064} S _{0,04}
	2	0,25	1,76	0,17	0,28	0,22	N Ca _{0,05} K _{0,39} Mg _{0,06} P _{0,077} S _{0,06}
	3	0,25	2,58	0,14	0,30	0,10	N Ca _{0,06} K _{0,64} Mg _{0,06} P _{0,092} S _{0,03}
	4	0,40	2,46	0,19	0,15	0,26	N Ca _{0,08} K _{0,48} Mg _{0,06} P _{0,037} S _{0,06}

Условия минерального питания отразились на стехиометрии макроэлементов в листьях и стеблях растений ячменя сортов Саломе и Такмак (по отношению к 1 моль N). Наиболее существенные изменения отношения макроэлементов к азоту были характерны для листьев при максимальном варьировании для фосфора (табл. 4).

Ни дисперсионный, ни дискриминантный анализ в целом по эксперименту не выявили статистически значимых различий между сортами ни по динамике поглощения минеральных элементов, ни по величине биомассы, ни по минеральному составу растений. В то же время различия между вариантами по всем перечисленным показателям были в высокой степени статистически значимыми. Кроме того, достоверное влияние на поглощение минеральных элементов оказывал период роста, а на минеральный состав растений – изучаемый орган (рис. 4).

Потребление большинства минеральных элементов в первую очередь определял состав раствора, а не период роста. Доля влияния этого фактора на потребление P составляла 75,3 %, N-NO₃ – 60,4 %, Ca – 52,5 %, K – 51,6 %. Потребление Mg и S в большей степени зависело от периода роста, вклад этого фактора был равен соответственно 46,9 и 64,4 %, состава раствора – 12,2 и 9,6 %. Для N-NO₃, Ca и P также отмечено влияние состава раствора на динамику потребления элементов, что нашло своё отражение в статистически значимом эффекте взаимодействия факторов «состав раствора × период роста» с долей влияния соответственно 6,6, 19,0 и 7,3 %.

Статистически значимые (от $p < 0,05$ до $p < 0,001$), согласно тесту Тьюки, различия с контролем по среднему за период потребления элементов отмечены для N-NO₃, Ca, K, Mg, S в вариантах 2 и 3 и для P в варианте 2 и 4.

Валовое содержание большинства минеральных элементов в растениях также в первую очередь зависело от состава раствора. Вклад этого фактора в валовое содержание Mg составил 74,6 %, Ca – 67,6 %, общего азота – 65,3 %, S – 59,5 %, вклад фактора «орган растения» – 2,4, 16,6, 25,2 и 2,9 % соответственно. В противоположность этому, валовое содержание K и P в большей степени зависело не от состава раствора, а от органа растения, доля влияния которого составляла соответственно 55,1 и 56,8 % против 29,3 и 25,6 % для фактора «состав раствора». Статистически значимых эффектов взаимодействия этих факторов по валовому содержанию элементов не выявлено. Согласно тесту Тьюки, статистически значимые (от $p < 0,05$ до $p < 0,001$) различия с контролем по валовому содержанию общего N, Ca, Mg в растениях отмечены в вариантах 2 и 3, K – в варианте 2, P – в вариантах 2 и 4, S – в варианте 3 (см. рис. 4).

Минеральный состав растительной биомассы в расчете на 100 г в первую очередь зависел не от состава раствора, а от органа растения. Так, доля влияния фактора «орган растения» на содержание Ca составляла 91,0 %, Mg – 80,8 %, общего азота – 77,9 %, S – 73,1 %, «состав раствора» – соответственно 4,7, 10,0, 15,0 и 12,5 %. На содержание K этих факторы оказывали практически оди-

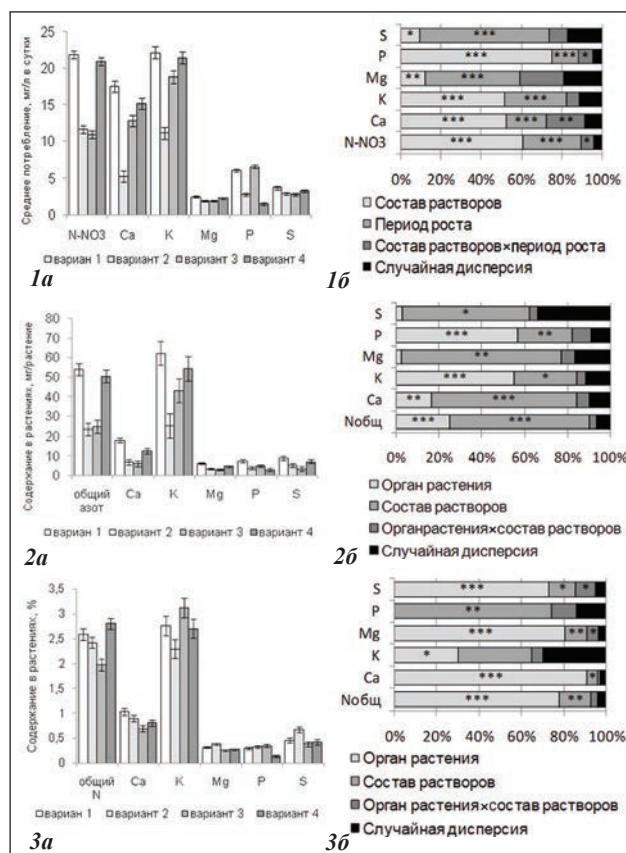


Рис. 4. Результаты дисперсионного анализа влияния факторов на потребление элементов и минеральный состав растений: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; * – $p < 0,001$; 1а – среднее по сортам и периодам потребление элементов; 2а – среднее по сортам и органам валовое содержание элементов в растениях; 3а – среднее по сортам и органам содержание элементов в растениях в %; 1б – доля влияния (%) изучаемых факторов на поглощение макроэлементов; 2б – доля влияния (%) изучаемых факторов на валовое содержание макроэлементов в растениях; 3б – доля влияния (%) изучаемых факторов на содержание макроэлементов в растениях в расчете на 100 г биомассы.**

наковое влияние (соответственно 30,4 и 34,5 %), а на содержание Р сильнее воздействовал «состав раствора» (74,1 %), в то время как влияние «органа растения» было незначительным (вклад близок к 0 %). Согласно тесту Тьюки, статистически значимые (от $p < 0,05$ до $p < 0,01$) различия с контролем по содержанию элементов в растениях в расчете на 100 г биомассы для органического N и Ca отмечены в варианте 3, K – в варианте 2 и P – в варианте 4.

Анализ матрицы коэффициентов корреляции между потреблением отдельных элементов в течение вегетации показал, что динамика потребления N-NO₃, Ca, K, Mg и S в достаточной степени однотипна и выражается в статистически значимой корреляции между их убылью в растворах. Соответствующие коэффициенты корреляции в целом по сортам и вариантам варьируют от $r = 0,61$ (между убылью Ca и S, $p < 0,001$) до $r = 0,88$ (между убылью Mg и S, $p < 0,001$). В то же время потребление Р происходит в значительной степени независимо от других исследуемых элементов и соединений. Соответствующие коэффициенты корреляции варьируют от $r = 0,04$ (между убылью N-NO₃ и убылью Р) до $r = 0,42$ (между убылью Ca и убылью Р, $p < 0,01$). Факторный анализ корреляционной матрицы подтвердил эту закономерность.

Известно, что показателем уровня коррелированности изучаемых параметров служит доля вариации, приходящаяся на первую главную компоненту корреляционной матрицы. В случае полной коррелированности (коэффициенты корреляции между всеми изучаемыми показателями равны 1) она будет равна 100 %, а при отсутствии какой-либо корреляции (все коэффициенты корреляции равны 0) – 100/N, где N – число изучаемых показателей. С этой точки зрения максимальная согласованность потребления макроэлементов у обоих сортов отмечена в контрольном варианте (доля вариации, приходящейся на первую главную компоненту корреляционной матрицы, у сорта Саломе – 90,8 %, у сорта Такмак – 84,0 %), а минимальная – в варианте 2 (49,9 % и 59,2 % соответственно). На втором месте по согласованности потребления минеральных элементов находится вариант 4 (82,5 % и 83,5 %), на третьем – вариант 3 (соответственно 70,1 % и 77,6 %).

В целом по двум сортам статистически значимые положительные корреляционные связи между средним потреблением макроэлементов за вегетацию и минеральным составом (в %) наземных органов растений обнаружены только для поглощения N-NO₃ и содержания органического N в стеблях ($r = 0,89$, $p < 0,01$), поглощения Mg и содержания Ca в стеблях ($r = 0,79$, $p < 0,05$), поглощения S и содержания Ca в стеблях ($r = 0,76$, $p < 0,05$). Статистически значимые ($p < 0,05$) отрицательные корреляции отмечены между потреблением N-NO₃ и содержанием Р в листьях ($r = -0,76$), между потреблением Ca и K и содержанием S в листьях (соответственно $r = -0,75$ и $r = -0,74$).

Гораздо более тесные и многочисленные корреляции отмечены между потреблением макроэлементов и их валовым содержанием в растениях. Так, статистически значимые (от $p < 0,05$ до $p < 0,001$) связи обнаружены между средним за вегетацию потреблением N-NO₃ и валовым содержанием в листьях Ca, K, Mg, S, органического N и нитратов (соответственно $r = 0,93$, $r = 0,92$, $r = 0,89$, $r = 0,79$, $r = 0,98$ и $r = 0,82$) и валовым содержанием в стеблях Ca, Mg, S и органического N ($r = 0,81$, $r = 0,75$, $r = 0,73$ и $r = 0,82$); между средним за вегетацию потреблением Ca и валовым содержанием в листьях Ca и K (соответственно $r = 0,72$ и $r = 0,82$), а также валовым содержанием в стеблях Ca, K, Mg и органического N ($r = 0,79$, $r = 0,85$, $r = 0,81$ и $r = 0,78$); между средним за вегетацию потреблением K и валовым содержанием K в листьях ($r = 0,82$), а также валовым

содержанием Ca, K, Mg и органического N в стеблях (соответственно $r = 0,73$, $r = 0,81$, $r = 0,75$ и $r = 0,71$); между средним за вегетацию потреблением Mg и валовым содержанием в листьях Ca, K, Mg, S и органического N ($r = 0,89$, $r = 0,87$, $r = 0,85$, $r = 0,89$ и $r = 0,81$), а также валовым содержанием в стеблях Ca ($r = 0,77$); между средним за вегетацию потреблением Р и валовым содержанием Р в стеблях ($r = 0,77$); между средним за вегетацию потреблением S и валовым содержанием в листьях Ca, K, Mg, S и органического N ($r = 0,82$, $r = 0,80$, $r = 0,80$, $r = 0,89$ и $r = 0,72$).

Выводы. Снижение содержания макроэлементов в питательных растворах, по сравнению с контрольным, привело к десинхронизации их потребления растениями ячменя, причём максимальной у обоих сортов она была в варианте с концентрацией K, N, Ca и P 50 % от их содержания в растворе Кнопа.

Тесные связи между потреблением макроэлементов и валовым содержанием этих элементов в растениях повлияли не столько на химический состав растительных тканей, сколько на биомассу растений. Наиболее чувствительными к недостатку макроэлементов оказались боковые побеги растений ячменя, формирование и рост которых был подавлен в варианте с концентрацией K, N, Ca и P 50 % и в варианте с содержанием N 50 % от уровня контрольного раствора, что подтверждает лидирующее влияние N на формирование вегетативных органов. Формирование главного побега оказалось более устойчивыми, по сравнению с боковыми, к недостатку N в питательном растворе.

Снижение концентрации Р в 4 раза, по сравнению с контролем, в основном, не оказало значимого влияния на формирование надземных органов растений ячменя сортов Саломе и Такмак, но привело к некоторому увеличению массы корней.

Литература

1. Пискарева Л. А., Чевердин А. Ю. Урожайность и качественные показатели зерна ячменя в зависимости от сортовых особенностей и уровня минерального питания. // *Journal of Agriculture and Environment*. 2021. (17). URL: <https://doi.org/10.23649/jae.2021.1.17.8> (дата обращения: 22.03.2023).
2. Сурин Н. А., Ляхова Н. Е. Культура ячменя в Восточной Сибири // *Вестник КрасГАУ*. 2017. № 4. С. 52–65.
3. Якубышина Л. И., Логинов Ю. П. Урожайность семян сортов ячменя в зависимости от уровня минерального питания в северной лесостепи Тюменской области // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021. № 6 (92). С. 51–58. doi: 10.37670/2073-0853-2021-92-6-51-58.
4. Олехов В. Р., Тетерлев И. С. Влияние предшественников и минеральных удобрений на урожайность и показатели качества зерна ячменя // *Пермский аграрный вестник*. 2019. № 4 (28). С. 59–63.
5. Кафтан Ю. В. Влияние засорённости посевов ячменя и минерального питания на урожайность в центральной зоне Оренбургской области // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021. № 4 (90). С. 104–108. doi: 10.37670/2073-0853-2021-90-4-104-108.
6. Бабунов А. Б., Бадин А. Е. Влияние минеральных удобрений на урожайность и качество ярового ячменя Санишайн, а также вынос элементов питания // *Достижения науки и техники АПК*. 2018. Т. 32. № 8. С. 32–34. doi: 10.24411/0235-2451-2018-10808.
7. Alqudah A. M., Schnurbusch T. Awn primordium to tipping is the most decisive developmental phase for

- spikelet survival in barley // *Funct. Plant Biol.* 2014. Vol. 41. P. 424–436. doi: 10.1071/Fp13248.
8. Genetic control of pre-heading phases and other traits related to development in a double-haploid barley (*Hordeum vulgare* L.) population / G. Borrás-elonch, G. A. Slafer, A. M. Casas, et al. // *Field Crops Res.* 2010. Vol. 119. P. 36–47. doi: 10.1016/j.fcr.2010.06.013.
 9. Digel B., Pankin A., Von Korff M. Global transcriptome profiling of developing leaf and shoot apices reveals distinct genetic and environmental control of floral transition and inflorescence development in barley // *Plant Cell.* 2015. Vol. 27. No. 9. P. 2318–2334. doi: 10.1105/tpc.15.00203.
 10. Особенности роста и развития сортов двурядного (*v. nutans*) и шестирядного ячменя (*v. rikotense*) в условиях светокультуры / А. А. Тихомиров, С. А. Ушакова, В. В. Величко и др. // *Российская сельскохозяйственная наука.* 2022. № 2. С. 19–24. doi: 10.31857/S2500262722020041.
 11. Prikupets L. B. Technological Lighting for AgroIndustrial Installation in Russia // *Light & Engineering.* 2018. Vol. 26. No. 4. P. 7–17. DOI:10.33383/2017–079.
 12. Коваль С. В., Шаманин В. П. Растение в опыте. Омск: Издательство ИЦиГ СО РАН, ОмГАУ. 1999. 201 с.
 13. Comparing multiple comparisons: practical guidance for choosing the best multiple comparisons test / S. Midway, M. Robertson, S. Flinn, et al. // *Peer J.* 2020. No. 8. e10387. URL: <https://peerj.com/articles/10387/> (дата обращения: 16.05.2023). doi: 10.7717/peerj.10387.
 14. Bakeman R. Recommended effect size statistics for repeated measures designs // *Behavior Research Methods.* 2005. Vol. 37. P. 379–384.

Поступила в редакцию 27.04.2023

После доработки 11.06.2023

Принята к публикации 18.07.2023

БИОФУНГИЦИДЫ В ТЕХНОЛОГИИ ВЫРАЩИВАНИЯ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

Н.Г. Власенко, доктор биологических наук, академик РАН, **С.В. Бурлакова**, кандидат сельскохозяйственных наук, **М.Т. Егорычева**, кандидат сельскохозяйственных наук

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН,
630501, Новосибирская обл., пос. Краснообск
E-mail: nvlasenko@sfsca.ru

Исследования проводили с целью изучения эффективности применения биофунгицидов при выращивании яровой пшеницы. Работу выполняли в 2019–2021 гг. в Новосибирской области. Возможности использования микробиологических препаратов Триходермин, Споробактерин и Фитоспорин-М для защиты яровой пшеницы от болезней изучали на сорте Новосибирская 31. Оценивали влияние биологических препаратов на развитие листовых болезней, ростовые процессы и урожайность пшеницы. Развитие листовых инфекций было умеренным. Против септориоза в фазе начала молочной спелости зерна эффективность Фитоспорина-М составляла 47,3 %, фунгицида Титул Дуо – 67,7 %, в сочетании с обработкой семян – 31,2...75,3 %. Против мучнистой росы эффективность обработки семян Триходермином, Споробактерином, Скарлетом и опрыскивания посевов Титулом Дуо варьировала от 6,7 до 52,2 %, против бурой листовой ржавчины – от 82,6 до 95,6 %. Обработка посевов Фитоспорином-М и ее сочетание с обработкой семян не оказывала сдерживающего воздействия на эти листовые болезни. Рост площади флагового листа в опыте, относительно контроля (11,7 см²), составил 9,4...41,9 %, наибольшей она была в вариантах Триходермин + Титул Дуо и Споробактерин + Титул Дуо. При сочетании обработки семян биопрепаратами и посевов Фитоспорином-М и Титулом Дуо отмечено увеличение длины колоса на 8,1...17,9 %, количества колосков – на 6,1...14,4 %, зерен в колосе – на 21,8...43,4 %, массы зерна с колоса – на 28,9...61,1 %. Масса 1000 зерен возрастала во всех вариантах опыта на 2,7...14,0 %. Сопоставимыми по урожайности были варианты Триходермин + Титул Дуо, Споробактерин + Титул Дуо и Скарлет + Титул Дуо, обеспечившие увеличение сбора зерна на 0,75, 0,72 и 0,80 т/га соответственно, обработка посевов Фитоспорином-М позволила сформировать дополнительный урожай, относительно контроля (2,31 т/га), на уровне 0,25 т/га, Титулом Дуо – 0,66 т/га.

BIOFUNGICIDES IN THE CULTIVATION TECHNOLOGY OF SPRING WHEAT

N.G. Vlasenko, S.V. Burlakova, M.T. Egorycheva

Siberian Federal Research Center of Agrobiotechnologies
of the Russian Academy of Sciences,
630501, Novosibirsk obl., pos. Krasnoobsk
E-mail: nvlasenko@sfsca.ru

In order to reduce the pesticide load on agrocenoses, studies of the effectiveness of biofungicides in the cultivation of spring wheat are very significant. Studies were carried out in 2019–2021 on the experimental field of the plant protection department of the SFNCA RAS, located in the forest-steppe zone of Priobye. The possibilities of using microbiological preparations Trichodermin, Sporobacterin and Fitosporin-M to protect spring wheat from diseases were studied on crops of the Novosibirskaya 31 variety. The effect of biological preparations on the development of leaf diseases as well as on the growth processes and yield of wheat was studied. The development of leaf infections was moderate. Against septorioses in the phase of the beginning of milk maturity of grain efficiency of the treatments of crops with Fitosporin-M and fungicide Titul Duo was 47,3 % and 67,7 %, in combination with the treatment of seeds – 31,2–75,3 %. Against powdery mildew, the efficiency of seed treatment with Trichodermin, Sporobacterin, Scarlet, and crop treatment with fungicide Titul Duo ranged from 6.7 % to 52.2 %, and against leaf rust, from 82.6 % to 95.6 %. Treatment of crops with Fitosporin-M and its combination with seed treatment had no deterrent effect on these leaf diseases. Growth of the flag leaf area in the experiment was 9,4–41,9 % relative to control (11,7 cm²); it was greatest in Trichodermin+Titul Duo and Sporobacterin+Titul Duo variants. Treatment of seeds and crops with preparations had an effect on the structure of the wheat ear. The combined treatment of the seeds with biological preparations and sowing of wheat with Fitosporin-M and Titul Duo resulted in the increase of such indices as the ear length (by 8,1–17,9 %), number of ears (by 6,1–14,4 %) and grains (by 21,8–43,4 %) in an ear, weight of grains per ear (by 28,9–61,1 %). Weight of 1000 grains increased significantly in all variants of the experiment by 2.7–14.0 %. Trichodermin + Titul Duo, Sporobacterin + Titul Duo, and Scarlet + Titul Duo were comparable in yield, 0.75 t/ha, 0.72 t/ha, and 0.80 t/ha, respectively; treatment of the crops with Fitosporin-M and Titul Duo resulted in additional 0.25 t/ha and 0.66 t/ha of the control (2.31 t/ha).

Ключевые слова: яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.), биофунгициды, обработка семян и посевов, болезни, площадь листьев, структура колоса, урожайность.

Key words: spring wheat (*Triticum aestivum* L.), biofungicides, seed and crop treatment, diseases, leaf area, ear structure, yield.

Биологизация земледелия становится настоящим трендом в нашей стране, но бережное отношение к окружающей среде должно быть подкреплено современными научными разработками, а также обязательным экспертным и консультационным сопровождением. В России сейчас производят десятки наименований биопрепаратов, но далеко не все они обладают заявленной эффективностью [1]. Применение биопрепаратов сокращает риск загряз-

нения окружающей среды и выращиваемой продукции, усиливает саморегулирующую способность агрофитоценоза, способствует сохранению урожая с минимальными затратами. Речь не идет о полной замене химических препаратов на биологические, но в случае невысокого развития болезней такой подход возможен [2].

У биологических препаратов расширен период применения, благодаря малому сроку ожидания после об-

работки их можно использовать практически в любой стадии развития растений [3]. Экологически безопасные биопрепараты при грамотном использовании (системные обработки, своевременное применение и др.) не только обеспечивают высокий урожай, но и повышают его качество.

Интерес к биологическим препаратам возрастает еще и из-за того, что многие из них обладают антистрессовым эффектом, повышая устойчивость растений к абиотическим факторам внешней среды [4, 5], а также обеспечивают стимуляцию роста и развития растений [6, 7]. Весьма актуальны экологически и экономически обоснованные исследования по поиску высокоэффективных биофунгицидов, ускоряющих рост растений, способных контролировать фитосанитарное состояние посевов и оказывать прямое или опосредованное положительное воздействие на биогенность почвы [8, 9]. В последние годы наиболее широко для защиты зерновых культур от болезней используют препараты на основе грибов родов *Trichoderma*, *Streptomyces*, различных видов и штаммов бактерий родов *Bacillus* и *Pseudomonas* и др. [10, 11].

Цель исследований – изучение возможностей включения биопрепаратов в систему защиты яровой пшеницы от листовых инфекций в условиях лесостепи Приобья.

Основной задачей исследований было определить влияние обработки семян и посевов биопрепаратами на основе *Trichoderma viride* и *Bacillus subtilis* на фитосанитарное состояние посевов яровой пшеницы и урожайность зерна.

Методика. Работу выполняли в 2019–2021 гг. на опытном поле отдела защиты растений СФНЦА РАН, расположенном в Центральном-лесостепном Приобском агроландшафтном районе Новосибирской области. Возможность использования микробиологических препаратов Триходермин, Споробактерин и Фитоспорин-М для защиты яровой пшеницы от болезней изучали на посевах сорта Новосибирская 31, которые размещали по паровому предшественнику. Посев осуществляли сеялкой СЗС-2,1 с анкерными сошниками, норма высева – 6 млн всхожих семян на 1 га.

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный среднемошный среднегумусный среднесуглинистый. Содержание гумуса (по Тюрину) в пахотном слое составляло 5,2 %, нитратного азота – 8,3 мг/кг; подвижного фосфора (по Карпинскому-Замятиной) – 0,79 мг/кг, подвижного калия (по Чирикову) – 180 мг/кг почвы.

Предпосевная обработка семян предусматривала следующие варианты: без обработки (контроль); Триходермин, П (*Trichoderma viride*, титр более 6 млрд спор/г, 80 г/т); Споробактерин, СП (*Bacillus subtilis* + *Trichoderma viride*, штамм 4097, 0,5 кг/т); Скарлет, МЭ – химический эталон (имазалил, 100 г/л + тебуконазол, 60 г/л, 0,3 л/т). Норма расхода рабочего раствора 10 л/т семян, площадь делянки 44,1 м² (2,1 м × 21 м), расположение последовательное в один ярус, повторность – 4-кратная. Применение препаратов по вегетирующим растениям предусматривало следующие варианты: без обработки (контроль); Фитоспорин-М, П (*Bacillus subtilis*, штамм 26 Д, титр живых спор и клеток не менее 2 млрд/г, 0,4 кг/га) в фазы кущения и колошения культуры; фунгицид Титул Дуо, ККР (пропиконазол, 200 г/л + тебуконазол, 200 г/л), 0,32 л/га в фазе колошения культуры. Варианты по обработке посевов накладывали на схему опыта методом расщепленных делянок.

Норма расхода рабочей жидкости – 200 л/га. Фоновое опрыскивание против злаковых и двудольных сорняков проводили в фазе кущения пшеницы баковой

смесью гербицидов Аксил, КЭ (1 л/га) + Примадонна, СЭ (0,4 л/га) + Гекстар, ВДГ (10 г/га). Норма расхода рабочей жидкости – 270 л/га.

Изучали воздействие биофунгицидов на развитие септориоза, мучнистой росы и бурой листовой ржавчины в фазе начала молочной спелости зерна [13], на площадь флагового листа [14], структуру колоса и крупность зерна [15]. Урожай учитывали методом прямого комбайнирования комбайном Сампо, выход зерна приводили к 14 %-ной влажности и 100 %-ной чистоте. Статистическую обработку данных проводили с использованием прикладных программ Snedecor, Excel [16].

Метеоусловия в годы исследований существенно различались. В целом 2019 г. был неблагоприятным для формирования высокой продуктивности растений. Всего за вегетационный период выпало 189 мм осадков, что меньше нормы на 43 мм, при этом в мае приход атмосферной влаги составил 43 мм, в июне – 26, в июле – 98, в августе – 22 мм (среднепогодные значения – соответственно 36, 58, 72, 66 мм). Среднесуточная температура воздуха в мае составляла 10,9 °С, в июне – 16,4 °С, в июле – 19,2 °С, в августе – 18,3 °С (среднепогодные значения – соответственно 10,3, 16,7, 19,0, 15,8 °С). Вегетационный период 2020 г. характеризовался повышенной теплообеспеченностью и достаточной увлажненностью. Сумма осадков за вегетационный период с мая по август составила 245 мм, их распределение по месяцам было крайне неравномерным, в мае выпало 54, в июне – 24, в июле – 85, в августе – 82 мм при температуре воздуха 16,5, 16,6, 19,6 и 18,6 °С соответственно. В 2021 г. температура воздуха в мае составила – 14,3 °С, в июне – 16,2 °С, в июле – 19,6 °С, в августе – 18,1 °С. Осадков выпало на 45 мм меньше среднепогодных значений: 187 мм за вегетационный период, в том числе в мае – 25, в июне – 73, в июле – 22, в августе – 67 мм.

Результаты и обсуждение. Условия вегетационных периодов способствовали умеренному развитию септориоза, мучнистой росы, а также низкому развитию бурой листовой ржавчины. В фазе начала колошения пшеницы пораженность растений септориозом варьировала по годам исследований от 4,8 до 5,1 %, мучнистой росой – от 1,0 до 2,5 %.

К фазе молочной спелости зерна развитие септориоза возросло до 5,4...14,2 %, мучнистой росы – до 5,6...10,8 %, появилась бурая листовая ржавчина, степень развития которой варьировала от 0,4 до 6,1 %. Обработка посевов пшеницы Фитоспорином-М в период молочной спелости зерна оказала подавляющее воздействие только на возбудителей септориоза, биологическая эффективность составила 47,3 %. Применение препарата по фону протравливания семян фунгицидом Скарлет повышало величину этого показателя до 50,5 %, а комплексное использование биопрепаратов (обработка семян и опрыскивание посевов) обеспечило подавление болезни на 40,9 и 31,2 % (табл. 1).

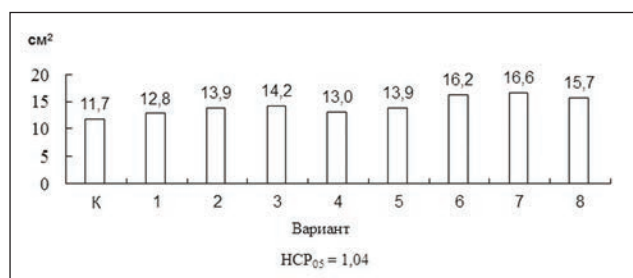
Опрыскивание посевов пшеницы химическим фунгицидом Титул Дуо в сочетании с предпосевной обработкой семян Триходермином или Споробактерином обеспечило к концу вегетации максимальное в опыте снижение пораженности растений септориозом на 75,3 и 63,4 %, бурой листовой ржавчиной – на 86,9 и 82,6 %. Мучнистую росу комплекс Триходермин + Титул Дуо подавлял на 42,2 %. Эффективность указанных сочетаний препаратов была ниже, чем у химических эталонов Скарлет и Титул Дуо, у которых против бурой листовой ржавчины и мучнистой росы она составляла 95,6 и 52,2 %. В отношении септориоза величина этого показателя находилась на одном уровне с другими вариантами – 71,0 %.

Табл. 1. Влияние биопрепаратов на развитие листовых инфекций на посевах яровой пшеницы в фазе начала молочной спелости (среднее за 2019–2021 гг.), %

Вариант	Септориоз		Мучнистая роса		Бурая ржавчина	
	разви- тие бо- лезни	эффе- ктив- ность	разви- тие бо- лезни	эффе- ктив- ность	разви- тие бо- лезни	эффе- ктив- ность
Контроль	9,3	-	9,0	-	2,3	-
Фитоспорин-М	4,9*	47,3	10,0	0	2,6	0
Триходермин + Фитоспорин-М	5,5*	40,9	10,6	0	2,6	0
Споробактерин + Фитоспорин-М	6,4*	31,2	10,4	0	2,3	0
Скарлет + Фитоспорин-М	4,6*	50,5	10,2	0	3,1	0
Титул Дуо	3,1*	66,7	5,3*	41,1	0,3*	86,9
Триходермин + Титул Дуо	2,3*	75,3	5,2*	42,2	0,3*	86,9
Споробактерин + Титул Дуо	3,4*	63,4	8,7	6,7	0,4*	82,6
Скарлет + Титул Дуо	2,7*	71,0	4,3*	52,2	0,1*	95,6

*варианты достоверно отличаются от контроля на уровне P_{05} по критерию U – Манна-Уитни.

Обработка семян и посевов препаратами оказывала влияние на формирование фотосинтетического аппарата пшеницы. Было отмечено в большей или меньшей степени ростостимулирующее воздействие различных комбинаций препаратов на площадь флагового листа (см. рисунок). В опыте рост величины этого показателя, относительно контроля, составил 9,4...41,9 %. Существенное увеличение площади флагового листа отмечали в вариантах с обработкой семян Триходермином или Споробактерином и посевов Фитоспорином-М – соответственно на 18,8 и 21,4 %, при обработке семян Триходермином или Споробактерином и посевов Титулом Дуо – на 38,5 % и 41,9 %, при обработке посевов фунгицидом Титул Дуо – на 18,8 %. В варианте с применением химических препаратов площадь флагового листа возросла, относительно контроля, на 34,2 %.

**Влияние обработок семян и посевов биопрепаратами на площадь флагового листа (среднее за 2019–2021 гг.), см²:**

К – контроль; 1 – Фитоспорин-М; 2 – Триходермин + Фитоспорин-М; 3 – Споробактерин + Фитоспорин-М; 4 – Скарлет + Фитоспорин-М; 5 – Титул Дуо; 6 – Триходермин + Титул Дуо; 7 – Споробактерин + Титул Дуо; 8 – Скарлет + Титул Дуо.

Обработка семян и посевов препаратами оказывала влияние на структуру колоса пшеницы (табл. 2). При сочетании обработки семян биопрепаратами Триходермин или Споробактерин и посевов пшеницы Фитоспорином-М наблюдали тенденцию роста длины колоса (на 8,1...10,6 %), количества колосков (на 6,1...6,2 %) и зерен (на 21,8...23,3 %) в колосе, массы зерна с колоса (на 28,9...30,0 %) и достоверное их увеличение при обработке семян фунгицидом Скарлет (на 12,8, 11,1, 27,2 и 32,2 % соответственно). При сочетании обработки семян и посевов Титулом Дуо все

Табл. 2. Влияние обработки семян и посевов препаратами на структуру урожая и урожайность яровой пшеницы (среднее за 2019–2021 гг.)

Вариант	Колос				Масса 1000 зерен, г	Урожайность, т/га
	длина, см	количество колосков, шт.	количество зерен, шт.	масса зерна, г		
Контроль	8,77	15,37	30,20	0,90	29,36	2,31
Фитоспорин-М	9,42	16,28	32,73	1,00	30,14	2,56
Триходермин + Фитоспорин-М	9,48	16,33	36,80	1,16	30,79	2,53
Споробактерин + Фитоспорин-М	9,70	16,31	37,24	1,17	30,94	2,67
Скарлет + Фитоспорин-М	9,89	17,08	38,42	1,19	30,87	2,60
Титул Дуо	9,37	16,09	36,23	1,18	32,80	2,97
Триходермин + Титул Дуо	10,05	16,85	37,82	1,27	33,43	3,06
Споробактерин + Титул Дуо	9,64	16,61	37,66	1,24	33,27	3,03
Скарлет + Титул Дуо	10,34	17,58	43,31	1,45	33,48	3,11
HSP ₀₅	0,97	1,24	5,62	0,22	0,70	0,19

указанные показатели возрастали на 9,9...17,9; 8,1...14,4; 24,7...43,4 и 37,8...61,1 %. Масса 1000 зерен существенно повышалась во всех вариантах опыта на 2,7...14,0 %. Длина колоса и количество колосков в колосе были выше при обработке семян Триходермином и посевов Титулом Дуо, а также при протравливании семян эталоном Скарлет с опрыскиванием посевов Титулом Дуо. Масса зерна с колоса и масса 1000 зерен были наибольшими при сочетании обработки семян любым из изучаемых препаратов с опрыскиванием посевов фунгицидом Титул Дуо.

Во всех вариантах опыта происходило достоверное увеличение урожайности пшеницы. Сочетание каждого из препаратов для обработки семян с обработкой посевов Фитоспорином-М повышало сбор зерна на 0,22...0,36 т/га относительно контроля, а наибольшая прибавка урожая получена при обработке семян Споробактерином и посевов Фитоспорином-М.

Обработка семян биопрепаратами или Скарлетом с последующим опрыскиванием посевов фунгицидом Титул Дуо обеспечила наибольшие прибавки урожая. В среднем за годы исследований сопоставимыми по урожайности были варианты Триходермин + Титул Дуо, Споробактерин + Титул Дуо и Скарлет + Титул Дуо, в которых ее рост, по отношению к контролю (2,31 т/га), составил 0,75 т/га, 0,72 т/га и 0,80 т/га соответственно.

Выводы. Эффективность Фитоспорина-М и фунгицида Титул Дуо против септориоза на фоне умеренного развития листовых инфекций, составила соответственно 47,3 и 67,7 %, в сочетании с обработкой семян – 31,2...75,3 %. Эффективность обработки семян Триходермином, Споробактерином, Скарлетом и обработки посевов Титулом Дуо против мучнистой росы варьировала от 6,7 до 52,2 %, против бурой листовой ржавчины – от 82,6 до 95,6 %.

Препараты оказывали на культуру ростостимулирующее влияние. Наибольшая площадь флагового листа пшеницы отмечена в вариантах Триходермин + Титул Дуо и Споробактерин + Титул Дуо, в которых она была на 38,5 % и 41,9 % выше относительно контроля (11,7 см²). При сочетании обработки семян любым из изучаемых препаратов с опрыскиванием посевов Фитоспорином-М, или фунгицидом Титул Дуо длина колоса возрастала на 8,1...17,9 %, количество колосков – на 6,1...14,4 %, зерен в колосе – на 21,8...43,4 %, масса

зерна с колоса – на 28,9...61,1 % (для всех перечисленных сочетаний). Масса 1000 зерен во всех вариантах опыта увеличивалась на 2,7...14,0 %.

Наибольший рост урожая зерна отмечали при использовании сочетаний Триходермин + Титул Дуо, Споробактерин + Титул Дуо и Скарлет + Титул Дуо – на 0,75, 0,72 и 0,80 т/га соответственно. Положительное влияние на урожайность оказывали также обработки посевов Фитоспорином-М и Титулом Дуо, что позволило получить дополнительно 0,25 т/га и 0,66 т/га зерна, относительно контроля (2,31 т/га).

Обработки семян биофунгицидами в сочетании с фунгицидной обработкой посевов могут быть рекомендованы для включения в технологии выращивания яровой пшеницы с целью повышения ее продуктивности, снижения токсической нагрузки на ценоз.

Литература

1. Зыков С. А. Биопрепараты в современном земледелии // *Агрофорум*. 2019. № 3. С. 21–27.
2. Ямалиева А. М., Апаева Н. Н. Применение биопрепаратов при возделывании яровой пшеницы // *Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки»*. 2019. Т. 5. № 4. С. 432–439. doi: 10.30914/2411-9687-2019-5-4-432-439.
3. Монастырский О. А., Першакова Т. В. Современные проблемы и решения создания биопрепаратов для защиты сельскохозяйственных культур от возбудителей болезней // *АгроXXI*. 2009. № 7–9. С. 3–5.
4. Поварницына А. В., Шитикова А. В. Биопрепараты: значение в современном земледелии // *Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XIX Международной научно-практической конференции*. Пенза: ООО «Наука и Просвещение», 2021. С. 174–178.
5. Ласточкина О. В. Адаптация и устойчивость растений пшеницы к засухе, опосредованная природными регуляторами роста *Vaccillus spp.*: механизмы реализации и практическая значимость // *Сельскохозяйственная биология*. 2021. Т. 56. № 5. С. 843–867. doi: 10.15389/agrobiology.2021.5.843rus.
6. Ali S., Moon Y. S., Hamayun M., Khan M. A., Bibi K., Lee I. J. Pragmatic role of microbial plant biostimulants in abiotic stress relief in crop plants // *Journal of Plant Interactions*. 2022. Vol. 17. No. 1. P. 705–718. doi: 10.1080/17429145.2022.2091801.
7. Брескина Г. М., Чуян Н. А., Панкова Т. И. Действие биопрепаратов на рост и развитие сельскохозяйственных культур // *Земледелие*. 2021. № 3. С. 27–30. doi: 10.24411/0044-3913-2021-10306.
8. O'Brien P. A. Biological control of plant diseases // *Australasian Plant Pathology*. 2017. Vol. 46. P. 293–304. doi: 10.1007/s13313-017-0481-4.
9. Tariq M., Khan A., Asif M., Khan F., Ansari T., Shariq M., Siddiqui M. A. Biological control: a sustainable and practical approach for plant disease management // *Acta Agriculturae Scandinavica: Section B – Soil and Plant Science*. 2020. Vol. 70. No. 6. P. 507–524. doi: 10.1080/09064710.2020.1784262.
10. Санин С. С., Назарова Л. Н., Неклеса Н. П., Полякова Т. М., Гудвин С. Эффективность биопестицидов и регуляторов роста растений в защите пшеницы от болезней // *Защита и карантин растений*. 2012. № 3. С. 16–18.
11. Puyam A. Advent of Trichoderma as a bio-control agent – A review // *Journal of Applied and Natural Science*. 2016. Vol. 8. No 2. P. 1100–1109. doi: 10.31018/jans.v8i2.927
12. Практические рекомендации по диагностике, учету и защите пшеницы от бурой ржавчины, септориоза и мучнистой росы / С. С. Санин, Г. В. Пыжикова, Н. П. Неклеса и др. М.: Агро НИИТЭИПП, 1988. 28 с.
13. Дмитриев Н. Н., Хуснидинов Ш. К. Методика ускоренного определения площади листовой поверхности сельскохозяйственных культур с помощью компьютерной технологии // *Вестник Красноярского аграрного университета*. 2016. № 7. С. 88–93.
14. Еценко В. Е., Трифонова М. Ф., Копытко П. Г. Основы опытного дела в растениеводстве М.: Колос С, 2009. 268 с.
15. Сорокин О. Д. Прикладная статистика на компьютере. 2-е изд. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2012. 282 с.

Поступила в редакцию 07.06.2023

После доработки 27.06.2023

Принята к публикации 11.07.2023

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШТАММОВ *BACILLUS SUBTILIS* В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ*

Л.Е. Колесников¹, кандидат биологических наук, И.И. Новикова², доктор биологических наук, В.А. Павлюшин², академик РАН, Е.В. Зуев³, кандидат сельскохозяйственных наук, Ю.Р. Колесникова³, кандидат сельскохозяйственных наук

¹Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,
196601, Санкт-Петербург – Пушкин, Петербургское ш., 2
E-mail: kleon9@yandex.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений,
196608, Санкт-Петербург, ш. Подбельского, 3
E-mail: irina_novikova@inbox.ru

³ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42-44
E-mail: ezuev@vir.nw.ru

Исследования выполняли в 2017–2022 гг. с целью выявления природно-климатических факторов, способных влиять на эффективность штаммов *B. subtilis* в отношении морфометрических показателей и продуктивности мягкой пшеницы, а также развития болезней. Оценивали отзывчивость мягкой пшеницы яровой сорта Ленинградка 6, к-64900 на применение микробиологического препарата Виталплан, СП (титр жизнеспособных клеток $\times 10^{11}$ КОЕ/г) и культуральной жидкости (КЖ) штаммов *B. subtilis* VKM B-2604D и *B. subtilis* VKM B-2605D (при соотношении 1:1 с титром жизнеспособных клеток $\times 10^{10}$ КОЕ/мл). Для проведения исследований в полевых условиях Северо-Запада Российской Федерации осуществляли обработку семян пшеницы перед посевом и трехкратное опрыскивание растений в период вегетации. Эффективность штаммов бактерий в большей степени зависела от показателей влагообеспеченности вегетационного периода, что было подтверждено результатами многомерного шкалирования, корреляционного и факторного анализов. В варианте «Виталплан, СП» в F₂ выявлены высокие положительные факторные нагрузки для суммы осадков в июне, июле, августе, ГТК в июле, относительной влажности в июне (0,73...0,93), фазы растений, высоты растений, площади флагового и предфлагового листьев, массы вегетативной части (0,71...0,80), а при использовании КЖ «*B. subtilis* VKM B-2604D + *B. subtilis* VKM B-2605D» – для суммы осадков в июне, августе, ГТК в июле и августе (0,71...0,88), продуктивной кустистости, массы корней, длины колоса, числа колосков в колосе, числа зерен, массы зерен колоса, биологической, потенциальной урожайности (0,71...0,85). Применение штаммов *B. subtilis* повышало биологическую и потенциальную урожайность соответственно на 32,5 $\pm$ 7,2 % и 24,3 $\pm$ 7,0 %, снижало интенсивность развития болезней (корневой гнили – на 11,7 $\pm$ 1,6 %; мучнистой росы, бурой и желтой ржавчины – на 7,6 $\pm$ 0,7 %), однако эффективность бактериальных штаммов существенно зависела от природно-климатических факторов периода вегетации пшеницы.

MODELING THE EFFECTIVENESS OF *BACILLUS SUBTILIS* STRAINS DEPENDING ON NATURAL AND CLIMATIC FACTORS IN THE SOFT WHEAT CULTIVATION

L.E. Kolesnikov¹, I.I. Novikova², V.A. Pavlyushin², E.V. Zuev³, Yu.R. Kolesnikova³

¹Saint-Petersburg State Agrarian University,
196601, Sankt-Peterburg-Pushkin, Peterburgskoe sh., 2,
E-mail: kleon9@yandex.ru

²All-Russian institute of plant protection,
196608, Saint Petersburg-Pushkin, shosse Podbelskogo, 3,
E-mail: irina_novikova@inbox.ru

³FRC N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources,
190000, Sankt-Peterburg, ul. Bol'shaya Morskaya, 42-44,
E-mail: ezuev@vir.nw.ru

The studies were carried out in 2017–2022 in order to identify natural and climatic factors that can influence the effectiveness of *B. subtilis* strains in relation to morphometric indicators and soft wheat productivity, the diseases development. The responsiveness of Leningradka 6, k-64900 spring wheat to the microbiological preparation Vitaplan, SP (titer of viable cells $\times 10^{11}$ CFU/g) and cultural liquid (CL) of the *B. subtilis* VKM B-2604D and *B. subtilis* VKM B-2605D (at a ratio of 1:1 with the titer of viable cells $\times 10^{10}$ CFU/ml). In the field conditions of the North-West of the Russian Federation, wheat seeds were treated before sowing and plants were sprayed three times during the growing season. The effectiveness of bacterial strains in relation to productivity and especially dangerous wheat diseases depended more on the indicators of moisture availability of the growing season. This was confirmed by the results of multidimensional scaling, correlation, factor analysis of indicators. In the variant «Vitaplan, SP» in F₂, high positive factor loads were revealed for the precipitation amount in June, July, August, HTC in July, relative humidity in June (0.73...0.93), plant phase, plant height, area of flag and pre-flag leaves, vegetative part weight (0.71...0.80), and when using CL «*B. subtilis* VKM B-2604D + *B. subtilis* VKM B-2605D» – for the precipitation amount in June, August, HTC in July and August (0.71...0.88), productive bushiness, root weight, spike length, spikelets number per spike, grains number, spike grain weight, biological, potential yield (0.71...0.85). The *B. subtilis* strains application allowed to increase biological and potential yields by 32.5 $\pm$ 7.2 % and 24.3 $\pm$ 7.0 %, and to reduce the intensity of diseases development (root rot – by 11.7 $\pm$ 1.6 %; powdery mildew, brown and yellow rust – by 7.6 $\pm$ 0.7 %), however, the effectiveness of bacterial strains significantly depended on the climatic factors of wheat growing season.

Ключевые слова: мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.), штаммы *Bacillus subtilis*, биопрепарат «Виталплан, СП», продуктивность, биологическая эффективность, болезни пшеницы, природно-климатические факторы

Key words: soft wheat (*Triticum aestivum* L.), *Bacillus subtilis* strains, biological preparation «Vitaplan, WP», wheat productivity, biological efficiency, wheat diseases, natural and climatic factors

*Работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР FGEM-2022–0009 «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве».

Важная проблема современного растениеводства – повышение продуктивности сельскохозяйственных культур и стабилизация фитосанитарного состояния агроценозов при сохранении плодородия почвы [1, 2]. На сегодняшний день в России наблюдают значительное изменение климата. По прогнозам Росгидромета, уже к середине XXI в. средняя температура на территории страны поднимется на 2...3 °С. Последствия климатических изменений (повышение температуры, изменение количества осадков, неустойчивый характер погоды), несомненно, отразятся как на продуктивности агроценозов, так и на распространении вредных организмов, а также их вредоносности. Под воздействием высокой температуры у растений прогнозируют изменения в метаболизме РНК и синтезе белка, нарушение функционирования различных ферментов, что может оказать влияние на их устойчивость к возбудителям болезней [3, 4]. Кроме того, с увеличением потенциальной продуктивности пшеницы в результате селекции возрастает разрыв между максимальной и минимальной урожайностью в различные по метеословиям годы, усиливается экологическая зависимость создаваемых сортов [5].

До сегодняшнего дня одним из основных приемов борьбы с болезнями растений было использование фунгицидов. Однако, воздействуя на микробиом почвы, они вносят существенные отрицательные изменения в его структуру, что обуславливает снижение супрессивности и плодородия почвы, а впоследствии негативно влияет на продуктивность многих культур севооборота [6]. Одной из стратегий повышения урожайности зерновых культур и снижения вредоносности возбудителей болезней в изменяющихся условиях климата может быть использованием полезных микроорганизмов (PGPB, Plant Growth-Promoting Bacteria), в том числе отселектированных природных штаммов *Bacillus subtilis*. Преимущество спорообразующих бактерий рода *Bacillus*, по сравнению с другими микроорганизмами, заключается в их повсеместном распространении и наличии комплекса ценных для сельскохозяйственного производства характеристик, некоторые из которых используют для разработки микробиологических средств защиты растений [7].

Эффективность контроля плотности популяций фитопатогенов при применении микробиологических препаратов зависит от биологических особенностей штаммов-продуцентов и обусловлена такими факторами как успешная конкуренция за питательные вещества и пространство для колонизации почвы и ризосферы, способность микроорганизмов синтезировать биологически активные соединения и др. [8]. Некоторые штаммы *B. subtilis* могут формировать биопленки вокруг поверхности корней и обладают выраженной антагонистической активностью в отношении фитопатогенных микроорганизмов, синтезируя такие антибиотики, как итиурин, фенгизин, миксирин, пумиладин, сурфактин [9]. Они способны индуцировать реакции фитоиммунитета посредством физиологических изменений в фотосинтетических и дыхательных путях, регуляции метаболизма углеводов, фенилпропаноидов и азота, а также образования защитных белков у зараженных растений [10, 11]. Штаммы *B. subtilis* обладают ростостимулирующим действием, участвуя в синтезе широкого спектра биологически активных веществ, включая витамины, способствуют улучшению усвоения важнейших элементов минерального питания из почвы, в частности, преобразуют сложные формы химических соединений азота и фосфора в доступную для растений форму [12, 13, 14]. Бациллы способны повышать адаптивный потенциал растений к физиологическим стрессам, в том числе к за-

сухе, засолению, перепадам температур, УФ-излучению, загрязнению почвы тяжелыми металлами [15].

Характер взаимоотношений между штаммами *B. subtilis* и растением-хозяином может варьировать от мутуализма до комменсализма и зависит от вида стрессового воздействия, специфичности взаимодействующих генотипов биообъектов, состава корнеассоциированного микробиома растения. Указанные факторы и их взаимодействие оказывают разностороннее влияние на растительный организм в изменяющихся условиях среды, а изучение этой сложной системы – фитобиома, дает материал для оценки изменчивости положительного действия вносимых микробиологических препаратов и анализа причин их ограниченного мутуалистического влияния [16, 17].

При этом в ряде исследований подчеркнута недостаточная изученность факторов, определяющих варьирование эффективности штаммов *B. subtilis* при возделывании сельскохозяйственных культур, в том числе зерновых, в полевых условиях [18, 19].

Цель исследования – выявление природно-климатических факторов, способных влиять на эффективность штаммов *B. subtilis* в отношении морфометрических показателей продуктивности мягкой пшеницы и интенсивности развития болезней.

Методика. Работу выполняли в 2017–2022 гг. на полях научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова» (Ленинградская обл., 59° 44' с. ш. 30° 24' в. д.). Поля имеют выровненный рельеф. Почвы дерново-слабоподзолистые, супесчаные и суглинистые по механическому составу, хорошо окультуренные: водородный показатель солевой вытяжки pH = 4,8 (ГОСТ 26483-8); фосфор подвижный в пересчете на P₂O₅ (ГОСТ Р 54650–2011) – 3455 ± 691 мг/кг; калий подвижный в пересчете на K₂O (ГОСТ Р 54650–2011) – 97,5 ± 14,6 мг/кг; органическое вещество (ГОСТ 26213-2021) – 3,55 ± 0,53 %.

Микрополевой опыт (общая площадь делянки 10 м²) был заложен в трехкратной повторности методом организованных повторений. Площадь учетной делянки одного варианта опыта составила 1,0 м², расположение в повторениях – систематическое.

В работе использовали сорт мягкой пшеницы яровой (*Triticum aestivum* L.) Ленинградская 6, к-64900, который был районирован с 1972 по 2015 гг. Однако до сих пор его используют в качестве модельного во многих исследованиях по пшенице в Северо-Западном регионе России [20, 21].

Объект изучения – штаммы бактерий *B. subtilis* ВКМ В-2604Д и *B. subtilis* ВКМ В-2605Д в двух препаративных формах: Витаплан, СП (смачивающийся порошок, ×10¹¹ КОЕ/г) и культуральная жидкость (КЖ) штаммов-продуцентов (титр ×10¹⁰ КОЕ/мл). В работе использовали КЖ, полученную при глубинном культивировании штаммов-продуцентов препарата Витаплан, СП – *B. subtilis* ВКМ В-2604Д и *B. subtilis* ВКМ В-2605Д. Глубинное культивирование проводили при 28 °С в течение 72 ч на питательной среде следующего состава (г/л): кукурузный экстракт – 30, меласса – 15, pH – 7,2 в колбах объемом 750 мл с 100 мл среды на круговой качалке при 220 об./мин. Титр полученной культуральной жидкости составил 10¹⁰ КОЕ/мл.

Методы производства полифункциональных биопрепаратов и комплексов, объединяющих полезные свойства отселектированных штаммов микроорганизмов-антагонистов возбудителей болезней и активатора

болезнеустойчивости растений салицилата хитозана разработаны И. И. Новиковой (ФГБНУ ВИЗР) [22].

Схема опыта предусматривала следующие варианты: контроль (вода);

Витаплан, СП (стандарт), содержащий клетки штаммов *B. subtilis* ВКМ В-2604Д и *B. subtilis* ВКМ В-2605Д; культуральная жидкость штаммов *B. subtilis* ВКМ В-2604Д и *B. subtilis* ВКМ В-2605Д в соотношении 1:1 (КЖ *B. subtilis* ВКМ В-2604Д + ВКМ В-2605Д).

При проведении исследований в полевых условиях осуществляли обработку семян мягкой пшеницы яровой (сорт Ленинградка 6, к-64900) перед посевом и трехкратное опрыскивание растений в фазы кущения, выхода в трубку, цветения.

Биопрепарат Витаплан, СП, разработанный на основе штаммов *Bacillus subtilis* ВКМ В-2604Д и *B. subtilis* ВКМ В-2605Д без включения дополнительных компонентов включен в Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных для использования на территории РФ. Предпосевную обработку семян Витапланом, СП осуществляли нормой 0,25 мл 1 %-ной суспензии биопрепарата на 1000 семян, опрыскивание растений – из расчета 40 г/га (4 мг/м²). Обработку семян во всех вариантах опыта проводили в течение 1 ч, опрыскивание растений – при расходе рабочего раствора 100 мл/м².

В экспериментальных вариантах растения опрыскивали культуральной жидкостью штаммов *B. subtilis* в разведении 1:10, с титром жизнеспособных клеток $\times 10^9$ КОЕ/мл. В исходной культуральной жидкости титр жизнеспособных клеток составлял $\times 10^{10}$ КОЕ/мл. Титр жизнеспособных клеток в рабочем растворе препарата Витаплан, СП также составлял $\times 10^9$ КОЕ/г (мл) в соответствии с рекомендуемыми нормами применения.

При анализе элементов продуктивности пшеницы использовали следующие показатели: полевая всхожесть, высота растения, количество и длина первичных корней, количество и длина узловых корней, масса корней, продуктивная кустистость, общая кустистость, площадь флагового и предфлагового листа, масса вегетативной части, длина колоса, число колосков в колосе, масса колоса, число зерен в колосе, масса зерен одного колоса, масса 1000 зерен. Кроме того, учитывали биологическую зерновую продуктивность пшеницы (г/растение) и, на ее основе, потенциальную урожайность культуры с единицы площади (т/га) с учетом данных по полевой всхожести, определяющей густоту стеблестоя посевов [23].

Пораженность пшеницы болезнями изучали по комплексу общепринятых параметров их развития и дополнительных фитопатологических показателей: корневая гниль – развитие, %; бурая ржавчина – развитие, %; число пустул и площадь пустулы (мм²); желтая ржавчина – развитие, %; число полос с пустулами, длина полосы с пустулами (мм), число пустул в полосе, суммарное число пустул на листе; площадь пустулы (мм²); мучнистая роса – развитие, %; число и площадь пятен (мм²) с налетом [24]. Биологическую эффективность бактериальных штаммов (БЭ) определяли по формуле Аббота [25].

Алгоритм компьютерной обработки результатов исследования включал создание кодировочной таблицы значений показателей в системе IBM SPSS, конвертирование абсолютных значений, полученных в вариантах опыта в относительные величины, характеризующие их изменение к контролю (без обработки), сопоставление полученных относительных величин показателей с метеорологическими условиями и активностью Солнца по вариантам опыта, повторностям и периоду исследования в программном комплексе Statistica 12.0.

Графические средства пакетов IBM SPSS и Statistica 12.0 использовали для построения категоризированных графиков рассеяния (2D Categorized Scatterplots) средних абсолютных и относительных значений фитопатологических и фитометрических характеристик посевов с указанием стандартной ошибки опыта. Численные методы обработки данных были основаны на выявлении различий между относительными изменениями фитометрических и фитопатологических показателей в вариантах относительно контроля с использованием критерия Стьюдента при $p < 0,05$.

При анализе взаимосвязей изменения относительных величин фитометрических и фитопатологических показателей при применении бактериальных культур (2017–2022 гг.) как между собой, так и в зависимости от комплекса метеорологических факторов, активности Солнца (по числу пятен, индексу Вольфа, УФ-индекса), были построены диагональные матрицы коэффициентов корреляции Пирсона по вариантам опыта и повторностям с указанием уровня их значимости. По отрицательному числу выявленных положительных θ_{+} и отрицательных θ_{-} коэффициентов корреляции в вариантах опыта анализировали преобладающие тенденции, обусловленные природно-климатическими факторами.

При построении многомерной модели различий между значениями относительных изменений комплекса фитопатологических показателей в вариантах опыта в зависимости от метеорологических условий периодов вегетации, использовали методику многомерного шкалирования. Матрица различий между указанными показателями в Евклидовом пространстве была представлена в виде двухмерного графического изображения их взаимного расположения. Достоверность модели подтверждена диаграммой Шепарда, отражающей зависимость воспроизведенных расстояний Евклида, рассчитанных для фитопатологических показателей пшеницы и метеофакторов, от исходных с использованием метода монотонного преобразования (регрессии). Исходные величины расстояний были согласованы со ступенчатой функцией их преобразования.

Метод факторного анализа применяли для анализа причинно-следственных связей изменения фитометрических и фитопатологических характеристик посевов пшеницы в зависимости от метеорологических условий и активности Солнца. При построении факторной модели, представленной в работе, было выявлено пять факторов ($F_1, \dots, F_5$), описывающих линейные статистические связи (корреляции) между рассматриваемыми показателями. Выявленные факторы включали группы показателей, коррелирующих между собой больше, чем с показателями, входящими в группу другого фактора. Каждый из факторов представлял одну из сторон внутренней структуры взаимосвязи между переменными, что было выражено коэффициентами в линейных комбинациях – факторными нагрузками на переменные. По знакам, величинам нагрузок и природе исходных переменных осуществляли интерпретацию выделенных линейных комбинаций.

Результаты и обсуждение. Культуральная жидкость оказала большее влияние на биологическую (Y_0 , г/растение) и потенциальную (Y_1 , т/га) урожайность пшеницы, чем Витаплан, СП (рис. 1). В среднем за 2017–2022 гг. увеличение биологической урожайности в варианте опыта с КЖ бактерий, по сравнению с контролем, составило $38,5 \pm 10,8$ %, потенциальной – $26,5 \pm 10,9$ %, при использовании Витаплан, СП – соответственно $26,5 \pm 9,4$ % и $22,1 \pm 10,3$ %, одновременно развитие комплекса болезней снижалось по вариантам опыта на $10,2 \pm 2,1$ % и $7,1 \pm 2,1$ %.

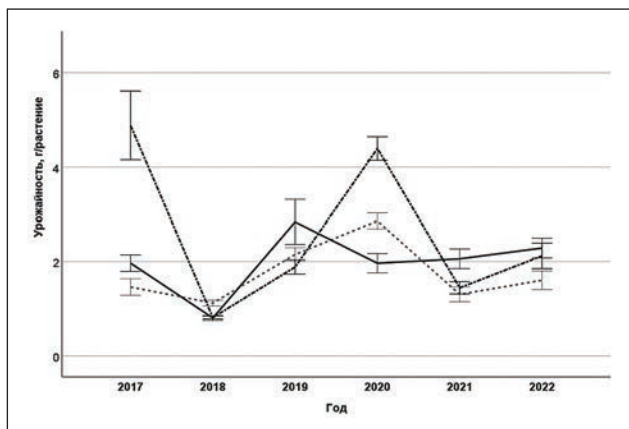


Рис. 1. Динамика биологической урожайности мягкой пшеницы при применении микробиологического препарата Витаплан, СП и культуральной жидкости штаммов *B. subtilis* BKM B-2604D и *B. subtilis* BKM B-2605D: — контроль (вода), --- *B. subtilis* BKM B-2604D + *B. subtilis* BKM B-2605D, — Витаплан, СП.

В 2017 г. в варианте с применением КЖ бактериальных штаммов, по сравнению с контролем, зарегистрировано максимальное в опыте увеличение урожайности пшеницы (на 3,4 г, или 234,5 %) при наибольшем снижении поражения растений (рис. 2а) корневой гнилью на 34,3 % (БЭ = 94,4 %), бурой ржавчиной – на 18,9 % (БЭ=93,4 %). В 2020 г. существенный рост урожайности пшеницы в этом варианте опыта (на 1,5 г, или 53,7 %) был обусловлен самым высоким снижением поражения растений мучнистой росой на 23,9 % (БЭ=44,4 %), корневой гнилью – на 10,1 %, (БЭ=55,2 %), желтой ржавчиной – на 17,8 % (БЭ=38,4 %).

В варианте с применением микробиологического препарата Витаплан, СП наибольший рост урожайности пшеницы на 81,2 %, относительно контроля, выявлен в 2019 г. (см. рис. 1). Это было обусловлено наибольшим снижением развития корневой гнили (рис. 2б) на 22,2 % (БЭ=38,9 %), бурой ржавчиной на 21,6 % (БЭ=62,8 %) и желтой ржавчиной на 22,1 (БЭ=88,1 %).

В среднем за 2017–2022 гг. достоверное ($p < 0,05$) снижение развития корневой гнили в варианте опыта с применением препарата Витаплан, СП, по сравнению с контролем, составляло $5,6 \pm 2,6$ %, с КЖ бактериальных штаммов – $17,8 \pm 2,0$ % (в 38,9 % и 61,1 % случаев), мучнистой росы – соответственно $6,1 \pm 2,9$ % и $6,3 \pm 1,3$ % (в 22,2 % и 50,0 % случаев), бурой ржавчиной – $7,8 \pm 2,4$ % и $10,2 \pm 1,4$ % (в 27,8 % и 44,4 % случаев), желтой ржавчины – $9,0 \pm 1,5$ % и $6,3 \pm 1,7$ % (в 27,8 % и 22,2 % случаев). Более высокая биологическая активность культуральной жидкости бактериальных штаммов, на наш взгляд, обусловлена наличием комплекса биологически активных веществ (БАВ), включающего соединения с разной химической структурой и механизмом действия. В сухой препаративной форме (СП) споры штаммов-продуцентов при наличии влаги прорастают и образуют вегетативные метаболизирующие клетки, что требует некоторого времени.

При анализе взаимосвязей между морфометрическими показателями продуктивности пшеницы и поражаемостью растений болезнями при применении изучаемых препаратов по годам исследования выявлена тенденция снижения числа колосков в колосе с усилением поражения растений мучнистой росой и корневой гнилью ($\theta_{\text{к}} = 58,3$ %). Отмечено преобладание тенденции роста биологической и потенциальной урожайности пшеницы с повышением БЭ биопрепарата Витаплан, СП и КЖ бактериальных штаммов в отношении мучнистой росы, бурой и желтой ржавчины – $\theta_{\text{к+}} = 67$ %, корневой гнили – $\theta_{\text{к+}} = 83$ % и $\theta_{\text{к+}} = 100$ % соответственно.

Во всех вариантах опыта рост полевой всхожести семян пшеницы $\Pi_{\text{в}}$, по сравнению с контролем, приводил к усилению поражения пшеницы мучнистой росой $R_{\text{м}}$ и желтой ржавчиной $R_{\text{ж}}$. Указанная зависимость ($R^2 = 0,44$; $F = 14,3$; $P = 0,00007$) имеет вид: $\Pi_{\text{в}} = 1,231 \pm 0,41 + 0,497 \pm 0,168 R_{\text{м}} + 0,786 \pm 0,237 R_{\text{ж}}$. Коэффициенты регрессионной модели статистически значимы при $p < 0,01$. Одним из решающих условий роста продуктивности пшеницы считают формирование оптимального количества растений на единице площади, что в значительной степени зависит от полевой всхожести семян. Возможно, выявленная тенденция связана с изменением густоты стеблестоя, влияющей на микроклимат в по-

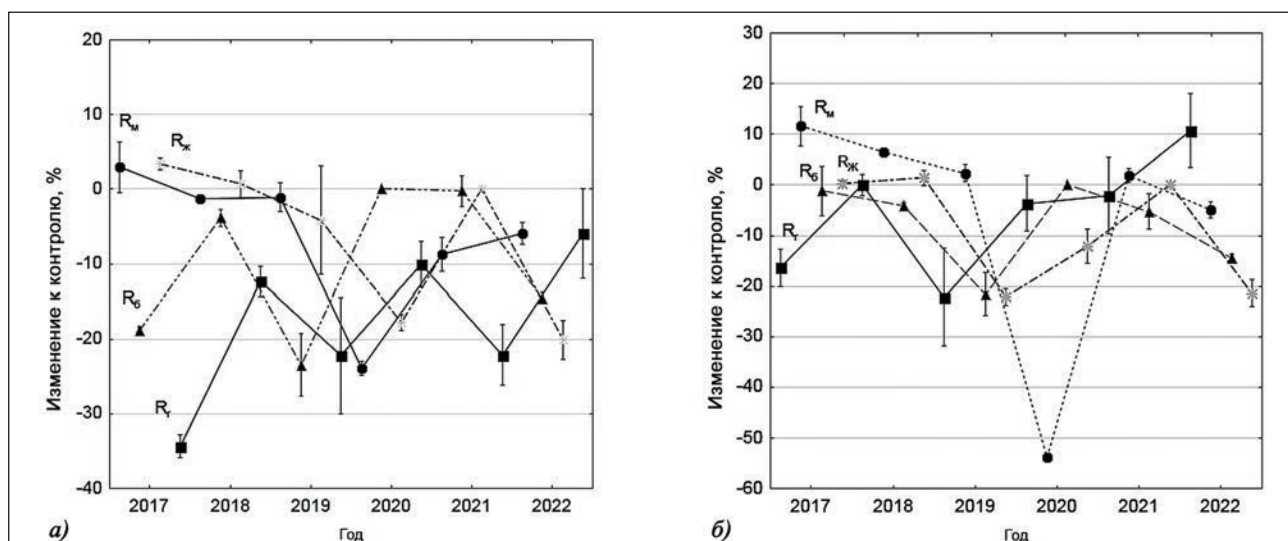


Рис. 2. Динамика относительного изменения развития особо опасных возбудителей болезней пшеницы при применении КЖ (а) штаммов *B. subtilis* BKM B-2604D и *B. subtilis* BKM B-2605D и микробиологического препарата Витаплан, СП (б), по сравнению с контролем (2017–2022 гг.): $R_{\text{г}}$ – развитие корневой гнили, $R_{\text{м}}$ – мучнистой росы, $R_{\text{б}}$ – бурой ржавчины, $R_{\text{ж}}$ – желтой ржавчины.

сее, который зависит от равномерности освещения, проветриваемости, температуры, влажности и др., что может определять интенсивность поражения растений болезнями [26].

Увеличение продуктивной кустистости растений сопровождалось ростом площади пятна мучнистой росы, площади пустулы бурой ржавчины ($\theta_{\text{к+}}=83\%$) и желтой ржавчины ($\theta_{\text{к+}}=67\%$). При этом повышение общей кустистости растений приводило к снижению пораженности растений бурой ржавчиной, корневой гнилью ($\theta_{\text{к-}}=83\%$) и желтой ржавчиной ($\theta_{\text{к-}}=100\%$). В большинстве вариантов опыта высота растений и площадь флагового листа положительно коррелировали со степенью поражения растений мучнистой росой ($\theta_{\text{к+}}=67\%$, $\theta_{\text{к+}}=100\%$), бурой ($\theta_{\text{к+}}=67\%$, $\theta_{\text{к+}}=67\%$) и желтой ($\theta_{\text{к+}}=83\%$, $\theta_{\text{к+}}=67\%$) ржавчиной, но отрицательно – с развитием корневой гнили ($\theta_{\text{к+}}=67\%$, $\theta_{\text{к+}}=83\%$). Выявленные зависимости можно объяснить морфологическими и физиолого-биохимическими особенностями растений. Флаговые листья продуктивных стеблей с колосами отличались от непродуктивных большими размерами и содержанием повышенного запаса питательных веществ, необходимого для развития видов ржавчины и мучнистой росы – облигатных паразитов, живущих исключительно за счет растения-хозяина. Возбудители корневой гнили относятся к группе факультативных паразитов и поражают преимущественно ослабленные растения, в том числе – неспособные формировать колосья [27].

Рост массы и числа первичных корней ($\theta_{\text{к+}}=67\%$), а также числа и длины узловых корней ($\theta_{\text{к+}}=83\%$, $\theta_{\text{к+}}=67\%$) приводил к усилению поражения растений мучнистой росой. Развитие желтой и бурой ржавчины также усиливалось с увеличением числа первичных корней ($\theta_{\text{к+}}=67\%$), но снижалось с ростом числа и длины узловых корней ($\theta_{\text{к+}}=67\%$, $\theta_{\text{к+}}=83\%$). Выявлены отрицательные корреляционные взаимосвязи между поражением растений корневой гнилью и числом, длиной первичных ($\theta_{\text{к-}}=67\%$) и узловых корней ($\theta_{\text{к-}}=67\%$ и $\theta_{\text{к-}}=100\%$).

Изучение взаимосвязей между изменениями в фитопатологических характеристиках пшеницы при применении изучаемых препаратов показало, что снижение поражения пшеницы корневой гнилью в варианте с КЖ *B. subtilis* BKM B-2604D + *B. subtilis* BKM B-2605D сопровождалось усилением развития мучнистой росы пшеницы ($r=-0,63$, $p=0,03$), что способствовало снижению поражения растений бурой ржавчиной ($r=-0,56$, $p=0,02$). Возрастание биологической эффективности в отношении развития мучнистой росы сопровождалось усилением развития бурой ржавчины ($r=0,47$, $p=0,04$) и снижением площади пустулы микромицета ($r=-0,61$, $p=0,008$). Рост биологической эффективности в отношении бурой ржавчины оказывал влияние на снижение площади пустулы желтой ржавчины ($r=-0,47$, $p=0,04$).

В варианте опыта Витаплан, СП отмечено, что с ростом биологической эффективности в отношении корневой гнили наблюдали увеличение площади пустулы бурой ржавчины ($r=0,45$, $p=0,04$), а с ростом биологической эффективности в отношении мучнистой росы выявлено снижение пораженности растений желтой ржавчиной (развитие болезни – $r=-0,49$, $p=0,04$; число полос с пустулами – $r=-0,67$, $p=0,002$). Рост биологической эффективности в отношении бурой ржавчины способствовал снижению числа пустул желтой ржавчины в полосе ($r=-0,49$, $p=0,04$), а увеличение биологической эффективности в отношении желтой ржавчины приводило к уменьшению площади пустулы бурой ржавчины ($r=-0,59$, $p=0,01$).

Табл. 1. Факторный анализ данных о биологической эффективности препарата Витаплан, СП, метеорологических условий и значений относительного изменения к контролю фитопатологических показателей поражения пшеницы болезнями (2017–2022 гг.)

Показатель	Факторные нагрузки				
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
Фаза развития растения	0,71*	-0,09	-0,07	0,34	0,05
Высота растения, см	0,80*	0,03	-0,01	0,21	-0,08
Число корней, шт.	0,12	0,29	0,15	0,04	0,19
Длина корней, мм	-0,05	0,18	-0,08	0,60	-0,22
Число узловых корней, шт.	0,04	0,06	-0,13	0,84*	0,02
Длина узловых корней, мм	0,06	-0,10	-0,48	0,64	-0,01
Продуктивная кустистость, шт.	0,14	0,00	0,17	0,67	0,20
Общая кустистость, шт.	-0,39	0,26	-0,12	0,53	0,22
Площадь флагового листа, см ²	0,74*	-0,13	-0,26	0,32	-0,19
Площадь предфлагового листа, см ²	0,79*	0,01	-0,20	0,24	-0,05
Масса корней, г	0,36	0,15	-0,18	0,67	0,01
Масса колоса, г	0,24	0,07	-0,18	0,10	0,45
Масса вегетативной части, г	0,77*	0,15	-0,40	0,03	-0,06
Всхожесть полевая, %	0,09	0,08	0,51	0,05	-0,69
Длина колоса, см	0,70	-0,11	0,28	0,22	0,39
Число колосков в колосе, шт.	0,65	-0,12	0,06	0,31	0,39
Число зерен в колосе, шт.	0,42	0,22	0,35	0,14	0,04
Масса зерен одного колоса, г	0,51	0,07	0,29	0,44	0,12
Масса 1000 зерен, г	0,34	0,02	0,18	0,50	0,14
Биологическая урожайность, г/растение	0,12	0,08	0,25	0,79*	0,12
Потенциальная урожайность, т/га	0,10	0,14	0,26	0,83*	0,00
Сумма температур выше 10 °С (май, с 11 числа), °С	-0,08	-0,46	0,50	0,05	-0,64
Сумма осадков (май, с 11 числа), мм	-0,21	-0,46	0,41	0,00	0,64
Сумма температур (июнь), °С	-0,12	-0,05	0,64	0,02	0,63
Сумма осадков (июнь), °С	0,84*	-0,13	-0,47	0,02	0,07
Сумма температур (июль), °С	0,04	0,14	0,92*	-0,17	-0,23
Сумма осадков (июль), мм	0,73*	-0,12	-0,63	0,03	-0,15
Сумма температур (август), °С	0,64	0,55	-0,13	0,16	-0,44
Сумма осадков (август), мм	0,88*	0,37	0,02	0,00	-0,15
ГТК (июль), ед.	0,93*	-0,08	0,11	-0,18	0,06
ГТК (август), ед.	0,67	0,59	0,31	-0,08	0,12
Число пятен на Солнце (среднее за год), шт.	0,01	0,96*	0,05	0,21	0,01
Число пятен на Солнце (в июле), шт.	-0,01	0,95*	0,11	0,21	0,04
Число пятен на Солнце (в августе), шт.	0,18	0,94*	-0,06	0,22	-0,08
Число Вольфа (июль), ед.	-0,06	0,95*	0,08	0,21	0,07
Число Вольфа (август), ед.	0,00	0,95*	-0,08	0,22	-0,01
Относительная влажность (май), %	0,67	-0,13	0,50	0,21	-0,27
Относительная влажность (июнь), %	0,74	-0,30	-0,38	-0,10	-0,39
Относительная влажность (июль), %	0,28	-0,14	-0,87*	-0,18	0,03
Относительная влажность (август), %	0,40	0,43	0,61	-0,11	0,41
УФ-индекс (май), ед.	0,16	-0,31	0,54	-0,47	-0,48
УФ-индекс (июнь), ед.	-0,30	0,31	0,69	-0,06	0,50
УФ-индекс (июль), ед.	-0,11	0,05	0,92*	-0,30	-0,04
УФ-индекс (август), ед.	-0,35	0,86*	0,06	-0,17	0,09
Развитие мучнистой росы, %	0,05	0,05	0,15	0,37	-0,79*
Биологическая эффективность (мучнистая роса), %	0,30	0,24	0,11	0,19	0,79*
Число пятен с налетом мучнистой росы, шт.	-0,03	-0,23	-0,11	-0,18	-0,80*
Площадь пятна мучнистой росы, мм ²	0,11	-0,11	0,74*	0,29	-0,11
Развитие бурой ржавчины, %	0,48	-0,07	0,20	-0,39	0,02
Биологическая эффективность (бурая ржавчина), %	-0,50	0,39	-0,30	0,34	-0,24
Число пустул бурой ржавчины, шт.	0,09	-0,28	0,70	0,15	0,11
Площадь пустулы бурой ржавчины, мм ²	0,09	-0,67	0,17	-0,20	-0,16
Развитие желтой ржавчины, %	0,41	-0,25	0,34	-0,36	-0,55
Биологическая эффективность (желтая ржавчина), %	-0,48	0,11	-0,06	0,47	0,54
Число полос с пустулами желтой ржавчины, шт.	0,18	-0,17	0,01	-0,40	-0,70*
Длина полосы с пустулами желтой ржавчины, мм	0,38	-0,18	0,29	-0,22	-0,20
Число пустул в полосе желтой ржавчины, шт.	0,78*	-0,12	0,34	-0,32	-0,11
Суммарное число пустул желтой ржавчины на лист, шт.	0,51	-0,18	0,09	-0,54	-0,41
Площадь пустулы желтой ржавчины, мм ²	-0,20	-0,18	0,19	-0,21	0,50
Развитие корневой гнили, %	-0,04	0,55	0,01	-0,38	0,04
Биологическая эффективность (корневая гниль), %	0,13	-0,51	-0,04	0,39	-0,22

* (здесь и в табл. 2) – факторные нагрузки статистически достоверны при $p<0,05$.

Табл. 2. Факторный анализ данных о биологической эффективности культуральной жидкости (КЖ) штаммов *B. subtilis* ВКМ В-2604Д и *B. subtilis* ВКМ В-2605Д, метеорологических условий и значений относительного изменения к контролю фитопатологических показателей поражения пшеницы особо опасными болезнями (2017–2022 гг.)

Показатель	Факторные нагрузки				
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅
Фаза растения, балл	0,55	-0,26	0,08	-0,17	-0,14
Высота растения, см	0,39	0,02	0,03	0,04	-0,19
Число корней, шт.	0,09	0,16	0,07	0,15	0,57
Длина корней, мм	0,14	0,17	0,08	0,01	0,82*
Число узловых корней, шт.	0,58	0,11	-0,20	0,01	0,20
Длина узловых корней, мм	-0,17	-0,53	-0,15	0,36	0,55
Продуктивная кустистость, шт.	0,71*	-0,14	-0,20	-0,07	0,06
Общая кустистость, шт.	-0,05	-0,12	-0,01	0,56	0,48
Площадь флагового листа, см ²	0,46	0,23	-0,19	0,23	0,39
Площадь предфлагового листа, см ²	0,23	-0,07	-0,21	0,44	0,41
Масса корней, г	0,74*	0,11	-0,22	0,08	0,26
Масса колоса, г	-0,16	-0,29	0,00	0,71*	0,51
Масса вегетативной части, г	0,17	0,42	-0,29	0,60	0,20
Всхожесть полевая, %	-0,11	0,36	0,39	-0,69	0,13
Длина колоса, см	0,85*	0,07	0,18	0,04	0,05
Число колосков в колосе, шт.	0,75*	0,03	0,08	-0,05	-0,16
Число зерен в колосе, шт.	0,72*	-0,08	0,31	0,18	0,05
Масса зерен одного колоса, г	0,80*	0,12	-0,08	0,23	0,24
Масса 1000 зерен, г	0,42	0,34	-0,47	0,18	0,41
Биологическая урожайность, г/растение	0,76*	-0,02	-0,21	0,10	0,03
Потенциальная урожайность, т/га	0,71*	0,11	-0,15	-0,01	0,32
Сумма температур выше 10 °С (май, с 11 числа), °С	-0,13	-0,35	0,48	-0,64	0,41
Сумма осадков (май, с 11 числа), мм	-0,08	-0,60	0,50	0,50	-0,21
Сумма температур (июнь), °С	0,09	-0,21	0,71*	0,56	-0,18
Сумма осадков (июнь), °С	0,71*	-0,18	-0,62	-0,09	-0,07
Сумма температур (июль), °С	0,15	0,15	0,91	-0,28	0,06
Сумма осадков (июль), мм	0,55	-0,11	-0,77	-0,25	0,02
Сумма температур (август), °С	0,59	0,59	-0,28	-0,33	0,29
Сумма осадков (август), мм	0,85*	0,33	-0,15	-0,21	0,05
ГТК (июль), ед.	0,88*	-0,15	-0,04	-0,19	-0,16
ГТК (август), ед.	0,76*	0,51	0,21	0,06	-0,11
Число пятен на Солнце (среднее за год), шт.	0,14	0,93*	0,04	0,27	0,13
Число пятен на Солнце (в июле), шт.	0,13	0,91*	0,11	0,30	0,12
Число пятен на Солнце (в августе), шт.	0,26	0,92*	-0,10	0,15	0,17
Число Вольфа (июль), ед.	0,08	0,91*	0,09	0,33	0,11
Число Вольфа (август), ед.	0,10	0,93*	-0,09	0,26	0,13
Относительная влажность (май), %	0,69	-0,16	0,37	-0,32	0,37
Относительная влажность (июнь), %	0,54	-0,24	-0,54	-0,55	0,05
Относительная влажность (июль), %	0,09	-0,10	-0,92*	-0,09	-0,27
Относительная влажность (август), %	0,58	0,29	0,57	0,31	-0,22
УФ-индекс (май), ед.	0,09	-0,20	0,49	-0,70*	-0,11
УФ-индекс (июнь), ед.	-0,06	0,19	0,79*	0,51	-0,20
УФ-индекс (июль), ед.	0,02	0,05	0,95*	-0,15	-0,13
УФ-индекс (август), ед.	-0,23	0,87*	0,13	0,24	-0,22
Развитие мучнистой росы, %	0,04	0,00	-0,15	-0,27	0,80*
Биологическая эффективность (мучнистая роса), %	-0,39	0,55	0,17	-0,30	-0,33
Число пятен с налетом мучнистой росы, шт.	0,18	-0,66	-0,11	0,59	-0,07
Площадь пятен мучнистой росы, мм ²	0,63	-0,27	0,41	0,06	-0,08
Развитие бурой ржавчины, %	-0,04	0,11	0,46	-0,25	-0,69
Биологическая эффективность (буря ржавчина), %	0,01	0,34	-0,63	0,01	0,57
Число пустул бурой ржавчины, шт.	0,03	-0,13	0,65	-0,19	-0,20
Площадь пустулы бурой ржавчины, мм ²	0,37	-0,88*	-0,03	0,05	-0,01
Развитие желтой ржавчины, %	0,12	-0,24	0,18	-0,72*	0,00
Биологическая эффективность (желтая ржавчина), %	-0,03	0,08	0,16	0,72*	-0,01
Число полос с пустулами желтой ржавчины, шт.	0,35	-0,05	-0,25	-0,68	0,04
Длина полосы с пустулами желтой ржавчины, мм	-0,13	-0,12	-0,03	-0,61	-0,02
Число пустул в полосе желтой ржавчины, шт.	0,26	-0,24	-0,16	-0,66	0,07
Суммарное число пустул желтой ржавчины на лист, шт.	0,39	-0,12	-0,31	-0,61	0,00
Площадь пустулы желтой ржавчины, мм ²	0,25	-0,23	0,09	0,31	-0,72*
Развитие корневой гнили, %	-0,39	0,41	-0,07	0,03	-0,48
Биологическая эффективность (корневая гниль), %	0,48	-0,43	0,22	-0,03	0,27

При изучении взаимосвязей между метеорологическими условиями, активностью Солнца и изменениями в фитометрических и фитопатологических характеристиках посевов пшеницы при применении биопрепарата Витаплан, СП и КЖ штаммов *B. subtilis* ВКМ В-2604Д и *B. subtilis* ВКМ В-2605Д были выделены факторы (F₁...F₅), которые объясняли общую дисперсию перемешанных в указанных вариантах опыта на 73...74 %.

При обработке Витапланом, СП в F₁ отмечены высокие положительные факторные нагрузки (0,71...0,93) для комплекса таких фитометрических показателей, как фазы развития растений, высота растений, площадь флагового и предфлагового листа, масса вегетативной части, фитопатологического показателя – число пустул в полосе желтой ржавчины, метеорологических показателей – сумма осадков в июне, июле и августе, гидротермического коэффициента ГТК в июле, относительной влажности воздуха в июне (табл. 1).

В F₁ рост значений перечисленных метеорологических показателей оказывал наибольшее влияние на увеличение выделенных морфометрических характеристик пшеницы, а также способствовал усилению развития желтой ржавчины, характеризуемого числом пустул в полосе. Кроме того, они повышали эффективность микробиологического препарата в отношении элементов продуктивности пшеницы, но снижали его эффективность в отношении желтой ржавчины. В F₃ отмечено, что увеличение площади пятна мучнистой росы было связано с ростом суммы температур (P=0,92), УФ-индекса (P=0,92) и снижением относительной влажности воздуха в июле (P=-0,87). В F₄ выявлена зависимость биологической (P=0,79) и потенциальной урожайности (P=0,83) пшеницы от числа узловых корней пшеницы, в F₅ – сопряженность интенсивности развития (P=-0,79), числа пятен с налетом (P=-0,80) мучнистой росы с числом полос с пустулами желтой ржавчины (P=-0,70), то есть биологическая эффективность препарата Витаплан, СП (P=0,79) снижалась с ростом значений указанных фитопатологических показателей.

При использовании КЖ бактерий (табл. 2) в F₁ с ростом суммы осадков в июне (P=0,71), суммы осадков в августе (P=0,85), ГТК в июле (P=0,88), ГТК в августе (P=0,76), наблюдали увеличение продуктивной кустистости пшеницы (P=0,71), массы корней (P=0,74), длины колоса (P=0,85), числа колосков в колосе (P=0,75), числа зерен в колосе (P=0,72), массы зерен одного колоса (P=0,80), биологической урожайности (P=0,76), потенциальной урожайности (P=0,71). В F₂ показано снижение площади пустулы бурой ржавчины (P=-0,88) с ростом активности Солнца, в частности, характеризующей среднегодовым числом пятен (P=0,93) и УФ-индексом в августе (P=0,87). В F₄ со снижением УФ-индекса в мае (P=-0,70) и уменьшением поражаемости пшеницы желтой ржавчиной (P=-0,72), увеличивалась масса колоса (P=0,71). В F₅ наличие более длинных корней у пшеницы (P=0,82) способствовало усилению поражаемости растений мучнистой росой (P=0,80) и снижению площади пустулы желтой ржавчины (P=-0,72).

Активность микробиологических препаратов в значительной степени зависит от погодных условий. Некоторые из них теряют активность при повышенных температурах [3]. Результаты наших исследований свидетельствуют о большей зависимости эффективности влияния КЖ бактерий на морфобиологические показатели продуктивности и интенсивности развития болезней от метеорологических условий периодов вегетации, по сравнению с действием препарата Витаплан, СП, что связано с возможностью снижения биологической

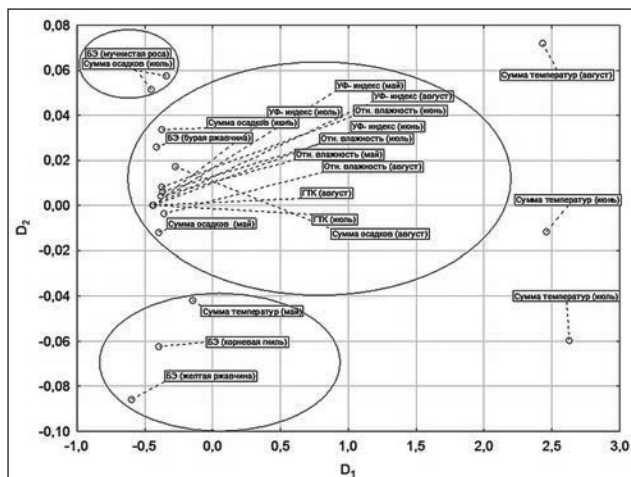


Рис. 3. Многомерное шкалирование данных о биологической эффективности препарата Витаплан, СП и культуральной жидкости штаммов *B. subtilis* BKM B-2604D и *B. subtilis* BKM B-2605D в отношении болезней пшеницы и метеопозителителей периодов фитосанитарного мониторинга (2017–2022 гг.).

активности БАВ при неблагоприятных климатических условиях. При этом значительное влияние на их эффективность оказывала влагообеспеченность вегетационного периода, которую характеризовали сумма осадков в июне и июле–августе, относительная влажность воздуха в июне, ГТК в июле и августе.

По результатам многомерного шкалирования, отражающего взаимосвязи между БЭ препарата Витаплан, СП и КЖ бактерий в отношении болезней пшеницы и метеофакторами периода вегетации, были выявлены сильные взаимосвязи (рис. 3) между изменениями в БЭ бактериальных штаммов в отношении мучнистой росы $[-0,453; 0,051]$ и суммой осадков в июле $[-0,343; 0,057]$; БЭ в отношении желтой ржавчины $[-0,600; -0,086]$, БЭ в отношении корневой гнили $[-0,395; -0,062]$ и суммой температур в мае $[-0,148; -0,042]$; БЭ в отношении бурой ржавчины $[-0,413; 0,026]$ и суммой осадков в мае $[-0,4; -0,012]$, июне $[-0,373; 0,033]$, августе $[-0,275; 0,017]$, относительной влажностью воздуха в мае $[-0,38; 0,004]$, июне $[-0,378; 0,008]$, июле $[-0,369; 0,006]$, августе $[-0,358; -0,004]$; ГТК июля $[-0,440; 0,00005]$, ГТК августа $[-0,440; 0,0001]$, УФ-индекса в мае $[-0,439; 0,00006]$, июне $[-0,438; 0,0001]$, июле $[-0,369; 0,006]$, августе $[-0,439; 0,00006]$. Отмечены взаимосвязи между БЭ в отношении корневой гнили $[-0,395; -0,062]$ и желтой ржавчины $[0,600; -0,086]$.

Методом анализа корреляционных зависимостей между фитометрическими, фитопатологическими показателями посевов пшеницы и метеоусловиями проведения полевого опыта установлено, что наибольшее влияние на биологическую и потенциальную урожайность пшеницы оказала сумма осадков в июне ($\theta_{k+}=83\%$), сумма осадков в июле ($\theta_{k+}=83\%$ и $\theta_{k+}=67\%$), сумма температур в августе ($\theta_{k+}=67\%$ и $\theta_{k+}=100\%$), сумма осадков в августе, ГТК в августе ($\theta_{k+}=83\%$), число пятен на Солнце в августе ($\theta_{k+}=83\%$), относительная влажность воздуха в мае ($\theta_{k+}=83\%$ и $\theta_{k+}=100\%$) и августе ($\theta_{k+}=83\%$). С ростом значений перечисленных метеопозителителей эффективность обработки растений изучаемыми препаратами в отношении урожайности пшеницы повышалась (табл. 3).

Величина биологической эффективности микробиологического препарата Витаплан, СП и КЖ штаммов *B.*

subtilis BKM B-2604D и *B. subtilis* BKM B-2605D в отношении корневой гнили пшеницы снижалась с ростом суммы выпавших осадков в мае ($\theta_{k-}=83\%$) и повышалась с увеличением суммы осадков в июне и июле ($\theta_{k+}=83\%$). Выявлена тенденция преобладания прямых (обратных) корреляционных связей ($\theta_{k+}=\theta_{k-}=63\%$) между биологической эффективностью КЖ бактерий в отношении корневой гнили и суммой температуры выше 10°C в мае (суммой температур в июне).

По литературным данным известно, что существенное влияние на проявление антагонистических свойств бактерий оказывает температура. Однако сведения о ее воздействии на интенсивность продуцирования антагонистами соединений, обуславливающих целевую активность штаммов, неоднозначны. У отдельных представителей рода *Bacillus* нижний порог образования антибиотических веществ на глюкозо-дрожжевом экстракте составляет 12°C , а при росте на почвенном экстракте – $14\ldots 16^\circ\text{C}$. Для некоторых бацилл характерен незначительный интервал оптимальных температур ($4\ldots 14^\circ\text{C}$), в котором отмечена пролонгированная и максимальная антифунгальная активность [28].

Табл. 3. Многолетняя динамика изменения урожайности пшеницы к контролю при применении культуральной жидкости (КЖ) штаммов *B. subtilis* BKM B-2604D и *B. subtilis* BKM B-2605D, микробиологического препарата Витаплан, СП в зависимости от некоторых метеопозителителей проведения полевых опытов

Показатель	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Биологическая урожайность (КЖ), г/растение	151,6	-25,9	-6,5	60,4	13,1	38,2
Биологическая урожайность (СП), г/растение	32,3	-27,0	81,2	-34,2	41,2	65,5
Относительная влажность воздуха (май)	71,6	58,9	62,0	57,6	70,0	59,0
Сумма осадков (июнь), мм	119,3	16,6	33,9	66,8	10,7	34,1
Сумма осадков (июль), мм	177,9	66,7	58,0	90,6	5,7	65,7
Сумма температур (август), $^\circ\text{C}$	565,3	507,7	478,0	485,4	506,5	544,9
Сумма осадков (август), мм	237,4	52,9	24,9	97,2	122,5	138,5
Относительная влажность воздуха (август), %	78,9	72,5	75,0	79,8	84,0	80,0
ГТК (август), ед.	2,7	1,0	0,9	2,0	2,6	2,5
Число пятен на Солнце (август), шт.	32,6	8,7	0,5	7,5	22,0	75,4

Биологическая эффективность изученных бактериальных штаммов в отношении мучнистой росы уменьшалась с понижением суммы температур в июне ($\theta_{k+}=67\%$), повышением суммы осадков в июле ($\theta_{k-}=67\%$), суммы температур ($\theta_{k-}=83\%$) и суммы осадков в августе ($\theta_{k-}=67\%$).

Выявлена тенденция увеличения биологической эффективности бактериальных штаммов к бурой ржавчине с ростом суммы температур в мае ($\theta_{k+}=67\%$), с ростом суммы температур в июне и в июле ($\theta_{k-}=83\%$) и уменьшением суммы выпавших осадков в июне и июле ($\theta_{k+}=67\%$) она снижалась. По данным В. В. Чекмарева [29], факторы погоды оказывают существенное влияние на уровень поражения пшеницы бурой ржавчиной, особенно в мае и июне.

Биологическая эффективность изучаемых препаратов в отношении желтой ржавчины пшеницы снижалась с уменьшением суммы температур в июне ($\theta_{k+}=83\%$), повышением суммы температуры в июле, суммы осадков в июне, июле ($\theta_{k-}=67\%$), ГТК в июле и августе ($\theta_{k-}=83\%$). Развитию желтой ржавчины способствовал рост суммы температур ($\theta_{k+}=100\%$) и снижение суммы осадков в мае ($\theta_{k-}=83\%$), повышение средней темпера-

туры в марте ($\theta_{\text{к+}}=83\%$), снижение средней температуры ($\theta_{\text{к-}}=83\%$) и суммы осадков в апреле ($\theta_{\text{к-}}=67\%$), средней температуры ($\theta_{\text{к-}}=100\%$) и суммы осадков в феврале ($\theta_{\text{к-}}=83\%$).

Вероятность поражения пшеницы возбудителями болезней определяется, в первую очередь, запасом инфекционного начала на зараженных растениях или растительных остатках, в том числе перезимовавших, сохранившихся под действием различных природно-климатических факторов [30]. В наших исследованиях показано, что метеоусловия периодов, предшествующих проведению фитосанитарного мониторинга пшеницы, действительно оказывали существенное влияние на эффективность бактериальных препаратов в отношении болезней пшеницы. По максимальному числу выявленных коэффициентов корреляции ($\theta_{\text{к+}}=\theta_{\text{к-}}=100\%$) отмечено преобладание тенденции усиления пораженности растений корневой гнилью с ростом суммы осадков в марте.

Определено увеличение пораженности растений мучнистой росой в вариантах опыта с ростом средней температуры сентября, относительной влажности воздуха в январе–апреле ($\theta_{\text{к+}}=100\%$) и снижение – с увеличением суммы осадков в октябре, средней температуры и суммы осадков в декабре, средней температуры в январе, суммы осадков в марте и апреле, УФ-индекса в феврале, апреле, сентябре, октябре, ноябре ($\theta_{\text{к-}}=100\%$). Развитие бурой ржавчины усиливалось с ростом суммы осадков в октябре, средней температуры и суммы осадков в декабре, средней температуры в январе, суммы осадков в марте, апреле, УФ-индекса в феврале, сентябре и октябре ($\theta_{\text{к+}}=100\%$) и снижалось с повышением средней температуры в сентябре ($\theta_{\text{к-}}=100\%$).

Усилению развития желтой ржавчины способствовало повышение относительной влажности воздуха в ноябре, январе–апреле ($\theta_{\text{к+}}=100\%$), а снижение – с ростом суммы средней температуры в феврале, УФ-индекса в апреле ($\theta_{\text{к-}}=100\%$).

Выводы. Увеличение общей кустистости растений снижало их пораженность бурой и желтой ржавчиной, а также корневой гнилью, но сопровождалось усилением пораженности растений мучнистой росой. При снижении поражения пшеницы корневой гнилью наблюдалось усиление развития мучнистой росы пшеницы ($r=-0,63$, $P=0,03$) и снижение развития бурой ржавчины ($r=0,64$, $P=0,03$).

Эффективность бактериальных штаммов в отношении показателей продуктивности в большей степени зависела от влагообеспеченности вегетационного периода, которую характеризовали сумма осадков в июне–августе, относительная влажность воздуха в июне, ГТК в июле и августе.

Пораженность корневой гнилью усиливалась с ростом суммы осадков в июне и июле, мучнистой росой – с ростом суммы осадков в мае, желтой ржавчиной – с ростом суммы температур в июне. Эффективность бактериальных штаммов в отношении комплекса возбудителей болезней пшеницы возрастала с увеличением суммы осадков в мае (корневая гниль), суммы осадков в августе (мучнистая роса), суммы температур в мае, суммы осадков в августе, ГТК в июле и августе (желтая ржавчина).

Обратные корреляционные связи выявлены между биологической эффективностью исследованных биопрепаратов в отношении развития бурой ржавчины и суммой температур в июне. Отмечены сильные взаимосвязи между биологической эффективностью биопрепаратов в отношении мучнистой росы и суммой осадков в июне; корневой гнили, желтой ржавчины

и суммой температур в мае, бурой ржавчины и суммой осадков (май, июнь, август), относительной влажностью воздуха (май–август), ГТК июля, августа, УФ-индекса (май–август). Выявлена доминирующая тенденция между изменением биологической эффективности бактериальных штаммов по отношению к мучнистой росе в зависимости от суммы осадков в июле, к корневой гнили и желтой ржавчине – от суммы температур в мае.

Литература

1. Павлюшин В. А., Лысов А. К. Фитосанитарная безопасность агроэкосистем и дистанционный фитосанитарный мониторинг в защите растений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 3. С. 69–78.
2. Актуальные проблемы повышения эффективности науки в обеспечении выполнения ключевых задач продовольственной безопасности в зерновом секторе страны / М. В. Архипов, Т. А. Данилова, Л. П. Гусакова и др. // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2018. № 71. С. 5–9.
3. Левитин М. М. Распространение болезней растений в условиях глобального изменения климата // *Сельскохозяйственные науки и Агропромышленный комплекс на рубеже веков*. 2016. № 13. С. 97–101.
4. Михилев А. В. Потепление климата – конкурентное преимущество сельского хозяйства Российской Федерации // *Вестник курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018. № 7. С. 70–73.
5. Влияние климатических условий владимирского оползня на формирование урожайности новых перспективных сортов яровой мягкой пшеницы / Г. В. Игнатова, О. А. Фенова, С. А. Булатова и др. // *Селекция и семеноводство*. 2022. № 4 (102). С. 52–58.
6. Ванькова А. А., Емцев В. Т., Ницэ Л. К. Становление и развитие сельскохозяйственной микробиологии // *Агрохимический вестник*. 2009. № 1. С. 20–23.
7. Микробиологическая защита растений в технологиях фитосанитарной оптимизации агроэкосистем: теория и практика (обзор) / В. А. Павлюшин, И. И. Новикова, И. В. Бойкова // *Сельскохозяйственная биология*. 2020. Т. 55. № 3. С. 421–438.
8. Биологическое обоснование использования индукторов устойчивости на основе хитозана для повышения эффективности биофунгицидов / И. И. Новикова, Э. В. Попова, И. Л. Краснобаева и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2021. Т. 56. № 3. С. 511–522.
9. *Bacillus subtilis* IAB/BS03 as a potential biological control agent / E. Hinarejos, M. Castellano, I. Rodrigo, et al. // *Eur. J. Plant Pathol.* 2016. Vol. 146. P. 597–608. doi: 10.1007/s10658-016-0945-3.
10. *Biological Tool for Crop Improvement through Bio-Molecular Changes in Adverse Environments / R. Radhakrishnan, A. Hashem, Abd E. F. Allah Bacillus: A* // *Front Physiol.* 2017. Vol. 8. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2017.00667/full> (дата обращения: 21.07.2023). doi: 10.3389/fphys.2017.00667.
11. *Comparative proteomic analysis in pea treated with microbial consortia of beneficial microbes reveals changes in the protein network to enhance resistance against Sclerotinia sclerotiorum* / A. Jain, A. Singh, S. Singh, et al. // *J. Plant Physiol.* 2015. Vol. 182. P. 79–94. doi: 10.1016/j.jplph.2015.05.004.
12. 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.

13. Mechanism of plant growth promotion elicited by *Bacillus* sp. LKE15 in oriental melon / S. M. Kang, R. Radhakrishnan, K. E. Lee, et al. // *Acta Agric. Scand. Sect. B Soil Plant Sci.* 2015. Vol. 65. P. 637–647. doi: 10.1080/09064710.2015.1040830.
14. Plant growth-promoting rhizobacteria inoculation to enhance vegetative growth, nitrogen fixation and nitrogen remobilisation of maize under greenhouse conditions / K. B. Kuan, R. Othman, K. A. Rahim, et al. // *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11. Article e0152478. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0152478> (дата обращения: 21.07.2023). doi.org/10.1371/journal.pone.0152478.
15. Ласточкина О. В. Адаптация и устойчивость растений пшеницы к засухе, опосредованная природными регуляторами роста *Bacillus* spp.: механизмы реализации и практическая значимость (обзор) // *Сельскохозяйственная биология*. 2021. Т. 56. № 5. С. 843–867.
16. Эффективность инокуляции семян яровой пшеницы эндофитными бактериями *Bacillus subtilis* 26Д / Л. И. Пусенкова, С. Р. Гарипова, О. В. Ласточкина и др. // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2020. № 3. С. 56–64.
17. Эффективность обработки семян и растений яровой пшеницы и гороха посевного микробиологическими препаратами в модельных и полевых опытах / Л. И. Пусенкова, С. Р. Гарипова, Е. В. Кузина и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 12. С. 33–37.
18. Завалин А. А. Биопрепараты, удобрения и урожай. М.: ВНИИА Им. Д. Н. Прянишникова, 2005. 302 с.
19. Кожмяков А. П., Белоброва С. Н., Орлова А. Г. Создание и анализ базы данных по эффективности микробных препаратов комплексного действия // *Сельскохозяйственная биология*. 2011. № 3. С. 112–115.
20. Прогнозирование продолжительности вегетационного периода у сортов яровых зерновых культур в условиях изменения климата. / Л. Ю. Новикова, В. Н. Дюбин, И. В. Сеферова и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2012. № 5. С. 78–87.
21. Зуев Е. В., Брыкова А. Н., Кудрявцева Е. Ю. Яровая мягкая пшеница. Результаты многолетнего полевого изучения образцов яровой мягкой пшеницы в условиях Ленинградской области. Каталог ВИР. Город Санкт-Петербург. Издательство: ВИР, 2020. Вып. 917. 71 с. doi 10.30901.978–5–907145–25–2.
22. The Use of Chitosan Salicylate to Increase the Biological Efficiency of Vitaplan against *Cochliobolus sativus*. / I. I. Novikova, E. V. Popova, I. L. Krasnobaeva, et al. // *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2022. Vol. 58. No. 3. P. 336–342. doi:10.1134/S0003683822030073.
23. Совместное использование штаммов микроорганизмов и хитозановых комплексов для повышения урожайности пшеницы (*Triticum aestivum* L.) / Л. Е. Колесников, Э. В. Попова, И. И. Новикова и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2019. Т. 54. № 5. С. 1024–1040.
24. Identification of the effectiveness of associative rhizobacteria in spring wheat cultivation / L. E. Kolesnikov, A. A. Belimov, E. Y. Kudryavtseva, et al. // *Agronomy Research*. 2021. Vol. 19. No. 3. P. 1530–1544. doi: 10.15159/ar.21.145.
25. Abbott W. Method of computing the effectiveness of an insecticide // *Econ. Entomol.* 1968. Vol. 8. P. 265–267.
26. Возможные механизмы устойчивости ячменя к мучнистой росе / Б. А. Баташева, Р. А. Абдуллаев, О. Н. Ковалева и др. // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2020. № 4. С. 54–57.
27. Устойчивость яровой пшеницы к корневой гнили / М. Койшыбаев, К. Куланбай // *Защита и карантин растений*. 2010. № 7. С. 14–17.
28. Кипрушкина Е. И. Воздействие низкой температуры на динамику численности и проявление биоконтролирующего эффекта бактериями родов *Pseudomonas* и *Bacillus* // *Вестник международной академии холода*. 2007. № 3. С. 34–38.
29. Чекмарев В. В. Новый подход к составлению формул прогноза болезней сельскохозяйственных культур (на примере ржавчинных заболеваний зерновых культур). Тамбов: Принт-сервис, 2016. 186 с.
30. Влияние погодных условий в межфазные периоды вегетации на развитие листовых болезней яровой пшеницы / А. Ю. Кекало, Е. В. Нестерова, М. В. Немченко // *Аграрный вестник Урала*. 2017. № 09 (163). С. 8–15.

Поступила в редакцию 29.03.2023
После доработки 31.05.2023
Принята к публикации 22.07.2023

ВКЛАД ФАКТОРОВ В ФОРМИРОВАНИЕ ЗАСОРЕННОСТИ ПОЛЕЙ ЗЕРНОТРАВЯНОПРОПАШНОГО СЕВООБОРОТА НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**А.М. Шпанев^{1,2}**, доктор биологических наук, **В.В. Смук^{1,2}**, кандидат сельскохозяйственных наук¹Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений,
196608, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3²Агрофизический научно-исследовательский институт,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14
E-mail: ashpanev@mail.ru.

Исследования проводили с целью изучения влияния природных и антропогенных факторов на формирование засоренности полей зернотравянопропашного севооборота для оценки перспектив эффективного управления видовым составом и численностью сорной растительности на Северо-Западе РФ. Работу выполняли в 2012–2018 гг. в Ленинградской области в период пятой ротации зернотравянопропашного севооборота со следующим чередованием культур: люпин узколистный, рожь озимая, ячмень яровой с подсевом многолетних трав (клевер красный и тимфеевка луговая), многолетние травы 1 и 2 годов пользования, картофель, рапс яровой. Засоренность полей севооборота в большей степени зависела от биологических особенностей возделываемых культур (видовое обилие – 76,1 %, начальная густота – 29,6 %, фитомасса при уборке урожая – 21,0 %), чем от индивидуальных параметров засоренности полей (3,5, 8,3, 17,7 % соответственно). Погодные условия оказывали определяющее воздействие на формирование начальной засоренности (49,7 %), в меньшей степени на такие показатели, как видовое обилие (30,7 %) и величина надземной массы сорных растений (20,6 %). Влияние погодных условий распространялось на эффекты, связанные с применением минеральных удобрений (взаимодействие – 4,0...11,9 %) и системы защиты растений (взаимодействие – 2,9...12,0 %). Среди изучаемых факторов интенсификации растениеводства применение гербицидов в варианте с системой защиты растений оказывало более сильное влияние на видовое обилие (26 %) и конечную фитомассу сорных растений (26,2 %), а длительное использование минеральных удобрений – на начальную засоренность агроценозов (10,2 %), которое было статистически достоверным в каждый из годов исследований (23,0...67,8 %). Совместное влияние минеральных удобрений и гербицидов сильнее всего отражалось на формировании надземной массы сорных растений (взаимодействие – 0,9...5,0 %), особенно в годы с избыточным увлажнением.

THE CONTRIBUTION OF FACTORS TO THE FORMATION OF POLLUTION OF GRAIN-GRASS-ROWED CROPS IN THE NORTH-WEST OF THE RUSSIAN FEDERATION**A.M. Shpanev^{1,2}**, V.V. Smuk^{1,2}¹All-Russian Institute of Plant Protection,
196608, Sankt-Peterburg, Pushkin, sh. Podbelskogo, 3²Agrophysical Research Institute,
196600, Sankt-Peterburg, Grazhdanskiy prosp., 14
E-mail: ashpanev@mail.ru.

The study was carried out to evaluate the influence of natural and anthropogenic factors on the formation of weed infestation of fields in the crop rotation including cereals, row crops and grasses to understand the possibilities to manage the species composition and population of weed plants in the North-West of the Russian Federation. The experiments were performed in 2012–2018 in the Leningrad region during the fifth rotation with the following crops: narrow-leaved lupin, winter rye, spring barley with sowing of perennial grasses (red clover and timothy-grass), perennial grasses of 1 and 2 years, potato, spring rape. Weed infestation of fields in the crop rotation was depended more on biological features of cultivated cultures (species abundance 76,1 %, initial density 29,6 %, phytomass after harvest 21,0 %) than on individual parameters of weed infestation (3,5, 8,3, 17,7 %). The weather conditions were of decisive importance in weed initial formation (49,7 %), and, to a lesser degree, for such parameters as species abundance (30,7 %) and aboveground biomass of weeds (20,6 %). Weather conditions influenced the effects associated with the use of mineral fertilizers (interaction 4,0...11,9 %) and integrated plant protection system (interaction 2,9...12,0 %). Among the studied factors of crop production intensification application of herbicides in the variant with integrated plant protection system most affected the species abundance (26 %) and final phytomass of weed plants (26,2 %), whereas long term application of mineral fertilizers affected the initial weed infestation of agroecosystems (10,2 %), that was statistically sufficient in every year of the research (23,0...67,8 %). The combined effect of mineral fertilizers and herbicides most influenced the formation of the aboveground mass of weeds (interaction 0,9...5,0 %), especially in years with excessive humidity.

Ключевые слова: зернотравянопропашной севооборот, Северо-Западный регион, сорные растения, погодные условия, минеральные удобрения, гербициды.

Key words: grain-grass-rowed crop rotation, North-Western region, weeds, weather conditions, mineral fertilizers, herbicides.

Интересы отечественных исследователей в отношении засоренности севооборотов в большинстве случаев ограничивались изучением видового состава, структуры и динамики численности сорных растений, необходимых для прогнозирования ситуации с вредоносными видами

[1, 2, 3] и планирования защитных мероприятий [4, 5]. Значительно меньше внимания уделяли анализу факторов, имеющих определяющее влияние на формирование засоренности севооборотной площади [6, 7]. Согласно литературным данным к таковым относятся способ об-

работки почвы, содержание элементов питания в почве, рельеф поля, погодные условия, а также биологические особенности культуры и технологии их возделывания [8, 9, 10]. При этом метеоусловия, и в первую очередь количество выпадающих осадков, оказывают одно из самых сильных воздействий на засоренность агроценозов, но в неуправляемом режиме [11, 12].

К числу наиболее действенных антропогенных факторов, использование которых дает возможность управлять засоренностью агроценозов, относят внесение удобрений и проведение гербицидной обработки. Ранее мы установили, что в зависимости от дозы минеральных удобрений засоренность посевов рапса ярового по численности увеличивалась в 1,4...1,7 раза, по проективному покрытию сорных растений в начальный период развития агрофитоценоза – в 1,8...2,8 раза [13]. При этом внесение минеральных удобрений способствует повышению эффективности гербицидных обработок [14, 15]. По нашим данным, применение гербицидов в посевах пшеницы озимой в вариантах с низким уровнем азотного питания приводило к снижению численности сорняков на 36,7 %, средним – на 53,2 %, высоким – на 57,6 %, и ячменя ярового – на 48,8, 51,1, 55,4 % соответственно, фитомассы – на 47,7, 66,4, 78,1 % и 57,8, 72,4, 77,8 % [16].

Цель исследований – изучение влияния природных и антропогенных факторов на формирование засоренности полей зерноотравапропашного севооборота для оценки перспектив эффективного управления видовым составом и численностью сорной растительности на Северо-Западе Российской Федерации.

Методика. Работу выполняли на полях зерноотравапропашного севооборота Менковского филиала Агрофизического НИИ (Ленинградская обл., Гатчинский район) в период пятой ротации, пришедшейся на 2012–2018 гг. Почва дерново-слабоподзолистая супесчаная, мощность пахотного слоя – 23 см. Схема севооборота включала следующие культуры: люпин узколистный (сидеральный пар), рожь озимая, ячмень яровой с подсевом многолетних трав (клевер красный и тимopheвка луговая), многолетние травы 1 и 2 годов пользования, картофель, рапс яровой. Общая площадь севооборота 4,2 га, одного поля – 0,6 га.

Схема опыта предусматривала изучение трех уровней удобренности, формируемых предпосевным внесением азотоски и аммиачной селитры из расчета на планируемую урожайность культур. В варианте с высокой удобренностью доза азота составляла 100 кг д.в./га, фосфора и калия – по 75 кг д.в./га, со средней – соответственно 65 и 50 кг д.в./га, с низкой – удобрения не вносили. Влияние длительного применения удобрений отразилось на агрохимических показателях почв полей севооборота, содержание азота для различных уровней удобренности составляло соответственно 93, 107, 110 мг/кг, фосфора – 208, 266, 268 мг/кг, калия – 88, 90, 98 мг/кг, органического вещества – 3,05, 3,42, 3,75 %.

Вторым изучаемым фактором в опыте выступала система защиты растений (СЗР), согласно которой мероприятия против вредных организмов проводили при превышения пороговых значений их присутствия в посевах. Система защиты включала проведение гербицидных обработок при возделывании ржи озимой (Прима, СЭ (0,6 л/га), ячменя ярового (Агритокс, ВК (1 л/га), Базагран, ВР (2 л/га), рапса ярового (Дуал Голд, КЭ (1,3 л/га) и картофеля (Титус, СТС (50 г/га) + Тренд 90 (80 мл/га). На полях сидерального люпина и многолетних трав гербициды не применяли в виду отсутствия целесообразности.

Минеральные удобрения и средства защиты растений

вносили механизировано соответственно поперек и вдоль полей севооборота. Площадь делянок под каждым из вариантов составляла 0,18 и 0,27 га, повторность – трехкратная.

Для изучения сорной растительности использовали постоянные учетные площадки, размеры которых на культурах сплошного посева составляли 0,1 м², на пропашных (картофель) – 1,4 м² [17]. В зависимости от биологических особенностей культуры ежегодно закладывали от 36 (многолетние травы, люпин узколистный, картофель) до 72 (рожь озимая, яровые ячмень и рапс) площадок. За период исследований их количество составляло 2424 шт. Засоренность оценивали по трем показателям, определяемым на каждой постоянной площадке: видовое обилие, численность сорняков в отдельности по видам на начальных фазах развития культурных растений (кущение – ячмень яровой, начало выхода в трубку – рожь озимая, 2 настоящих листа – рапс яровой, 2 тройчатых листа – люпин узколистный, весеннее отрастание – многолетние травы, через 10 дней после посадки – картофель) и сырая фитомасса при уборке урожая.

Метеоусловия в годы проведения исследований складывались таким образом, что избыточное увлажнение отмечали в 2012 (+66 %), 2013 (+53 %) и 2016 (+31 %) гг., дефицит влаги – в 2015 г. (–64 %). В другие годы количество осадков было близким к среднемуголетнему. Повышенные среднесуточные температуры наблюдали в 2013 (+2,2 °C), 2014 (+1,1 °C), 2016 (+0,9 °C) и 2018 (+2,0 °C) гг., пониженные – в 2017 г. (–0,7 °C).

Статистическую обработку данных проводили методами дисперсионного и корреляционного анализа в программе «Statistica 6».

Результаты и обсуждение. Состав сорной растительности на полях зерноотравапропашного севооборота насчитывал 55 видов из 20 разных семейств. Наиболее разнообразным он был в посадках картофеля (55 видов), наименее – в посевах люпина узколистного (34 вида) и многолетних трав 1 г.п. (35 видов). Примерно равное количество видов сорных растений отмечали в посевах рапса ярового (48 видов), ячменя ярового (45 видов), ржи озимой (44 вида) и на полях многолетних трав 2 г.п. (44 вида).

По видовому обилию, характеризующему количество сорных видов, произрастающих на единице площади посева или посадки, картофель значительно превосходил все остальные культуры в севообороте (17 видов/м²). Меньше всего сорных видов отмечали на полях многолетних трав (3 вида/м²). Близким по значению оказалось видовое обилие сорных растений в посевах ячменя ярового, ржи озимой и рапса ярового (8...9 видов/м²). В словесном выражении наиболее засоренными были посева ячменя ярового (457 экз./м²) и люпина узколистного (324 экз./м²), наименее – поля многолетних трав (95...108 экз./м²), где также отмечали формирование наименьшей надземной массы сорных растений (50,8...54,8 г/м²). Промежуточное положение занимали рожь озимая (208 экз./м²), рапс яровой (192 экз./м²) и картофель (159 экз./м²). Среднее по севообороту количество произрастающих сорных растений в начальный период развития культурных растений составляло 220 экз./м², сырой фитомассы сорняков в уборочный период – 185,2 г/м².

Выявлены достоверные различия в засоренности некоторых из полей севооборота как по численности, так и по надземной массе сорных растений. Видовое обилие изменялось от 6 до 10 видов/м², численный состав – от 150 до 312 экз./м², сырая фитомасса – от 51,2

Табл. 1. Влияние поля и биологических особенностей культурных растений на формирование засоренности зернотравянопропашного севооборота (2012–2018 гг.)

Фактор	Доля влияния, %		
	видовое обилие сорных растений, видов/м ²	начальная засоренность, экз./м ²	фитомасса сорных растений при уборке культуры, г/м ²
Поле	3,5*	8,3*	17,7*
Культура	76,1*	29,6*	21,0*
Взаимодействие поле-культура	11,6*	37,0*	30,8*
Повторение	0,3	0,9	0,7
Случайное	8,5*	24,1*	29,7*

*значения достоверны при $P \geq 0,95$.

до 272,5 г/м². Наименее засоренным было поле № 5, на котором начальная густота сорных растений составляла 150 экз./м², фитомасса в период уборки урожая – 51,2 г/м². Максимальная засоренность отмечена на полях № 4 и 7 – 312 и 287 экз./м², 235,4 и 272,5 г/м² соответственно.

Результаты дисперсионного анализа данных свидетельствуют, что влияние биологических особенностей культурных растений на формирование засоренности зернотравянопропашного севооборота оказалось значительно более сильным, чем индивидуальных особенностей засоренности полей (табл. 1). В первую очередь это касается таких показателей, как видовое обилие и начальная засоренность, которые различались в 21,7 и 3,6 раза. Кроме того, статистически значимым было взаимодействие этих факторов на качественные и количественные параметры засоренности севооборота. Результаты наших исследований подтверждают выводы, сделанные другими авторами, согласно которым биомасса сорняков существенно различалась как по культурам (детерминация – 48 %), так и по полям (детерминация – 40 %) кормового севооборота [18].

Варьирование засоренности севооборота по годам находилось в пределах 7...10 видов/м², 153...326 экз./м² и 122,9...361,4 г/м². Сильную его степень во многом определяли погодные условия вегетационного периода. На долю влияния этого фактора приходилось от 20,6 до 49,7 %, в среднем – 33,7 % (табл. 2). Начальная густота

Табл. 2. Влияние погодных условий и факторов интенсификации растениеводства на формирование засоренности зернотравянопропашного севооборота (2012–2018 гг.)

Фактор	Доля влияния, %		
	видовое обилие сорных растений, видов/м ²	начальная засоренность, экз./м ²	фитомасса сорных растений при уборке урожая, г/м ²
Погодные условия (год)	30,7*	49,7*	20,6*
Минеральные удобрения (МУ)	3,7*	10,2*	2,0*
Система защиты растений (СЗР)	26,0*	3,5*	26,2*
Взаимодействие год-МУ	6,5*	11,9*	4,0*
Взаимодействие год-СЗР	2,9*	4,5*	12,0*
Взаимодействие МУ-СЗР	0,1	0,0	1,2*
Взаимодействие год-МУ-СЗР	1,2	2,7*	3,7*
Повторение	15,8	1,2	1,9
Случайное	13,2	16,2	28,4

*значения достоверны $P \geq 0,95$.

сорных растений в агроценозах в значительной степени зависела от условий увлажнения, складывающихся в начальный период развития культурных растений. Так, выпадение осадков в период посев–кушение и посев – 2 тройчатых листа приводило к достоверному увеличению численности малолетних видов сорных растений в посевах ячменя ярового ($r = 0,86$, $p \leq 0,05$) и люпина узколистного ($r = 0,87$, $p \leq 0,05$) соответственно. При выпадении 136,4 мм осадков в 2014 г. фактическая засоренность посевов ячменя ярового малолетними видами в фазе кушения культуры составляла 769 экз./м², а 14,2 мм в 2018 г. – 387 экз./м². Схожее влияние осадков на группу малолетних сорняков наблюдали в период весеннего развития ржи озимой ($r = 0,47$), а также многолетних трав первого ($r = 0,98$, $p \leq 0,05$) и второго ($r = 0,60$) годов пользования. Наименьшая засоренность посевов ржи озимой малолетниками в фазе выхода в трубку, равная 37 экз./м², отмечена в 2014 г. в условиях полного отсутствия осадков и низких среднесуточных температур. На этой ситуации также сказались неблагоприятные погодные условия осеннего периода развития ржи озимой, которые не способствовали массовому прорастанию зимующих сорняков. За короткий отрезок осенней вегетации ржи озимой в 2013 г. выпало 241 мм осадков при среднесуточной температуре воздуха 11,8 °С.

Условия увлажнения оказывали сильное влияние на итоговые показатели засоренности агроценозов, которое проявлялось в формировании значительной надземной массы сорных растений под влиянием избыточного количества осадков. При выпадении за период вегетации ячменя ярового в 2012 г. 340,3 мм осадков, в 2013 г. – 331,2 мм осадков усредненная масса 1 сорного растения была равна соответственно 1,53 и 1,44 г, а в менее увлажненные она варьировала от 0,31 до 0,73 г. Подтверждением таких закономерностей служат положительные коэффициенты корреляции между суммарным количеством осадков, выпавших за период вегетации культурных растений, и фитомассой сорняков в посевах ячменя ярового ($r = 0,67$), ржи озимой ($r = 0,57$), полей многолетних трав ($r = 0,95$, $p \leq 0,05$) и посадках картофеля ($r = 0,45$). Ранее было выявлено положительное и статистически достоверное влияние условий теплообеспеченности на накопление вегетативной массы сорных растений в посевах рапса ярового [19].

Воздействие погодных условий распространялось на эффекты, связанные с применением минеральных удобрений и системы защиты растений, чему было получено и статистическое подтверждение (см. табл. 2). Суммарный вклад факторов интенсификации растениеводства в формирование засоренности зернотравянопропашного севооборота был вполне сопоставим с влиянием погодных условий, кроме начальной густоты сорных растений. В сравнительном плане влияние минеральных удобрений сильнее сказывалось на начальной засоренности полей севооборота, а применение гербицидов, предусмотренное системой защиты, – на видовом обилии и фитомассе сорняков. При этом в отдельные годы внесение минеральных удобрений определяло величину начальной засоренности севооборота на 23,0...67,8 %, а проведение защитных мероприятий – на 0,01...27,1 %, сформированной надземной массы сорных растений – соответственно на 1,9...10,6 % и 40,7...69,4 % (табл. 3). Достоверное влияние регулярного применения гербицидов и других средств защиты растений в соответствующем варианте опыта на начальную засоренность полей просматривалось, начиная с шестого года возделывания культур в период пятой ротации севооборота, когда в схему опыта был включен соответствующий фактор

Табл. 3. Влияние факторов интенсификации растениеводства на формирование засоренности полей зерноотравапропашного севооборота в разные годы

Фактор	Доля влияния, %						
	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
Начальная засоренность (экз./м²)							
Минеральные удобрения (МУ)	27,6*	25,1*	61,3*	23,0*	67,8*	67,2*	29,4*
Система защиты растений (СЗР)	0,01	0,2	3,3	7,3	0,01	14,5*	27,1*
Взаимодействие МУ-СЗР	12,7*	12,6*	1,9	8,7	4,3	1,5	7,4*
Фитомасса сорных растений при уборке урожая (г/м²)							
Минеральные удобрения (МУ)	6,2	1,9	9,1*	10,6*	2,1	5,1*	4,4
Система защиты растений (СЗР)	47,8*	51,7*	69,4*	50,7*	58,6*	42,9*	40,7*
Взаимодействие МУ-СЗР	5,0	4,6*	4,4*	0,9	1,0	3,8*	1,5

*значения достоверны при $P \geq 0,95$.

для изучения. Ранее защитные мероприятия проводили в фоновом режиме и нерегулярно год от года. Совместное влияние минеральных удобрений и гербицидов на засоренность севооборота усиливалось в годы с избыточным увлажнением (2012 и 2013 гг.) и достигало 12,6...12,7 %. Это объясняется повышением эффективности минеральных удобрений в условиях хорошего увлажнения почвы, вследствие увеличения скорости и полноты их растворения, а также поглощения растениями [20].

Влияние минеральных удобрений выражалось с одной стороны в снижении видового обилия сорняков, с другой – в повышении их численности (в 1,2...1,3 раза) и фитомассы (в 1,2...1,4 раза). Выявленные тенденции касались таких видов сорных растений, как марь белая, фиалка полевая, пикульники, тогда как у торицы полевой, щавеля малого и осота полевой просматривалась противоположная реакция на внесение удобрений. В зависимости от дозы минеральных удобрений начальная засоренность посевов ячменя ярового увеличивалась в 1,2...1,3 раза, ржи озимой – в 1,8 раза, рапса ярового – в 1,1 раза, люпина узколистного – в 1,3...1,4 раза, картофеля – в 1,3...1,6 раза. В посеве рапса ярового фитомасса сорняков возрастала с 241,1 ($N_{0-0}P_{75}K_{75}$) до 375,4 г/м² ($N_{100-0}P_{75}K_{75}$), ячменя ярового – с 193,5 до 303,2 г/м², люпина узколистного – с 278,0 до 307,8 г/м². Между вариантами удобрения достоверных различий по засоренности не наблюдали (табл. 4).

Применение гербицидов в варианте с системой защиты растений приводило к достоверному снижению

Табл. 4. Влияние минеральных удобрений и системы защиты растений на засоренность зерноотравапропашного севооборота

Показатель засоренности	Минеральные удобрения				Система защиты растений		
	$N_{0-0}P_{75}K_{75}$	$N_{65-50}P_{50}K_{50}$	$N_{100-75}P_{75}K_{75}$	HCP ₀₅	без СЗР	СЗР	HCP ₀₅
Видовое обилие, видов/м ²	9,4	9,3	8,6	0,46	9,4	7,6	1,16
Начальная густота, экз./м ²	230	292	279	22,38	230	196	21,04
Фитомасса при уборке урожая, г/м ²	182,0	252,1	225,2	30,68	182,1	82,0	34,71

всех анализируемых показателей засоренности зерноотравапропашного севооборота. Сильнее всего снижалась надземная масса сорных растений (в 2,2 раза, или на 55 %), в том числе в посевах ржи озимой на 85,3 %, ячменя ярового – на 57,2 %, рапса ярового – на 46,2 %, посадках картофеля – на 85,5 %. Самыми чувствительными к действию гербицидов оказались редька дикая, пастушья сумка обыкновенная, марь белая, торица полевая, устойчивыми – фиалка полевая, вероника полевая.

Выводы. Засоренность зерноотравапропашного севооборота в большей степени зависит от биологических особенностей полевых культур и технологий их возделывания, чем от индивидуальных особенностей засоренности полей, которые тем не менее следует учитывать при планировании гербицидной обработки и выборе соответствующего препарата. Начальную засоренность агроценозов в основном определяют погодные условия, а возможности повлиять на нее внесением минеральных удобрений и гербицидов ограничены. Среди изучаемых факторов интенсификации растениеводства применение гербицидов в варианте с системой защиты растений оказывало значительно более сильное влияние на видовое обилие и конечную фитомассу сорных растений, тогда как длительное использование минеральных удобрений – на начальную засоренность агроценозов, которое было статистически достоверным в каждый из годов исследований. Совместное влияние минеральных удобрений и гербицидов отражалось на формировании надземной массы сорных растений и усиливалось в годы с избыточным увлажнением.

Литература

- Моисеев А. Н., Моисеева К. В. Засоренность зерноотравапропашного севооборота в северной лесостепи Тюменской области // *Аграрный вестник Урала*. 2017. № 12 (166). С. 7.
- Паитецкий В. С., Радченко Л. А., Женченко К. Г. Зерноотравапропашные севообороты для условий Крыма // *Таврический вестник аграрной науки*. 2017. № 4 (12). С. 90–97.
- Замятин С. А., Ефимова А. Ю. Мониторинг засоренности полевых севооборотов // *Вестник Марийского государственного университета. Серия: сельскохозяйственные науки, экономические науки*. 2017. Т. 3. № 1 (9). С. 33–37.
- Морозов В. И., Тойгильдин А. Л., Подсекалов М. И. Флористический состав и динамика численности сорных растений агрофитоценозов в севооборотах лесостепной зоны Поволжья // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018. № 4 (44). С. 102–109.
- Перфильев Н. В., Вьюшина О. А., Тимофеев В. Н. Соотношение видов сорных растений под влиянием севооборота и систем основной обработки почвы в условиях северного Зауралья // *Достижения науки и техники АПК*. 2018. Т. 32. № 5. С. 35–40.
- Воронцов В. А., Скорочкин Ю. П. Борьба с засоренностью в зернопаровом севообороте // *Защита и карантин растений*. 2019. № 7. С. 26–29.
- Формирование засоренности посевов в зернопаровом севообороте в зависимости от способа обработки почвы и применения средств химизации / Д. В. Пургин, В. И. Усенко, В. И. Кравченко и др. // *Земледелие*. 2019. № 8. С. 8–13.
- Котлярова Е. Г., Грицина В. Г., Кузнецова Л. Н. Засоренность посевов сои разной сортовой принадлежности в зависимости от удобрений // *Успехи современного естествознания*. 2016. № 3. С. 74–78.

9. Засоренность посевов озимой пшеницы в зависимости от приемов обработки почвы, внесения минеральных удобрений и гербицидов / В. И. Турусов, В. И. Гармашов, Н. А. Нужная и др. // *Защита и карантин растений*. 2018. № 10. С. 13–16.
10. Артемьев А. А., Гурьянов А. М., Хвостов Е. Н. Возделывание яровой пшеницы на фоне разных приемов обработки почвы и минерального питания // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2021. № 4 (382). С. 69–72.
11. Горбунова М. С., Солодун В. И. Влияние погодных условий и приемов обработки почвы на засоренность посевов в лесостепи Предбайкалья // *Актуальные вопросы аграрной науки*. 2017. № 23. С. 5–10.
12. Семинченко Е. В., Солонкин А. В. Влияние климатических факторов на урожай озимой пшеницы и ярового ячменя в условиях сухой степи Нижнего Поволжья // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2022. Т. 14. № 3. С. 58–74.
13. Шпанев А. М., Фесенко М. А. Влияние минерального питания на фитосанитарную обстановку в посевах ярового рапса на Северо-Западе РФ // *Агрохимия*. 2022. № 8. С. 44–50.
14. Семенов В. Д., Васильев А. А. Эффективность комплексного применения минеральных удобрений и гербицидов на посевах яровых зерновых культур // *Агро XXI*. 2010. № 7–9. С. 6–7.
15. Личко А. К., Ваулина Г. И., Личко Н. М. Фитосанитарное состояние посевов и урожайность зерна озимой пшеницы при комплексном применении удобрений и химических средств защиты растений в условиях центрального района нечерноземной зоны // *Известия ТСХА*. 2011. Вып. 3. С. 66–77.
16. Шпанев А. М. Влияние азотного питания на эффективность гербицидной обработки в посевах зерновых культур на Северо-Западе РФ // *Агрохимия*. 2021. № 10. С. 74–80.
17. Зубков А. Ф. Методические указания по сбору полевой биоценологической информации с целью оценки вредоносности комплекса вредных организмов. Л.: ВИЗР, 1978. 18 с.
18. Зубков А. Ф. Полевой кормовой севооборот как целостная экосистема // *Экология*. 1992. № 2. С. 3–11.
19. Шпанев А. М., Смур В. В. Фитосанитарные риски возделывания ярового рапса в Ленинградской области // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. № 2. С. 41–46.
20. Визирская М. М., Аканова Н. И., Мамедов Г. М. Эффективность различных форм азотных удобрений в условиях неустойчивого увлажнения // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2020. № 3. С. 9–12.

Поступила в редакцию 26.05.2023
После доработки 30.06.2023
Принята к публикации 15.07.2023

Агропочвоведение и агроэкология

УДК 631.445. 24:631.816:631. 416. 1

DOI: 10.31857/S2500262723040087, EDN: JXZWCZ

АЗОТНЫЙ РЕЖИМ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ И СОЧЕТАНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ**Н. Е. Завьялова**, доктор биологических наук, **М. Т. Васбиева**, кандидат биологических наук, **Д. Г. Шишков**, младший научный сотрудник, **И. В. Казакова**, младший научный сотрудникПермский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
614532, Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры, 12
E-mail: nezavyalova@gmail.com

Исследования проводили с целью изучения влияния различных видов и сочетаний минеральных удобрений на фракционный состав азота дерново-подзолистом тяжелосуглинистом почве в длительном стационарном опыте в сравнении с целинным аналогом. Работу выполняли в 2016 и 2018 гг. в Пермском крае после уборки ячменя в восьмипольном севообороте. Схема опыта: без удобрений; N_{90} ; P_{90} ; K_{90} ; $N_{90}P_{90}$; $N_{90}K_{90}$; $P_{90}K_{90}$; $N_{90}P_{90}K_{90}$. Азотный фонд дерново-подзолистом почве длительного стационарного опыта на 64...71 % представлен негидролизруемыми и на 17...22 % трудногидролизруемыми формами азота. Длительное применение различных видов и сочетаний минеральных удобрений не изменяло существенно соотношения фракций азота, характерного для целинных почв этого типа. Азотные удобрения, как при одностороннем внесении, так и в сочетании с калием хлористым ($N_{90}K_{90}$) и суперфосфатом ($N_{90}P_{90}$) способствовали повышению содержания общего азота в пахотном слое почвы на 10...20 % относительно контроля, а его минеральных соединений – в 2...3 раза. Одностороннее применение калийного удобрения обеспечило повышение содержания общего азота в почве на 12 %, а внесение суперфосфата не оказывало существенного влияния на ее азотный режим. Длительное применение полного минерального удобрения ($N_{90}P_{90}K_{90}$) способствовало поддержанию общего азота на уровне целинной почвы – 1490 мг/кг. Длительное одностороннее внесение азотных удобрений увеличивало содержание нитратного азота в почве по всему метровому слою в 1,5...2,5 раза, аммонийного – в 1,5...14,6 раза. Запасы минерального азота в вариантах $N_{90}P_{90}$, $N_{90}K_{90}$ и $N_{90}P_{90}K_{90}$ в слое 0...20 см увеличились, относительно контрольного варианта, в 2...3 раза, в слое 0...100 см – в 2 раза.

NITROGEN REGIME OF SODDY-PODZOLIC SOIL WITH LONG-TERM USE OF DIFFERENT TYPES AND COMBINATIONS OF MINERAL FERTILIZERS**N. E. Zavyalova, M. T. Vashbieva, D. G. Shishkov, I. V. Kazakova**Perm Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences,
614532, Permskii krai, s. Lobanovo, ul. Kul'tury, 12
E-mail: nezavyalova@gmail.com

The purpose of the work is to study the effect of various types and combinations of mineral fertilizers on the fractional composition of nitrogen in soddy-podzolic soil in a long-term stationary experiment and compare it with a virgin analogue. The studies were carried out in 2016 and 2018 on the experimental field of the Perm Research Institute of Agriculture after harvesting barley in an eight-field crop rotation deployed on soddy-podzolic heavy loamy soil. The experiment scheme: without fertilizers: N_{90} ; P_{90} ; K_{90} ; $N_{90}P_{90}$; $N_{90}K_{90}$; $P_{90}K_{90}$; $N_{90}P_{90}K_{90}$. To assess the effect of nitrogen, phosphorus, potash fertilizers and their combinations on the nitrogen regime of soddy-podzolic soil, the arable soil was compared with the virgin analogue. The nitrogen fund of soddy-podzolic soil of a long-term stationary experiment is represented by 64...71 % non-hydrolyzable and 17...22 % hardly hydrolyzable forms of nitrogen. Long-term use of various types and combinations of mineral fertilizers did not significantly change the ratio of nitrogen fractions characteristic of virgin soils of this type. Nitrogen fertilizers, both with one-sided application and in combination with potassium chloride ($N_{90}K_{90}$) and superphosphate ($N_{90}P_{90}$), contributed to an increase in the total nitrogen content in the arable soil layer by 10...20 % relative to the control, mineral nitrogen compounds – by 2...3 times. Unilateral application of potash fertilizer provided an increase in the content of total nitrogen in the soil by 12 %, the introduction of superphosphate did not have a significant effect on the nitrogen regime of the soil. Long-term use of complete mineral fertilizer ($N_{90}P_{90}K_{90}$) only in this way: ($N_{90}P_{90}K_{90}$) contributed to maintaining total nitrogen at the level of virgin soil – 1490 mg/kg. Long-term unilateral application of nitrogen fertilizers increased the content of nitrate nitrogen in the soil over the entire meter layer by 1.5–2.5 times, ammonium – by 1.5–14.6 times. The reserves of mineral nitrogen in the variants $N_{90}P_{90}$, $N_{90}K_{90}$, and $N_{90}P_{90}K_{90}$ in the 0–20 cm layer increased 2–3 times, in the 0–100 cm layer – 2 times relative to the control variant.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, минеральные удобрения, формы азота, миграция, профиль, запасы азота.**Key words:** soddy-podzolic soil, mineral fertilizers, nitrogen forms, migration, profile, nitrogen reserves.

Азот – один из основных элементов питания растений, без которого невозможно вырастить хороший урожай сельскохозяйственных культур [1, 2, 3]. Содержание азота в почве, его запасы, формы и подвижность в существенной степени определяют ее плодородие. Более 90 % азота в почве представлено органической формой и практически недоступно растениям без предварительной минерализации органического вещества [4]. На долю минерального азота почвы (нитраты, нитриты,

аммоний) приходится 1...6 % от его общего содержания.

При выращивании сельскохозяйственных культур в агроэкосистемах происходит отчуждение азота из почвы с растительной продукцией, нарушается его круговорот, что обуславливает необходимость восполнения возникающего дефицита этого элемента питания через удобрения [5]. Актуальными остаются вопросы изменения азотного режима почвы под воздействием различных минеральных удобрений и их сочетаний.

Результаты длительных стационарных опытов позволяют дать теоретическое обоснование и практические рекомендации по применению минеральных удобрений для сохранения почвенного плодородия, оптимизации питания и стабильного производства продукции растениеводства [6, 7].

Цель исследований – изучить влияние различных видов и сочетаний минеральных удобрений на фракционный состав азота дерново-подзолистой почвы в длительном стационарном опыте в сравнении с целинным аналогом.

Методика. Стационарный полевой эксперимент был заложен в 1978 г. на опытном поле Пермского НИИСХ (филиала ПФИЦ УрО РАН) на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве. Схема опыта: без удобрений; N_{90} ; P_{90} ; K_{90} ; $N_{90}P_{90}$; $N_{90}K_{90}$; $P_{90}K_{90}$; $N_{90}P_{90}K_{90}$. Севооборот восьмипольный со следующим чередованием культур: чистый пар, озимая рожь, картофель, пшеница с подсевом клевера, клевер 1 г.п., клевер 2 г.п., ячмень, овес. Минеральные удобрения вносили под зерновые культуры и картофель, на клевере изучали последствие. В опыте использовали мочевины или аммиачную селитру, суперфосфат и хлористый калий. Известь вносили перед началом эксперимента в дозе 1,0 Нг. Общая площадь делянки – 120 м², учетная – 76,4 м². Опыт заложен в 2-х полевых закладках, размещение вариантов рендомизированное.

Почвенные образцы отбирали после уборки ячменя в августе 2016 и 2018 гг. из слоя 0...20 см. Основные агрохимические показатели почвы определяли в соответствии с ГОСТами и методиками ЦИНАО: общего азота – по методу Кьельдаля, трудногидролизуемого и легкогидролизуемого азота – по [8], нитратного азота и обменного аммония – по методикам ЦИНАО. Показатели агрохимической характеристики почвы представлены в работе как среднее по двум закладкам полевого опыта за 2016 и 2018 гг. Продуктивность севооборота в тысячах зерновых единиц, баланс азота и содержание элементов питания в основной и побочной продукции возделываемых культур рассчитывали как среднее за пять ротаций севооборота (1978–2019 гг.).

Для сравнения результатов с целинной почвой образцы отбирали на стационарном участке злаково-разнотравного луга в августе в слое 0...20 см.

Результаты и обсуждение. Реакция почвенного раствора в различных вариантах опыта варьировала от средне-

Табл. 1. Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы длительного опыта и продуктивность севооборота

Вариант	pH _{ксл}	Нг, моль/100 г	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг	Гумус, %	Продуктивность севооборота (среднее за I...V ротации), тыс. зерн. ед./га в год
Целинная почва						
Злаково-разнотравный луг	4,6	3,4	267	175	2,15	-
Пахотная почва						
Контроль	5,2	2,5	192	129	1,93	2,65
N_{90}	4,9	3,5	188	112	1,89	3,15
P_{90}	5,1	2,6	461	108	2,06	2,76
K_{90}	5,5	1,6	235	217	2,37	2,82
$N_{90}P_{90}$	4,5	3,8	397	109	2,22	3,02
$N_{90}K_{90}$	4,6	3,9	185	218	2,20	3,11
$P_{90}K_{90}$	5,2	2,6	397	195	1,84	2,97
$N_{90}P_{90}K_{90}$	4,7	4,0	371	230	2,29	3,23
НСР ₀₅	0,3	0,2	123	17	0,33	0,17

до слабокислой (табл. 1). При внесении K_{90} отмечено достоверное увеличение pH_{ксл} с 5,2 в контрольном варианте до 5,5. Обеспеченность почвы подвижным фосфором по Кирсанову изменялась от средней до очень высокой.

При внесении фосфорных удобрений (P_{90} , $N_{90}P_{90}$, $P_{90}K_{90}$ и $N_{90}P_{90}K_{90}$) отмечали высокое содержание подвижного фосфора в почве (371...461 мг/кг). Максимальным в опыте содержанием подвижного калия характеризовалась почва в варианте с калийными удобрениями в дозе 90 кг д.в./га – 195...230 мг/кг, что практически в 2 раза выше, чем в контроле, вариантах с внесением N_{90} , P_{90} и $N_{90}P_{90}$, а также на 11...24 % больше, чем в целинной почве злаково-разнотравного луга.

Содержание гумуса в дерново-подзолистой почве под ячменем варьировало в интервале 1,84...2,37 %, его изменение в зависимости от видов и соотношений минеральных удобрений математически не доказано. Величина этого показателя в вариантах опыта с применением азота в сочетании с фосфором и калием находилась практически на уровне целинной почвы.

Минеральные удобрения обеспечивали рост продуктивности сельскохозяйственных культур, которая при внесении $N_{90}P_{90}K_{90}$ была на 21,9 % выше, чем в контроле, и составляла 3,23 тыс. зерн.ед./га в год. При внесении P_{90} , K_{90} и $P_{90}K_{90}$ отмечен самый низкий прирост продуктивности.

Табл. 2. Баланс азота за 5 ротаций полевого восьмипольного севооборота (1978–2019 гг.), кг/га

Вариант	В сумме за 5 ротаций				Баланс азота +/-		Интенсив- ность баланса, %
	поступление			хозяй- ственный вынос	всего	в среднем в год	
	1*	2	3				
Без удобрений	-	690	150	2640	-1800	-45	32
N ₉₀	2250	740	150	3425	-285	-7	92
P ₉₀	-	760	150	2585	-1825	-46	29
K ₉₀	-	920	150	2935	-2015	-50	31
N ₉₀ P ₉₀	2250	625	150	3255	-230	-6	93
N ₉₀ K ₉₀	2250	690	150	3300	-210	-5	94
P ₉₀ K ₉₀	-	915	150	3000	-2085	-52	31
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	2250	645	150	3385	-340	-9	90

*1 – с удобрениями, 2 – с клевером (2/3 от выноса культурой), 3 – с семенами.

Вынос азота культурами севооборота в варианте без удобрений за пять ротаций севооборота составил 2640 кг/га, при внесении азотных удобрений отдельно и в сочетании с фосфорными и калийными он увеличился на 23,3...29,7 % (табл. 2).

При этом интенсивность баланса составляла 90...94 %. Без азотных удобрений она оставалась на уровне контроля, что объясняется меньшими раз- мерами урожая и выноса азота. В вариантах, где азотные удобрения не вносили, отрицательный баланс азота изменялся от 45 до 52 кг/га в год, компенсация выноса элемента благодаря двум полям клевера лугового в севообороте составила около 30 %. При внесении азотных удобрений N_{90} , $N_{90}P_{90}$, $N_{90}K_{90}$ и $N_{90}P_{90}K_{90}$ баланс был близок к нулевому.

Результаты анализа качества урожая возделываемых в севообороте культур свидетельствуют, что максимальное в опыте количество азота выносит яровая пшеница, а также клевер первого и второго года пользования (табл. 3). Вынос азота зерном пшеницы увеличивался в 1,1 раза при совместном внесении азотных удобрений с фосфорными ($N_{90}P_{90}$) и калийными ($N_{90}K_{90}$). Различные виды минеральных удобрений и их сочетания в последствии не оказывали влияния на содержание азота

Табл. 3. Содержание элементов питания в основной и побочной продукции культур севооборота (среднее за 1978–2019 гг.), %

Культура*	Продукция	Элемент	Без удобрений	N ₉₀	P ₉₀	K ₉₀	N ₉₀ P ₉₀	N ₉₀ K ₉₀	P ₉₀ K ₉₀	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	НСР ₀₅
1	зерно	N	1,65	1,90	1,74	1,95	1,97	2,05	1,85	2,03	0,15
		P ₂ O ₅	0,71	0,69	0,72	0,69	0,68	0,68	0,66	0,70	Fф<Fт
		K ₂ O	0,65	0,66	0,66	0,66	0,65	0,64	0,62	0,62	0,02
	солома	N	0,57	0,67	0,51	0,63	0,76	0,72	0,66	0,72	0,08
		P ₂ O ₅	0,19	0,12	0,17	0,18	0,17	0,16	0,19	0,25	0,04
		K ₂ O	1,45	1,60	1,53	1,51	1,99	2,03	1,50	1,87	0,22
2	клубни	N	1,46	1,95	1,46	1,5	1,79	1,74	1,40	1,85	0,23
		P ₂ O ₅	0,52	0,48	0,54	0,52	0,49	0,47	0,51	0,50	Fф<Fт
		K ₂ O	3,34	3,11	3,33	3,58	3,00	3,67	3,40	3,54	0,16
	зерно	N	2,51	2,42	2,56	2,52	2,71	2,48	2,57	2,78	0,19
		P ₂ O ₅	0,84	0,91	0,83	0,9	0,76	0,83	0,85	0,77	0,07
		K ₂ O	0,54	0,50	0,49	0,56	0,54	0,43	0,44	0,47	0,04
3	солома	N	0,71	0,77	0,71	0,61	0,83	0,73	0,75	0,83	0,09
		P ₂ O ₅	0,17	0,19	0,19	0,17	0,21	0,17	0,19	0,19	0,03
		K ₂ O	1,39	1,35	1,02	1,08	1,26	1,33	1,64	1,46	0,18
	сено, 16 %	N	2,71	2,82	2,5	2,82	2,76	2,65	2,71	2,58	Fф<Fт
		P ₂ O ₅	0,71	0,73	0,63	0,69	0,73	0,7	0,72	0,70	0,07
		K ₂ O	3,24	3,11	3,02	3,78	3,26	3,8	3,65	3,69	0,33
5	сено, 16 %	N	2,69	2,81	2,64	2,68	2,79	2,65	2,71	2,73	Fф<Fт
		P ₂ O ₅	0,57	0,58	0,54	0,57	0,57	0,51	0,59	0,58	0,05
		K ₂ O	2,95	2,91	3,16	3,25	2,7	3,33	3,39	3,30	0,25
	зерно	N	1,80	2,07	1,72	1,85	2,13	2,17	1,96	2,05	0,27
		P ₂ O ₅	0,82	0,77	0,78	0,78	0,84	0,78	0,78	0,91	Fф<Fт
		K ₂ O	0,65	0,72	0,71	0,7	0,75	0,77	0,71	0,69	Fф<Fт
6	солома	N	0,67	0,75	0,65	0,78	0,84	0,78	0,69	0,82	0,16
		P ₂ O ₅	0,31	0,27	0,27	0,26	0,32	0,25	0,23	0,31	0,06
		K ₂ O	1,30	1,45	1,40	1,54	1,60	1,74	1,52	1,70	0,24
	зерно	N	1,80	1,99	1,71	1,72	1,89	2,04	1,79	1,87	0,24
		P ₂ O ₅	0,83	0,80	0,83	0,79	0,82	0,84	0,79	0,81	Fф<Fт
		K ₂ O	0,77	0,82	0,76	0,74	0,90	0,79	0,80	0,90	Fф<Fт
7	солома	N	0,53	0,78	0,43	0,46	0,75	0,75	0,45	0,69	0,22
		P ₂ O ₅	0,44	0,31	0,46	0,44	0,40	0,33	0,45	0,37	0,07
		K ₂ O	2,46	2,25	2,39	2,18	2,50	2,55	2,43	2,62	Fф<Fт

*1 – озимая рожь, 2 – картофель, 3 – яровая пшеница, 4 – клевер 1 г.п., 5 – клевер 2 г.п., 6 – ячмень, 7 – овёс.

в сене клевера. Длительное применение минеральных удобрений, кроме фосфорных (P₉₀), повышало содержание азота в зерне озимой ржи и ярового ячменя, относительно варианта без удобрений. В зерне овса не установлено значимых различий в зависимости от вариантов опыта. Накопление азота в соломе зерновых культур мало зависело от применяемых удобрений и их сочетаний, при этом было выше в соломе пшеницы и ячменя, чем в соломе озимой ржи и овса.

Состояние азотного фонда исследуемой почвы зависело от вида угодий, характера их использования и применяемых удобрений. Содержание общего азота в целинной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Предуралья в слое 0...20 см составляло 1490 мг/кг [9]. Степень обогащённости органического вещества азотом высокая – C: N = 8. Для этого типа почв характерна локализация запасов органического вещества и азота в верхней части профиля. Запасы общего азота в целинной почве в слое 0...20 см составляли 3,43 т/га (почти 40 % от его запасов в метровом слое).

Содержание общего азота служит показателем потенциального плодородия почвы, однако эффективное плодородие зависит от наличия подвижных форм этого элемента. Для характеристики азотного режима исследуемой почвы необходимо иметь представление о его фракционном составе. Каждая форма азота имеет разную агрономическую ценность [8].

Для дерново-подзолистых почв Предуралья характерно преобладание негидролизующихся соединений азота над трудно- и легкогидролизующимися [10, 11]. Фракция негидролизующего азота представлена более стойкими к гидролизу и микробиологическому разложению органическими азотсодержащими соединениями, в том числе, необменным аммонием. На ее долю приходится большая часть валовых запасов азота целинной почвы –

74 %, трудногидролизующая составляла 17 %, легкогидролизующая – 8 %, минеральная – только 1 %.

Длительное (40 лет) применение азотных удобрений в стационарном полевом опыте, как при одностороннем внесении (N₉₀), так и в сочетании с калием хлористым и суперфосфатом (N₉₀K₉₀, N₉₀P₉₀) привело к увеличе-

Табл. 4. Влияние длительного применения минеральных удобрений на азотный режим дерново-подзолистой почвы в слое 0...20 см (среднее за 2016, 2018 гг.)

Вариант	Общий азот, мг/кг	Негидролизуемый азот	Трудно-гидролизуемый азот	Легко-гидролизуемый азот	Минеральный азот	C:N
Целинная почва						
Злаково-разнотравный луг	1490	<u>1100</u> 74	<u>253</u> 17	<u>121</u> 8	<u>16</u> 1	8
Пахотная почва						
Без удобрений	1148	<u>757</u> 66	<u>225</u> 20	<u>139</u> 12	<u>27</u> 2	10
N ₉₀	1323	<u>856</u> 65	<u>231</u> 17	<u>178</u> 13	<u>58</u> 4	8
P ₉₀	1255	<u>808</u> 64	<u>259</u> 21	<u>162</u> 13	<u>26</u> 2	10
K ₉₀	1283	<u>915</u> 71	<u>202</u> 16	<u>148</u> 12	<u>18</u> 1	10
N ₉₀ P ₉₀	1267	<u>829</u> 65	<u>221</u> 17	<u>145</u> 11	<u>72</u> 6	10
N ₉₀ K ₉₀	1330	<u>875</u> 66	<u>242</u> 18	<u>169</u> 13	<u>45</u> 3	9
P ₉₀ K ₉₀	1071	<u>682</u> 64	<u>239</u> 22	<u>125</u> 12	<u>25</u> 2	10
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	1432	<u>969</u> 68	<u>237</u> 17	<u>158</u> 11	<u>68</u> 5	8
НСР ₀₅	119	113	Fφ<Fт	Fφ<Fт	18	-

*в числителе абсолютное содержание азота в мг/кг, в знаменателе – в % от общего содержания азота в почве.

нию содержания общего азота в почве, относительно контроля, на 10...20 %, его минеральной фракции – в 1,7...2,7 раза (табл. 4).

Наибольшее накопление азота в дерново-подзолистой почве отмечено при длительном использовании полного минерального удобрения (NPK) в дозах по 90 кг/га д.в., что способствовало поддержанию его общего содержания на уровне целинной почвы. Кроме того, отмечено достоверное повышение общего азота в почве при систематическом применении калийных удобрений на 12 %. Увеличение произошло благодаря негидролиземой фракции, в состав которой входит необменный аммоний. Высокое содержание калия в почве приводит к блокированию потребления фиксированного аммония [12].

Возделывание культур севооборота способствовало уменьшению доли негидролиземой фракции в составе общего азота с 74 % в целинной почве до 64...71 %. Достоверное увеличение ее доли, по сравнению с контролем, отмечено в вариантах K_{90} , $N_{90}K_{90}$, $N_{90}P_{90}K_{90}$.

Ближайший резерв питания растений – легкогидролизуемая фракция азота. Она наиболее мобильна, доступность азота этой фракции определяется интенсивностью биологических процессов в почве [4]. В состав ее азотистых соединений входят такие наиболее подвижные органические соединения, как амиды и амины, которые при благоприятных условиях переходят в минеральную форму. Ведение севооборота и применение минеральных удобрений повысило долю легкогидролизуемого азота в пахотном слое почвы, относительно целинной, в составе общего азота с 8 до 11...13 %. В варианте без удобрений содержание азота этой фракции составляло 139 мг/кг, что сопоставимо с гумусо-аккумулятивным горизонтом целинной почвы. Длительное применение азотных удобрений по 90 кг д.в./га привело к увеличению легкогидролизуемой фракции азота, относительно контроля, на 28 %. Внесение минеральных удобрений в виде парных сочетаний и NPK, кроме варианта $P_{90}K_{90}$, способствовало увеличению содержания легкогидролизуемого азота в пахотном (0...20 см) слое почвы на 4...22 %.

Использование азотных удобрений, как в чистом виде, так и в сочетании с фосфорными и калийными ($N_{90}P_{90}$, $N_{90}K_{90}$, $N_{90}P_{90}K_{90}$) приводило к росту доли минерального азота в составе общего до 3...6 %. Эта форма азота служит основным доступным источником азота для растений.

Запасы общего азота при внесении азотных удобрений сопоставимы с его запасами в почве злаково-разнотравного луга. Значимых различий по запасам органических и минеральных форм азота в слое 0...20 см между вариантами не установлено (табл. 5). Достоверное снижение содержания общего и негидролиземого азота выявлено в варианте с $P_{90}K_{90}$.

Выводы. Длительное возделывание сельскохозяйственных культур без применения удобрений приводило к снижению запасов общего азота в почве севооборота, относительно целинной почвы, на 0,45 т/га. Максимальная в опыте убыль азота отмечена в варианте с внесением $P_{90}K_{90}$, в котором баланс азота составил — 2085 кг/га.

Наиболее интенсивно азот использовали растения яровой пшеницы и клевера лугового. Максимальное в опыте его содержание зафиксировано в зерне пшеницы при внесении $N_{90}P_{90}$ и $N_{90}P_{90}K_{90}$ — 2,71...2,78 %.

Фракционный состав азота почвы севооборота на 64...71 % представлен негидролиземыми соединениями против 74 % в целинной почве злаково-разнотравного луга. Сельскохозяйственное использова-

Табл. 5. Влияние длительного применения минеральных удобрений на запасы общего азота и его фракций в слое дерново-подзолистой почвы 0...20 см (среднее за 2016, 2018 гг.), т/га

Вариант	Общий азот	Негидролизуемый азот	Трудногидролизуемый азот	Легкогидролизуемый азот	Минеральный азот
Целинная почва					
Злаково-разнотравный луг	3,43	2,53	0,58	0,28	0,04
Пахотная почва					
Без удобрений	2,98	1,97	0,59	0,36	0,07
N_{90}	3,44	2,23	0,60	0,46	0,15
P_{90}	3,26	2,10	0,67	0,42	0,07
K_{90}	3,34	2,38	0,53	0,38	0,05
$N_{90}P_{90}$	3,29	2,16	0,57	0,38	0,19
$N_{90}K_{90}$	3,46	2,28	0,63	0,44	0,12
$P_{90}K_{90}$	2,78	1,77	0,62	0,33	0,07
$N_{90}P_{90}K_{90}$	3,72	2,52	0,62	0,41	0,18
NCP_{05}	0,30	0,22	Fф<Fт	Fф<Fт	0,05

ние приводило к сужению соотношения негидролиземой фракции азота почвы к гидролизуемым фракциям от 2,9 в целинной почве до 1,9...2,6 в вариантах с длительным применением различных видов и сочетаний минеральных удобрений.

Применение азотных удобрений по 90 кг д.в./га и их сочетаний с фосфором и калием обеспечивало увеличение содержания минерального азота в почве, относительно контроля, в 1,6...2,7 раза. Достоверных различий в содержании трудногидролизуемой и легкогидролизуемой фракций азота под действием различных видов и сочетаний удобрений не отмечено. Применение калия хлористого способствовало повышению содержания общего азота в почве на 12 % вследствие прироста негидролиземых соединений. Длительное использование суперфосфата не оказывало существенного влияния на азотный режим почвы.

Литература

1. Кудеяров В. Н. Баланс азота, фосфора и калия в земледелии России // *Агрохимия*. 2018. № 10. С. 3–11.
2. Эффективность использования азота в длительных и краткосрочных опытах агрохимслужбы и Геосети Российской Федерации / В. А. Романенков, М. В. Беличенко, О. В. Рухович и др. // *Агрохимия*. 2020. № 12. С. 28–37.
3. Сычев В. Г. Шафран С. А., Виноградова С. Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // *Агрохимия*. 2020. № 6. С. 3–13.
4. Гамзиков Г. П. Системный комплексный подход в агрохимических исследованиях биогенных элементов в агроценозах (на примере азота) // *Агрохимия*. 2014. № 8. С. 3–16.
5. Гомонова Н. Ф., Минеев В. Г. Динамика гумусного состояния почв России и пути его регулирования // *Агрохимия*. 2012. № 6. С. 23–31.
6. Гамзиков Г. П., Анкудович Ю. Н. Влияние длительного применения удобрений на продуктивность полевых культур и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы // *Агрохимия*. 2018. № 1. С. 17–29.
7. Окорков В. В., Фенова О. А., Окоркова Л. А. Удобрение и продуктивность севооборотов на серых лесных почвах Верхневолжья // *Агрохимия*. 2018. № 2. С. 56–70.

8. Шконде Э. И., Королева И. Е. О природе подвижности почвенного азота // *Агрохимия*. 1964. № 10. С. 17–35.
9. Завьялова Н. Е. Гумус и азот дерново-подзолистой почвы различных сельскохозяйственных угодий Пермского края // *Почвоведение*. 2016. № 11. С. 1347–1354.
10. Васбиева М. Т., Завьялова Н. Е., Шишков Д. Г. Изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы при длительном применении азотных, фосфорных и калийных удобрений // *Почвоведение*. 2022. № 11. С. 1415–1425.
11. Ямалудинова В. Р., Фомин Д. С., Шишков Д. Г. Влияние длительного применения удобрений на азотный режим дерново-подзолистой почвы и урожайность картофеля (*Solanum Tuberosum* L.) // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2019. № 1. С. 10–13.
12. Якименко В. Н. Влияние длительного применения калийных удобрений на агрохимические свойства почвы // *Агрохимия*. 2012. № 12. С. 41–46.

Поступила в редакцию 28.03.2023

После доработки 02.07.2023

Принята к публикации 18.07.2023

ДИНАМИКА ТАКСАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР СОСНЫ ПО ДАННЫМ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**Н.Н. Дубенок, академик РАН, А.В. Лебедев, кандидат сельскохозяйственных наук***Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева,
127434, Москва, ул. Тимирязевская, 49
E-mail: alebedev@rgau-msha.ru*

Исследования проводили с целью сравнительной оценки расчетной и фактической динамики таксационных показателей (средние высота и диаметр, сумма площадей сечений и запас древесины) лесных культур сосны разной начальной густоты за 120-летний период по материалам долговременных наблюдений на постоянных пробных площадях. Объектом исследования служили культуры сосны на постоянных пробных площадях Лесной опытной дачи (г. Москва). Сопоставление роста и производительности древостоев на постоянных пробных площадях проводили с таблицами хода роста полных культур сосны в Европейской части России и с таблицами хода роста модальных сосновых древостоев Европейской части России (экорегионы южной тайги, зон смешанных, лиственных лесов и лесостепи). Фактические кривые динамики таксационных показателей располагаются во всем диапазоне представленных табличных значений. При этом таблицы хода роста дают сильно упрощенное представление об изменении таксационных показателей, которые в фактических древостоях имеют не монотонную динамику во времени. Отмечены значительные отклонения рядов динамики средних высот и диаметров, сумм площадей сечений, запасов древесины на пробных площадях от данных таблиц хода роста полных и модальных сосновых древостоев. Альтернативой традиционным таблицам могут выступать прогностические модели динамики таксационных показателей с разным начальным состоянием древостоев, в которых нет строгой привязки к бонитетной основе.

DYNAMICS OF STAND INDICATORS OF PINE PLANTATIONS ACCORDING TO THE DATA OF LONG-TERM OBSERVATIONS**N.N. Dubenok, A.V. Lebedev***Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
127434, Moskva, ul. Timiryazevskaya, 49
E-mail: alebedev@rgau-msha.ru*

The purpose of the study is to study the dynamics of stand indicators (average height and diameter, the basal areas and stock) of pine forest plantations of different initial density over a 120-year period based on long-term observations on permanent sample plots. The object of the study was pine plantations on permanent trial plots of the Forest Experimental Station (Moscow). Course of Growth tables are among the simplest models that reflect the change in stand indicators of a collection of forest stands. A comparison of the growth and yield of forest stands on permanent test plots was carried out with tables of the growth course of full pine plantations in the European part of Russia and with tables of the growth course of modal pine stands of the European part of Russia (ecoregions of the southern taiga, zones of mixed, deciduous forests and forest-steppe). The actual curves of the dynamics of stand indicators are located in the entire range of the presented tabular values. It was revealed that the tables of the course of growth give a greatly simplified idea of the change in stand indicators, which in actual forest stands do not have a monotonous dynamic over time. Significant deviations of the series of dynamics of average heights and diameters, basal areas, wood stocks on trial plots from the data of tables of the growth rate of complete and modal pine forest stands were noted. An alternative to traditional tables can be predictive models of the dynamics of stand indicators with different initial state of forest stands, in which there is no strict link to the quality basis.

Ключевые слова: культуры сосны (*Pinus sylvestris*), начальная густота, таксационные показатели, динамика древостоев, долговременные наблюдения.

Key words: pine plantations (*Pinus sylvestris*), initial density, stand indicators, stand dynamics, long-term observations.

Основы долговременных наблюдений за древостоями на постоянных пробных площадях заложены немецкими лесоводами в середине XIX в. [1, 2]. С тех пор во многих странах Европы стали создавать первые лесные исследовательские станции. За прошедший период накоплены продолжительные ряды данных о лесах Германии, Швейцарии, Швеции, Великобритании, Польши и других стран [3, 4, 5]. В России создание первых опытных объектов с целью организации продолжительных исследований также началось в середине XIX в. К их числу относятся экспериментальные посадки Лисинской казенной лесной дачи, Никольской лесной дачи, Лесной опытной дачи Петровской земледельческой и лесной академии [6]. В результате наблюдений накоплены сведения о динамике таксационных показателей древостоев на более чем 100 постоянных пробных площадях на каждом из объектов.

Данные долговременных экспериментов считают надежной основой для выявления закономерностей роста и продуктивности древостоев [7, 8]. По материалам таких наблюдений и результатам национальных инвентаризаций лесов выявлены закономерности роста и производительности древостоев главных лесообразующих пород [9]. С их использованием разрабатывают модели прогнозирования динамики таксационных показателей, обосновывают оптимальную структуру и породный состав древостоев, исследуют реакцию древесных растений на происходящие изменения окружающей среды и др. [10, 11]. Поэтому в условиях реализации принципов устойчивого лесоуправления, как основы климатически оптимизированного лесного хозяйства, особую актуальность приобретает изучение роста и производительности древостоев на протяжении длительных промежутков времени.

Цель исследования – сравнительная оценка расчетной и фактической динамики таксационных показателей (средние высота и диаметр, сумма площадей сечений и запас древесины) лесных культур сосны разной начальной густоты за 120-летний период по материалам долговременных наблюдений на постоянных пробных площадях.

Методика. Объектом исследования служили культуры сосны на постоянных пробных площадях Лесной опытной дачи Российской государственной аграрной университета – МСХА имени К. А. Тимирязева. Наибольшее количество наблюдений накоплено по культурам сосны с начальной густотой посадки 32 тыс. (пробные площади 4/А, 4/Б, 4/Д, 4/Е, 4/Ж, 4/К, 4/Л, 4/М, 4/Н и 4/О), 8 тыс. (пробные площади 6/А, 6/Б, 6/Д, 6/Е, 6/Н, 6/Н1, 6/П, 6/Р, 6/Х, 6/Ц, 6/Ч и 6/Ш) и 2 тыс. (пробные площади 5/М1, 5/М2, 5/М3 и 5/М4) растений на 1 га. Внутри каждой рассматриваемой группы густоты совокупности не полностью однородные. На пробных площадях с начальной густотой 32 тыс. и 2 тыс. представлены сосновые древостои из семян различного географического происхождения, а с 8 тыс. проводили рубки ухода различной интенсивности, не приводящие к нарушению структуры древесного полога. Но, несмотря на разнообразие древостоев на пробных площадях, возможно выделение общих закономерностей в их росте и производительности.

Таблицы хода роста (ТХР) относят к самым простым моделям, которые отражают изменение таксационных показателей совокупности древостоев. Сопоставление их роста и производительности на постоянных пробных площадях проводили с таблицами хода роста полных культур сосны в Европейской части России (i) и с таблицами хода роста модальных сосновых древостоев Европейской части России (экорегions южной тайги, зон смешанных, лиственных лесов и лесостепи) (ii) [12]. Первые ТХР охватывают диапазон возрастов от 20 до 120 лет и классов бонитета от Ib ($SI = 36,2$ м) до V ($SI = 13,9$ м), вторые – от 20 до 140 лет и от I ($SI = 28,4$ м) до V ($SI = 13,6$ м) классов соответственно. Для более детального анализа использовали данные по совокупности отобранных постоянных пробных площадей, дифференцированных по критерию начальной густоты.

Результаты и обсуждение. Изменение средних высот древостоев на постоянных пробных площадях имеет возрастающий характер (рис. 1). Изменение классов бонитета в процессе роста происходило на протяжении всего периода наблюдений. В воз-

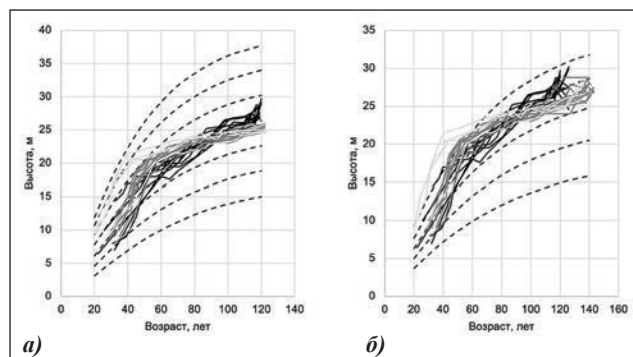


Рис. 1. Сопоставление роста по средней высоте с таблицами хода роста: а) полных древостоев, б) модальных древостоев; — начальная густота 2 тыс. шт.; --- начальная густота 8 тыс. шт.; - - - - - начальная густота 32 тыс. шт.; - - - - - данные таблиц хода роста.

расте 20...40 лет по ТХР полных культур сосновые насаждения на пробных площадях с начальной густотой 2 тыс. относились к Ib...I классам бонитета ($SI = 36,2...28,8$ м), 8 тыс. – к II...IV классам ($SI = 25,1...17,6$ м), 32 тыс. – к I...IV классам ($SI = 28,8...17,6$ м). В возрасте 80...120 лет древостои на большинстве пробных площадей соответствовали II классу бонитета ($SI = 25,1$ м), а ростовые траектории были относительно синхронны с бонитетной кривой.

Для древостоев с начальной густотой 2 тыс. на возрастном промежутке от 20 до 100 лет произошло снижение класса бонитета, а для древостоев с начальной густотой 8 и 32 тыс. – его повышение. В зависимости высот от возраста по классам бонитета между ТХР полных и модальных сосновых древостоев различия были незначительными. Графическое сопоставление данных по средним высотам пробных площадей с ТХР модальных древостоев показывает закономерности, схожие с выявленными для ТХР полных культур.

В кривых роста по среднему диаметру для отдельных пробных площадей наблюдается большая синхронность и согласованность, чем для средней высоты (рис. 2). На отдельных временных промежутках динамика средних диаметров соответствует табличным значениям (полных культур). Например, в древостоях с начальной густотой 2 тыс. в возрасте от 20 до 40 лет на трех пробных площадях из четырех кривые соответствуют Ib классу, в возрасте от 80 до 120 лет – II классу по ТХР. При начальной густоте 32 тыс. для большинства пробных площадей кривые роста по среднему диаметру находятся в диапазоне между II и III классами бонитета. Тем не менее практически на всех пробных площадях с возрастом происходит отклонение ростовых кривых в меньшую сторону относительно табличных значений.

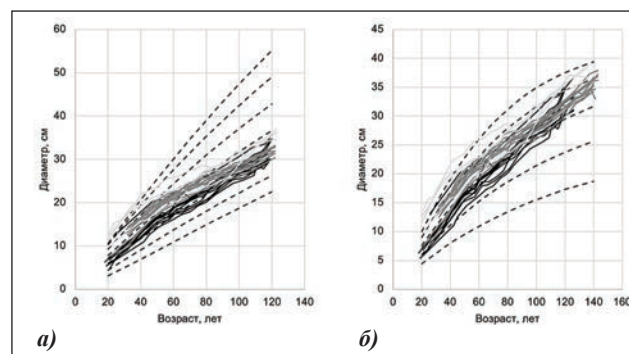


Рис. 2. Сопоставление роста по среднему диаметру с таблицами хода роста: а) полных древостоев, б) модальных древостоев; — начальная густота 2 тыс. шт.; --- начальная густота 8 тыс. шт.; - - - - - начальная густота 32 тыс. шт.; - - - - - данные таблиц хода роста.

При сопоставлении кривых роста на пробных площадях с данными ТХР модальных сосновых древостоев заметно, что при начальной густоте 2 и 8 тыс. после возраста 60 лет кривые роста переходят вниз на класс бонитета (с Ib...I к Ia...II классам), а после 120 лет возвращаются на исходную траекторию (Ib...Ia классы). Для варианта с начальной густотой 32 тыс. после 40...60 лет прослеживается переход кривой роста на траекторию, характерную для более производительных древостоев (например, с I к Ia классу). В целом кривые роста по среднему диаметру из ТХР модальных древостоев в большей степени соответствуют фактическим данным с пробных площадей.

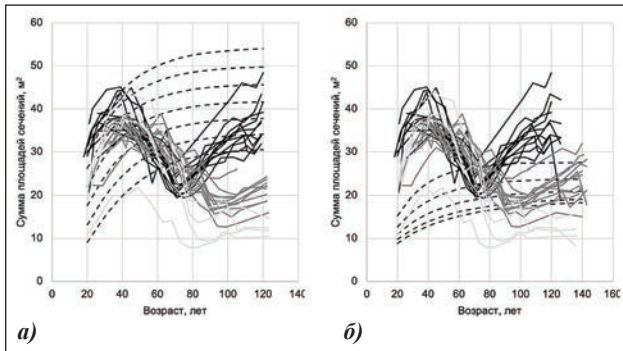


Рис. 3. Сопоставление изменения суммы площадей сечений с таблицами хода роста: а) полных древостоев, б) модальных древостоев: — начальная густота 2 тыс. шт.; -- начальная густота 8 тыс. шт.; --- начальная густота 32 тыс. шт.; ---- — данные таблиц хода роста.

Кривые из ТХР полных культур синхронны с рядами сумм площадей сечений на пробных площадях только на промежутке от 20 до 40 лет (рис. 3). При этом фактические кривые располагаются во всем диапазоне представленных табличных значений. В возрасте 70...90 лет из-за произошедшего значительного отпада деревьев суммы площадей сечений на пробных площадях меньше табличных для самого низко продуктивного V класса бонитета. И только для варианта с начальной густотой 32 тыс. в 100...120 лет суммы площадей сечений расположились в диапазоне табличных кривых для I...V классов бонитета. Для вариантов с начальной густотой 2 и 8 тыс. они почти в два раза меньше табличных для V класса бонитета. ТХР модальных сосновых древостоев сильно занижают значения сумм площадей сечений. Например, для культур I класса бонитета (начальная густота 2 тыс.) возраста 20...50 лет — более чем в 2 раза. Особенность рассматриваемых ТХР — незатухающий характер динамики сумм площадей сечений, в то время как у фактических древостоев прослеживается прохождение двух периодов увеличения, стабилизации и снижения их значений.

Основные закономерности динамики запасов древесины в древостоях пробных площадей, в сравнении с данными ТХР, аналогичны динамике сумм площадей сечений (рис. 4). В отличие от пробных площадей в рассматриваемых ТХР кривые запаса монотонно возрастают и не достигают ни одной точки кульминации, так как традиционно таблицы составляются только до возраста технической спелости, которая наступает раньше естественной. Известно несколько примеров ТХР [13, 14],

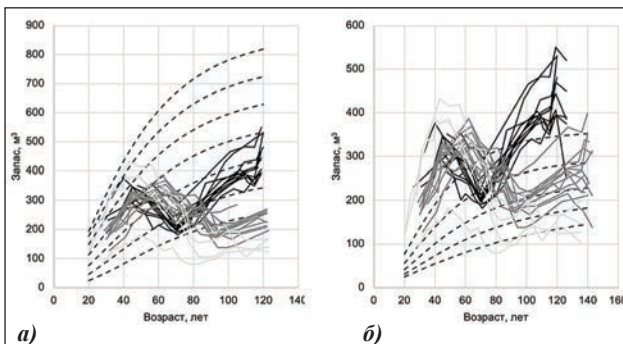


Рис. 4. Сопоставление изменения запаса с таблицами хода роста: а) полных древостоев, б) модальных древостоев: — начальная густота 2 тыс. шт.; -- начальная густота 8 тыс. шт.; --- начальная густота 32 тыс. шт.; ---- — данные таблиц хода роста.

в которых прослежен ход роста до разрушения древостоев, а кривые динамики запасов древесины имеют точку максимума (возраст естественной спелости).

До 40...50 лет динамика запасов древесины на пробных площадях соответствует кривым из ТХР полных древостоев с небольшими отклонениями от них. Далее в результате интенсивного отпада в рассматриваемых культурах начинается снижение запасов в среднем до возраста 70...90 лет с дальнейшим их повышением, например, до значений, характерных II...IV классам бонитета (начальная густота 32 тыс.) и V класса бонитета (начальная густота 8 тыс.). Если для ТХР полных древостоев значения запасов на пробных площадях не превышали Ib класс бонитета и опускались ниже уровня V класса, то для ТХР модальных древостоев — не опускались ниже уровня V класса, а в случае наличия в таблице данных по Ib и Ia классам полностью укладывались в диапазон кривых крайних бонитетов.

Выводы. Таблицы хода роста дают сильно упрощенное представление об изменении величины таксационных показателей, которые в фактических древостоях имеют не монотонную динамику во времени. Выявлены значительные отклонения рядов динамики средних высот и диаметров, сумм площадей сечений, запасов древесины на пробных площадях от данных ТХР полных и модальных сосновых древостоев. В ТХР все таксационные показатели увязаны в зависимости от класса бонитета, но в фактических древостоях они имеют индивидуальную траекторию, каждая из которых на определенных этапах роста может соответствовать кривым для разных классов бонитета. Альтернативой традиционным ТХР могут служить прогностические модели динамики таксационных показателей с разным начальным состоянием древостоев, в которых нет строгой привязки к бонитетной основе.

Литература.

1. Maintenance of long-term experiments for unique insights into forest growth dynamics and trends: review and perspectives / H. Pretzsch, M. del Río, P. Biber, et al. // *European Journal of Forest Research*. 2019. No. 138. P. 165–185. doi: 10.1007/s10342-018-1151-y.
2. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870 / H. Pretzsch, P. Biber, G. Schütze, et al. // *Nature Communications*. 2014. No. 5. URL: <https://www.nature.com/articles/ncomms5967> (дата обращения: 25.01.2023). doi: 10.1038/ncomms5967.
3. Lessons learned from a long-term irrigation experiment in a dry Scots pine forest: Impacts on traits and functioning / A. R. Bose, A. Rigling, A. Gessler, et al. // *Ecological Monographs*. 2022. Vol. 92. URL: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ecm.1507> (дата обращения: 25.01.2023). doi: 10.1002/ecm.1507.
4. Gran O., Götmark F. Long-term experimental management in Swedish mixed oak-rich forests has a positive effect on saproxylic beetles after 10 years // *Biodivers Conserv*. 2019. Vol. 28, P. 1451–1472. doi: 10.1007/s10531-019-01736-5.
5. Jagiello R., Łukowski A., Kowalkowski W. The Polish Provenances of European Larch Overperform the Expected Growth Dynamics Indicated by the Sigmoid Model // *Forests*. 2022. Vol. 13. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/11/1852> (дата обращения: 25.01.2023). doi: 10.3390/f13111852.
6. Дубенок Н. Н., Кузьмичев В. В., Лебедев А. В. Результаты экспериментальных работ за 150 лет в Лесной опытной даче Тимирязевской сельскохозяйственной академии. М.: Наука, 2020. 382 с.

7. Lebedev A. V. Changes in the growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in an urban environment in European Russia since 1862 // *Journal of Forestry Research*. 2022. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-022-01569-z> (дата обращения: 25.01.2023). doi: 10.1007/s11676-022-01569-z.
8. Мерзленко М. Д. Обоснование теории волнообразного роста хвойных лесных культур // *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2021. Т. 25. № 2. С. 5–9. doi: 10.18698/2542-1468-2021-2-5-9.
9. Self-learning growth simulator for modelling forest stand dynamics in changing conditions / T. Pukkala, J. Vauhkonen, K. T. Korhonen, et al. // *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2021. Vol. 94. No. 3. P. 333–346. doi: 10.1093/forestry/cpab008.
10. Forest stand and canopy development unaltered by 12 years of CO₂ enrichment / R. J. Norby, J. M. Warren, C. M. Iversen, et al. // *Tree Physiology*. 2022. Vol. 42. No. 3. P. 428–440. doi: 10.1093/treephys/tpab107.
11. Hiura T., Go S., Iijima H. Long-term forest dynamics in response to climate change in northern mixed forests in Japan: A 38-year individual-based approach // *Forest Ecology and Management*. 2019. Vol. 449. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112719304785> (дата обращения: 25.01.2023). doi: 10.1016/j.foreco.2019.117469.
12. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии. Нормативно-справочные материалы / А. З. Швиденко, Д. Г. Щепаченко, С. Нильсон и др. М.: Федеральное агентство лесного хозяйства, 2008. 886 с.
13. Тюрин А. В. Исследование хода роста нормальных сосновых насаждение Архангельской губернии // *Тр. по лесн. опытному делу в России*. СПб., 1913. Вып. 45. 135 с.
14. Милованович Д. А. Таблицы объемов, сбег и опытные таблицы хода роста условно VI и V бонитетов сосны Печорского края // *Лесоведение и лесоводство. Приложение № 1 журнала «Лесное хозяйство, Лесопромышленность и Топливо»*. 1927. Вып. 4. С. 125–146.

Поступила в редакцию 12.03.2023

После доработки 04.07.2023

Принята к публикации 18.07.2023

Зоотехния и ветеринария

УДК 619:575:001.608.1:636

DOI: 10.31857/S2500262723040105, EDN: JYGBPU

ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЛЛЕЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ПОЛИМОРФИЗМА ЭКЗОНА 2 ГЕНА *BoLA-DRB3* С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЦР-ПДРФ***Н.А. Безбородова**, кандидат ветеринарных наук, **М.В. Бытов**, **Н.А. Мартынов**, **О.В. Соколова**, доктор ветеринарных наук, **М.В. Петропавловский**, доктор ветеринарных наук, **С.В. Вольская**

Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр
 Уральского отделения Российской академии наук,
 620142, Екатеринбург, ул. Белинского, 112а
 E-mail: n-bezborodova@mail.ru

BoLA-DRB3 – часть главного комплекса гистосовместимости, который имеет более 100 полиморфных сайтов в экзоне 2. Этот ген связан с иммунологическими признаками, устойчивостью или восприимчивостью к различным заболеваниям, а также ассоциирован с продуктивными признаками крупного рогатого скота. Цель исследований – первичная оценка аллельного полиморфизма экзона 2 гена *BoLA-DRB3* в Уральском регионе с использованием вложенной ПЦР и ПЦР-ПДРФ. Объект исследований – животные голштинской породы крупного рогатого скота ($n=55$). Длины рестрикционных фрагментов определяли с использованием электрофореза в пластинке агарозного геля. В результате генотипирования по *BoLA-DRB3.2* определены наиболее распространённые генотипы: $*23/*24$, $*24/*24$, $*16/*16$, $*24/*28$, $*9/*38$ с частотой распространения от 8,9 % до 26,5 %; генотипы с меньшей частотой распространения – $*24/*38$, $*24/*9$, $*2/*37$, $*16/*26$. В исследованной выборке большинство аллелей ($*2$, $*9$, $*26$, $*37$, $*38$) были нейтральными. В исследованной популяции генотипом, ассоциированным с восприимчивостью к вирусу лейкоза, обладали 56 % особей, с устойчивостью – 29 %, нейтральным – 15 %. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о необходимости генетического скрининга популяций крупного рогатого скота по полиморфизму *BoLA-DRB3*, особенно в эпизоотологически неблагополучных регионах по заболеваемости лейкозом. Полученные данные могут быть использованы в разведении племенного поголовья на основе селекции для наполнения стад сельскохозяйственных животных аллелями устойчивости к этом инфекционному агенту.

EVALUATION OF ALLELIC FREQUENCIES DISTRIBUTION OF THE *BoLA-DRB3* GENE POLYMORPHISMS WITHIN EXON 2 USING PCR-RFLP**N.A. Bezborodova, M.V. Bytov, N.A. Martynov, O.V. Sokolova, M.V. Petropavlovsky, S.V. Volskaya**

Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre,
 Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
 620142, Ekaterinburg, ul. Belinskogo, 112a
 E-mail: n-bezborodova@mail.ru

BoLA-DRB3 is part of the major histocompatibility complex, which has more than 100 polymorphic sites in exon 2. This gene is associated with immunological traits, resistance or susceptibility to various diseases and productive traits and milk quality in cattle. The aim of our paper was to conduct a primary assessment of the allelic polymorphism of exon 2 of the *BoLA-DRB3* gene in the Ural region using nested PCR and PCR-RFLP. The object of research were Holstein cattle ($n=55$). Restriction fragment lengths were determined using electrophoresis in an agarose gel. For the *BoLA-DRB3.2* gene the most common genotypes were identified: $*23/*24$, $*24/*24$, $*16/*16$, $*24/*28$, $*9/*38$ with a prevalence from 8.9 % to 26.5 %; genotypes with a lower distribution frequency – $*24/*38$, $*24/*9$, $*2/*37$, $*16/*26$. In studied samples the majority of identified alleles ($*2$, $*9$, $*26$, $*37$, $*38$) were previously proven to be neutral. The results of genotyping of Holstein cattle according to the polymorphism of the *BoLA-DRB3.2* gene were obtained: in the studied population, 56 % of individuals had a genotype associated with susceptibility to the leukemia virus, 29 % associated with resistance and 15 % had neutral genotype. Based on the obtained results, it can be concluded that there is a need for genetic screening of cattle populations for the *BoLA-DRB3* polymorphism, especially in epidemiologically disadvantaged regions for the incidence of leukemia. The obtained data on the genotypes of animals will be used in breeding programs to saturate herds of farm animals with alleles of resistance to the bovine leukemia virus.

Ключевые слова: *BoLA-DRB3*; генетические маркеры; ПЦР-ПДРФ; лейкоз; крупный рогатый скот; маркер-ориентированная селекция; ДНК.

Key words: *BoLA-DRB3*; genetic markers; PCR-RFLP; leukemia; cattle; marker-associated selection; DNA.

В современных условиях цель селекционной работы в молочном скотоводстве – увеличение продуктивности сельскохозяйственных животных, что зачастую приводит к повышению интенсивности обменных процессов у коров, метаболическим нарушениям и снижению устойчивости к различным заболеваниям [1, 2, 3].

Одно из наиболее распространенных инфекционных

заболеваний крупного рогатого скота – энзоотический лейкоз (EBL), вызываемый РНК-содержащим вирусом семейства Retroviridae рода Deltaretrovirus [4]. На сегодняшний день имеются исследования, указывающие на значительную иммунную дисфункцию у животных, находящихся как на начальных, так и на заключительных стадиях течения лейкозного процесса [5, 6].

* работа выполнена в рамках Государственного задания Минобрнауки России № 0532–2022–0001 «Разработка технологии для маркер-ориентированной селекции крупного рогатого скота по генам, ассоциированным с устойчивостью к заболеваниям».

Распространение заболевания внутри стада приводит к экономическим потерям, связанным с сокращением объемов производства продукции, увеличением выбраковки животных, снижением репродуктивной функции у инфицированных вирусом лейкоза животных [7, 8], уменьшением эффективности вакцинопрофилактики, увеличением частоты возникновения маститов и других инфекционных и незаразных патологий [9]. Одновременно происходит снижение качества молочной и мясной продукции, получаемой от инфицированных животных. Кроме того, в научной среде ведется дискуссия о том, что лейкоз крупного рогатого скота служит дополнительным фактором риска развития неопластических изменений у человека [10, 11].

Установлено, что интенсивность провирусной нагрузки лейкоза крупного рогатого скота (bovine leukemia virus, BLV) различается в зависимости от генетической устойчивости животных к инфекционным заболеваниям и в том числе связана с разными вариантами полиморфизма в главном комплексе гистосовместимости (МНС) крупного рогатого скота. МНС крупного рогатого скота – бычий лейкоцитарный антиген (bovine leukocyte antigen, BoLA) локализован на 23 хромосоме и включает три гена *DRB* класса II. Единственным функционально активным из них – *BoLA-DRB3*. Полиморфизм этого гена связан с иммунологическими признаками, степенью восприимчивости и устойчивости к различным заболеваниям (лейкоз крупного рогатого скота, мастит, дерматофитоз), а также отвечает за продуктивные признаки [12, 13]. Известно, что второй экзон *BoLA-DRB3* имеет более 100 полиморфных сайтов.

Цель исследования – оценка распространения аллельных вариантов полиморфизма 2 экзона гена *BoLA-DRB3*, ассоциированного с уровнем восприимчивости и резистентностью к BLV в популяции голштинского крупного рогатого скота Урала.

Методика. Объектом исследований были животные голштинской породы крупного рогатого скота ($n=55$). Отбор крови осуществляли из хвостовой вены. Проведение исследований было одобрено Комитетом по институциональной этике ФГБУН «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (протокол № 497 от 20 декабря 2022 г.). Выделение ДНК из цельной крови животных проводили с использованием «Diatom DNA Prep 200» (ООО «ИзоГен», Россия). Анализ комбинаций аллелей гена *BoLA-DRB3.2* у животных осуществляли в соответствии с модифицированным протоколом, предложенным в 2020 г. Morales J. P. A. с соавторами [13]. Для типирования особей крупного рогатого скота по гену *BoLA-DRB3* применяли метод вложенной ПЦР с использованием соответствующих праймеров (см. табл.). Конечный ампликон составлял 284 п.н. фрагмента экзона 2 гена *BoLA-DRB3*.

Последовательность праймеров гена *BoLA-DRB3.2*

Этапы ПЦР	Праймеры
1 этап ПЦР	HL030: 5'-TCCTCTCTCTGCAGCACATTTCC-3' HL031: 5'-ATTCGCGCTCACCTCGCCGCT-3'
2 этап ПЦР	HL030: 5'-TCCTCTCTCTGCAGCACATTTCC-3' HL032: 5'-TCGCCGCTGCACAGTGAACTCTC-3'

В состав реакционной смеси для 1 этапа ПЦР входили SE-буфер производства SibEnzyme (60 мМ Трис-HCl (pH 8,6), 25 мМ KCl, 10 мМ 2-меркаптоэтанол, 0,1 % Тритон X-100); 0,18 мМ каждого dNTP, по 0,35 мкМ праймеров HL030 и HL031; 1,7 мМ MgCl₂; 0,31 ед. Taq-полимеразы (SibEnzyme); 20...80 нг ДНК. Амплификацию проводили с использованием термоциклера

SimpliAmp (Thermo Fisher Scientific, США) по следующей программе: начальная денатурация при 95 °C в течение 5 мин, затем 10 циклов денатурации при 94 °C – 40 с, отжиг при 60 °C – 40 с, элонгация при 72 °C – 40 с, заключительная элонгация при 72 °C в течение 10 мин.

В состав реакционной смеси для 2 этапа ПЦР входили SE-буфер производства SibEnzyme (60 мМ Трис-HCl (pH 8,6), 25 мМ KCl, 10 мМ 2-меркаптоэтанол, 0,1 % Тритон X-100); 0,18 мМ каждого dNTP, по 0,35 мкМ праймеров HL030 и HL032; 1,7 мМ MgCl₂; 0,31 ед. Taq-полимеразы (SibEnzyme); 1 мкл ПЦР-смеси после первого раунда. Амплификацию проводили по следующему температурному протоколу: начальная денатурация 95 °C – 5 мин., далее 24 цикла денатурации при 94 °C – 20 с, отжиг при 65 °C – 20 с, синтез при 72 °C – 20 с, окончательная элонгация при 72 °C в течение 10 мин.

Рестрикцию осуществляли с использованием *RsaI*, *BstYI* и *HaeIII* (производство SibEnzyme) в конечном объеме 15 мкл отдельно для каждой эндонуклеазы. Реакционная смесь содержала 10 мкл продукта второго раунда вложенной ПЦР, 5 е.а. фермента и 2 мкл ферментного буфера. Реакции с *RsaI* и *HaeIII* инкубировали при 37 °C, а с *BstYI* – при 60 °C около 12 ч с дальнейшей визуализацией в 5 %-ном агарозном геле с использованием E-Gel Imager и ПО Gel Quant Express. Интерпретацию результатов рестрикции проводили по 42 вариантам полиморфизма длин рестрикции в соответствии с методикой, предложенной Gelhaus A. [14] и van Ejik M. J. T. [15].

Частоту встречаемости генотипов по генам *BoLA-DRB3.2* определяли по формуле (1):

$$p = (n/N) \cdot 100 \quad (1)$$

где p – частота генотипов в процентах; n – количество особей, имеющих определенный генотип; N – общее число обследованных животных.

На основании полученных данных проводили анализ частот распространения аллелей, для которого использовали программное обеспечение Microsoft Office Excel 2010.

Результаты и обсуждение. Несмотря на стремительное развитие технологий секвенирования, ПЦР и ее различные модификации по-прежнему остаются актуальными методами исследований в виду своей доступности и простоты. В результате анализ полученных длин рестрикционных фрагментов, было отмечено разнообразие полиморфизма гена *BoLA-DRB3.2* (рис. 1). Сравнение результатов, полученных с использованием эндонуклеаз, позволило идентифицировать участки рестрикции с 42 известными аллелями гена *BoLA-DRB3*.

Полученные результаты генотипирования голштинизированного скота по полиморфизму гена *BoLA-DRB3.2* свидетельствуют о наибольшем распространении (с частотой от 8,9 % до 26,5 %) генотипов *23/*24, *24/*24, *16/*16, *24/*28, *9/*38; и меньшем 11,76 (5,89 %) – генотипов *24/*38, *24/*9, *2/*37, *16/*26 (рис. 2). Определение генотипа единичных проб оказалось затруднительным, поскольку разрешающая способность агарозного геля для электрофореза ограничена в отношении коротких длин рестрикционных фрагментов (менее 50 п.н.).

В исследованной выборке большинство аллелей (*2, *9, *26, *37, *38) были нейтральными. Они обычно не связаны ни с устойчивостью, ни с чувствительностью к ВЛ КРС [16]. Были обнаружены аллели *23, *24 и *28, которые ассоциированы с устойчивостью к BLV и аллель *16 – с восприимчивостью к вирусу лейкоза

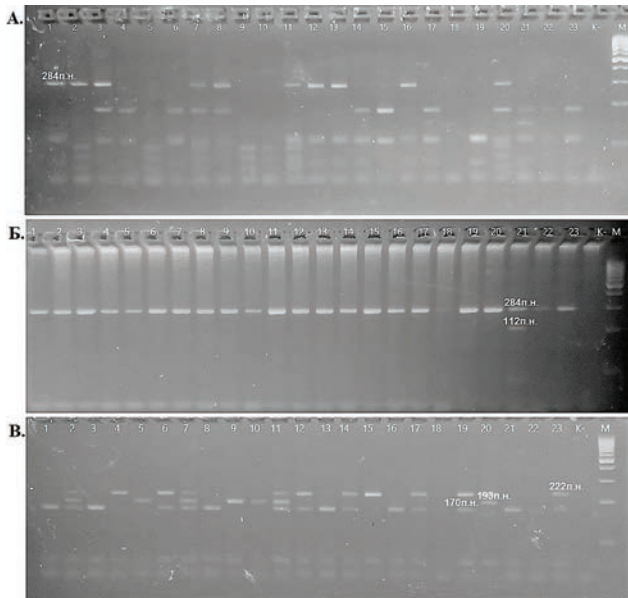


Рис. 1. Электрофореграмма длин фрагментов гена *BoLA-DRB3.2* после обработки ампликонов:
 а) эндонуклеазой рестрикции *RSAl*; б) эндонуклеазой рестрикции *BSTYI*; в) эндонуклеазой рестрикции *HAЕIII*;
 1...23 – номера проб, К – отрицательный контроль, М – размерный стандарт с шагом 100 п.н.

[12, 17], при этом по результатам ряда исследований аллель *24 связан с чувствительностью [18].

Ранее было установлено, что *BoLA-DRB3* как ДНК-маркер играет основную роль в определении разнообразия устойчивости к инфицированию BLV различных особей [17, 19, 20]. Однако достоверная идентификация аллельных вариантов по группам представляет собой отдельную задачу, для решения которой исследователи прибегают к разным методам диагностики лейкоза крупного рогатого скота.

Чаще всего животных делят на разные экспериментальные группы в зависимости от стадии протекания инфекционного процесса (бессимптомные, с персистирующим лимфоцитозом, с лимфомой и др.), в соответствии с которыми осуществляют идентификацию аллельных вариантов по группам: нейтральные, ассоциированные с резистентностью, ассоциированные с восприимчивостью. В зависимости от методов (серологические, молекулярно-генетические, гистологические), используемых для разделения животных по экспериментальным группам, определяются разные стадии течения инфекционного процесса. Так, японские учёные для диагностики заражения вирусом лейкоза использовали ИФА, идентифицировали субклиническую и клиническую стадии течения заболевания по количе-



Рис. 2. Частота встречаемости генотипов полиморфизмов гена *BoLA-DRB3.2*:
 ■ – ассоциированы с восприимчивостью, ▨ – ассоциированы с устойчивостью, □ – нейтральные.

ству лимфоцитов в мазках крови, выявили лимфомы гематологическими методами, использовали количественную ПЦР с праймерами BLV-CoCoMo-qPCR-2 для определения провирусной нагрузки (PVL) [17, 21].

Проведение комплексных исследований в отношении BLV позволяет более подробно изучить не только особенности протекания инфекционного процесса, но и достоверно ассоциировать аллели и генотипы животных с восприимчивостью или резистентностью к BLV. Обозначенная проблема определения одного аллельного варианта к разным группам устойчивости также встречается при изучении межпородных различий генотипов, детерминирующих протекание инфекционного процесса [22]. Так, в работе Lo. с соавторами [23] исследованы коровы голштинской породы, и аллель DRB3*009:02 была обозначена как ассоциированная с низкой провирусной нагрузкой, а аллель DRB3*012:01 – с высокой.

Результаты исследований свидетельствуют, что у гетерозиготных по полиморфизмам в *BoLA-DRB3* особей риск развития лимфомы значительно ниже, чем у гомозигот. Считается, что это обусловлено распознаванием более разнообразного репертуара антигенов. Кроме того, один из возможных механизмов более выраженной устойчивости гетерозигот – функциональное доминирование аллелей устойчивости над аллелями восприимчивости [21].

Выводы. В результате исследований выполнена первичная оценка аллельного полиморфизма экзона 2 гена *BoLA-DRB3* на основе ПЦР-ПДРФ при генотипировании крупного рогатого скота по ценному генетическому маркеру. В исследованной популяции генотипом, ассоциированным с восприимчивостью к вирусу лейкоза, обладали 56 % особей, с устойчивостью – 29 %, нейтральным генотипом – 15 %. Исходя из полученных результатов в современных условиях целесообразно проводить генетический скрининг популяций крупного рогатого скота по полиморфизму *BoLA-DRB3*, особенно в эпизоотологически неблагополучных регионах по заболеваемости лейкозом.

Литература.

1. Характеристика быков-производителей с комплексными генотипами генов *BLG* и *INOS* по молочной продуктивности женских предков / Х. Х. Гильманов, С. В. Тюлькин, И. В. Ржанова и др. // Ученые записки казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2020. Т. 241. № 1. С. 71-75. doi: 10.31588/2413-4201-1883-241-1-71-76.
2. Метаболические заболевания крупного рогатого скота / В. А. Мищенко, А. В. Мищенко, Р. В. Яшин и др. // Ветеринария сегодня. 2021. Т. 10. № 3. С. 184-189. doi: 10.29326/2304-196X-2021-3-38-184-189.
3. Review: Genetic selection of high-yielding dairy cattle toward sustainable farming systems in a rapidly changing world / L. F. Brito, N. Bedere, F. Douhard, et al. // Animal. 2021. Vol. 15. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175173112100135X?via%3Dihub> (дата обращения: 10.02.2022). doi: 10.1016/j.animal.2021.100292.
4. Detection and immunobiological characterization of bovine leukemia virus in Russian Federation territory in dependence on geographical variations / M. V. Petropavlovskiy, I. M. Donnik, N. A. Bezborodova, et al. // Journal of Integrated OMICS. 2019. Vol. 9. No. 1. URL: <https://www.jiomics.com/index.php/jiomics/article/view/157> (дата обращения: 10.02.2022) doi: 10.5584/jiomics.v9i1.255.

5. Early events following bovine leukaemia virus infection in calves with different alleles of the major histocompatibility complex DRB3 gene / A. Forletti, C. M. Lützelshwab, R. Cepeda, et al. // *Veterinary Research*. 2020. Vol. 51. No. 1. URL: <https://veterinaryresearch.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13567-019-0732-1> (дата обращения: 10.02.2022). doi: 10.1186/s13567-019-0732-1.
6. Frie M. C., Coussens P. M. Bovine leukemia virus: A major silent threat to proper immune responses in cattle // *Veterinary Immunology and Immunopathology*. 2015. Vol. 163. No. 3. P. 103-114. doi: 10.1016/j.vetimm.2014.11.014.
7. Bovine leukemia virus and cow longevity in Michigan dairy herds / P. C. Bartlett, B. Norby, T. M. Byrem et al. // *Journal of Dairy Science*. 2013. Vol. 96 No. 3. P. 1591-1597. doi: 10.3168/jds.2012-5930.
8. Lifetime effects of infection with bovine leukemia virus on longevity and milk production of dairy cows / O. Nekouei, J. Vanleeuwen, H. Stryhn, et al. // *Preventive Veterinary Medicine*. 2016. Vol. 133. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27720022/> (дата обращения: 10.02.2022). doi: 10.1016/j.prevetmed.2016.09.011.
9. Emanuelson U., Scherling K., Pettersson H. Relationships between herd bovine leukemia virus infection status and reproduction, disease incidence, and productivity in Swedish dairy herds // *Preventive Veterinary Medicine*. 1992. Vol. 12. No. 1. P. 121-131. doi: 10.1016/0167-5877(92)90075-Q.
10. Bovine leukemia virus discovered in human blood / G. C. Buehring, A. Delaney, H. Shen, et al. // *BMC Infectious Diseases*. 2019. Vol. 19. No. 1. URL: <https://bmcinfectdis.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12879-019-3891-9> (дата обращения: 10.02.2022). doi: 10.1186/s12879-019-3891-9.
11. No evidence of bovine leukemia virus proviral DNA and antibodies in human specimens from Japan / M. P. Yamanaka, S. Saito, Y. Hara, et al. // *Retrovirology*. 2022. Vol. 19. No. 1. URL: <https://retrovirology.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12977-022-00592-6> (дата обращения: 10.02.2022). doi: 10.1186/s12977-022-00592-6.
12. Relationship between allelic heterozygosity in BoLA-DRB3 and proviral loads in bovine leukemia virus-infected cattle / H. E. Daous, S. Mitoma, E. Elhanafy, et al. // *Animals*. 2021. Vol. 11. No. 3. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/11/3/647> (дата обращения: 10.02.2022). doi: 10.3390/ani11030647.
13. Morales J., Lopez-Herrera A., Zuluaga J. Association of BoLA DRB3 gene polymorphisms with BoHV-1 infection and zootechnical traits // *Open Veterinary Journal*. 2020. Vol. 10. No. 3. P. 331-339. doi: 10.4314/ovj.v10i3.12.
14. Sequence and PCR-RFLP analysis of 14 novel BoLA-DRB3 alleles / A. Gelhaus, L. Schnittger, D. Mehlitz, et al. // *Animal Genetics*. 1995. Vol. 26. No. 3. P. 147-153. doi: 10.1111/j.1365-2052.1995.tb03154.x.
15. van Eijk M. J. T., Stewart-Haynes J. A., Lewin H. A. Extensive polymorphism of the BoLA-DRB3 gene distinguished by PCR-RFLP // *Animal Genetics*. 1992. Vol. 23. No. 6. P. 483-496. doi: 10.1111/j.1365-2052.1992.tb00168.x.
16. Polymorphism in BoLA-DRB3 exon 2 correlates with resistance to persistent lymphocytosis caused by bovine leukemia virus / A. Xu, M. J. van Eijk, C. Park, et al. // *The Journal of Immunology*. 1993. Vol. 151. No. 12. P. 6977-6985. doi: 10.4049/jimmunol.151.12.6977.
17. Takeshima S. N., Ohno A., Aida Y. Bovine leukemia virus proviral load is more strongly associated with bovine major histocompatibility complex class II DRB3 polymorphism than with DQA1 polymorphism in Holstein cow in Japan // *Retrovirology*. 2019. Vol. 16. No. 1. URL: <https://retrovirology.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12977-019-0476-z> (дата обращения: 10.02.2022). doi: 10.1186/s12977-019-0476-z.
18. Связь генотипов BoLA-DRB3 с племенной ценностью по показателям молочной продуктивности в российской популяции молочного скота / А. А. Сермягин, Н. В. Ковалюк, А. Н. Ермилов и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2016. Т. 51. № 6. С. 775-781. doi: 10.15389/agrobiol.2016.6.775rus.
19. Association of BLV infection profiles with alleles of the BoLA-DRB3.2 gene / M. A. Juliarena, M. Poli, L. Sala, et al. // *Animal Genetics*. 2008. Vol. 39. No. 4. P. 432-438. doi: 10.1111/j.1365-2052.2008.01750.x.
20. Identification of bovine leukocyte antigen class II haplotypes associated with variations in bovine leukemia virus proviral load in Japanese Black cattle / T. Miyasaka, S. N. Takeshima, M. Jimba, et al. // *Tissue Antigens*. 2013. Vol. 81. No. 2. P. 72-82. doi: 10.1111/tan.12041.
21. Bovine major histocompatibility complex (BoLA) heterozygote advantage against the outcome of bovine leukemia virus infection / C. W. Lo, S. N. Takeshima, S. Wada, et al. // *HLA*. 2021. Vol. 98. No. 2. P. 132-139. doi: 10.1111/tan.14285.
22. Приоритизация генов, ассоциированных с патогенозом лейкоза у крупного рогатого скота / Н. С. Юдин, Н. Л. Подкольный, Т. А. Азаркова и др. // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018. Т. 22 № 8. С. 1063-1069. doi: 10.18699/VJ18.451.
23. BoLA-DRB3 polymorphism is associated with differential susceptibility to bovine leukemia virus-induced lymphoma and proviral load / C. W. Lo, L. Borjigin, S. Saito, et al. // *Viruses*. 2020. Vol. 12. No. 3. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4915/12/3/352> (дата обращения: 10.02.2022). doi: 10.3390/v12030352.

Поступила в редакцию 27.02.2023
После доработки 25.04.2023
Принята к публикации 15.07.2023

ВЛИЯНИЕ ГОЛШТИНИЗАЦИИ НА ПРОДУКТИВНОЕ ДОЛГОЛЕТИЕ КОРОВ ЧЕРНО-ПЕСТРОЙ ПОРОДЫ В УСЛОВИЯХ СМОЛЕНСКОЙ ОБЛАСТИ***О. В. Татуева, Д. Н. Кольцов, кандидат сельскохозяйственных наук**

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

Исследования проводили с целью изучения аспектов продуктивного долголетия голштинизированных коров черно-пестрой породы. Объект исследований – коровы черно-пестрой породы и их помеси с быками голштинской породы в количестве 9270 голов, завершившие цикл производственного использования, и по разным причинам выбывшие из стада в период 1990–2020 гг. Работу выполняли с использованием метода группировок на базе племенных хозяйств Смоленской области. Рассчитывали фенотипические корреляции между изучаемыми признаками продуктивности. Результатом голштинизации черно-пестрой породы в условиях Смоленской области стало ее активное поглощение через быков-производителей голштинской породы до кровности 90,0 % и более. Выявлена закономерность – чем выше кровность по голштинской породе, тем ниже продолжительность жизни коров. Разница в продолжительности жизни у коров с кровностью по голштинской породе 17,6 % и 87,1 % составила 4,36 лактации. Длительность продуктивной жизни коров может достигать 12...13 лактаций, при этом 50,9 % животных выбывает в период между 2 и 4 лактациями. С возрастом у коров меняется соотношение дойных и недойных дней, и чем продолжительнее срок использования, тем большее дойных дней приходится в среднем на каждый год жизни. Основная часть животных лактирует в пределах соотношения дойных дней к дням жизни от 50,1 до 75,0 % и имеет продолжительность жизни 4,3 лактации. Уровень пожизненного удоя в основном варьирует от 10 тыс. кг до 30 тыс. кг (56,7 % от исследуемого поголовья). В качестве индикатора продуктивного долголетия коров целесообразно использовать показатель удоя на 1 день жизни, что обусловлено его высокими положительными взаимосвязями ($r=0,44...0,90$) с возрастными и продуктивными признаками. Инвентаризация черно-пестрой породы в условиях Смоленской области показала целесообразность ее замены на голштинскую с дальнейшим чистопородным разведением.

THE EFFECT OF HOLSTEIN ON THE PRODUCTIVE LONGEVITY OF COWS' BLACK-AND-WHITE BREED IN THE CONDITIONS OF THE SMOLENSK REGION**O. V. Tatueva, D. N. Koltsov**

Federal Research Center for Bast Fiber Crops,
170041, Tver, Komsomolsky prosp., 17/56
E-mail: oksana.tatueva@yandex.ru

The aspects of productive longevity of crossbreeds of Black-and-White cows with Holstein were study in the amount of 9270 heads that completed the cycle of production use, and for various reasons culling of the herds in the period 1990–2020. The research was carried out using the method of groupings based on pedigree farms of the Smolensk region. Phenotypic correlations between the studied economic traits are calculated. As a result of crossing with the Holstein breed, there was an active taking of the Black-and-White breed by it through breeding bulls to 90,0 % and higher a blood relationship in the conditions of the Smolensk region. A regularity has been revealed – the higher the blood relationship to the Holstein breed, the lower the lifetime of cows. The difference in lifetime of cows with blood relationship by the Holstein breed from 17,6 % to 87,1 % was 4,36 lactation. The duration of productive life of cows come to 12–13 lactation, 50,9 % of animals culling between 2 and 4 lactations. With age, the ratio of milk and dry days changes in animals, and the longer the period of use, the greater the number of milk days on average for each year of a cow's life. The main part of the animals' lactates within the ratio of milking days to days of life from 50,1 to 75,0 %. The level of lifetime milk yield in cows is mainly presented in gradations from 10 thousand kg to 30 thousand. kg (56,7 % of the studied cattle number). As an detector of productive longevity of cows, it is important to use the milk yield indicator for one day of life, due to the high positive relationships ($r=0,44-0,90$) with age and economic traits. The inventory of the Black-and-White breed in the conditions of the Smolensk region showed the indicate of its replacement with the Holstein, and further breeding of these animals will be purebred with the participation of only the Holstein breed. Привести в соответствие с доработанным русскоязычным вариантом.

Ключевые слова: черно-пестрая порода, голштинизация, пожизненный удой, удой на 1 день жизни.

Key words: Black-and-White breed, crossing with the Holstein breed, lifetime milk yield, milk yield for one day of life.

Совершенствование продуктивных качеств отечественных пород крупного рогатого скота, особенно молочного, в нашей стране осуществляется с широким использованием генофонда импортных пород с конца 70-х гг. прошлого века [1]. Целенаправленная племенная работа с системой селекционных и организационных мер по созданию оптимальных условий для реализации

потенциала генотипов в хозяйствах с высококачественным поголовьем имеет огромное значение. Поэтому использованием мировых ресурсов лучшей по молочной продуктивности голштинской породы оправдано [2]. В молочном скотоводстве для ускоренного повышения генетического потенциала отечественных пород в хозяйствах России, в том числе в Смоленской области,

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания Федерального научного центра лубяных культур (№ FGSS- 2019-0012).

используют голштинскую породу как самую обильно-молочную и хорошо отселекционированную по типу телосложения и пригодности к машинному доению. Голштинский скот США и Канады по продуктивности молока, выходу молочного жира и белка, оплате корма, приспособленности к промышленной технологии, лучший из всех молочных пород [3].

Черно-пестрая порода крупного рогатого скота – одна из лидирующих по численности популяций России, второе место (36,3 % от всего подконтрольного поголовья) занимает голштинская порода, на долю которой в 1999 г. приходилось менее 1,0 % коров [4]. А суммарная их относительная численность по итогам 2020 г. составляла около 77,3 % [5].

В последние годы в системе породообразования Российской Федерации наметилась тенденция к сокращению доли черно-пестрого скота. Начиная с 70-х гг. прошлого столетия в стране проводится голштинизация различных пород молочного и комбинированного направления продуктивности с использованием метода поглотительного скрещивания, которая продолжается до сих пор. Результатом становится поглощение черно-пестрой породы голштинской до 95,0 % кровности и выше, что приводит к переходу ряда стад в голштинскую породу. Например, на территории Урала наиболее массовая породная группа молочного скота – голштинизированный черно-пестрый [6]. В Смоленской области на сегодняшний день разводят 6 пород крупного рогатого скота молочного и комбинированного направления продуктивности. При этом доля черно-пестрого голштинизированного и голштинского скота составляет 47,7 % от общего числа животных.

Совершенствование коров черно-пестрой породы путем скрещивания с быками голштинской породы западноевропейской и североамериканской селекции, позволило получить селекционные группы животных с высокими показателями удоя, массовой доли жира и белка [7]. Вместе с интенсификацией молочного скотоводства это привело к значительному повышению удоя коров во многих регионах. Однако сократился срок их продуктивного долголетия [8, 9], который, например, в США составляет 2,8 лактации [10].

Так, в условиях Республики Коми коровы с долей кровности более 75 % по голштинской породе превосходят чистопородный холмогорский скот по показателям молочной продуктивности за 1-ю лактацию на 40,3 %, а за 3-ю – на 52,8 %. Однако повышение молочности за лактацию не приводит к увеличению пожизненного производства молока, что обусловлено снижением продолжительности хозяйственного использования. У коров с долей кровности по голштинам более 75 % средний возраст выбытия составляет 2,40 отела, что в 1,5 раза меньше, чем у чистопородных животных [11]. Интенсивное использование голштинизированного скота в Ярославской области приводит к ранней выбраковке коров в возрасте 3,07 отела и снижению среднего возраста стад до 2,43 отела [12]. На сегодняшний день возраст коров в среднем по черно-пестрой породе в Российской

Федерации составляет 2,52 отела, возраст выбытия – 3,30 отела, в Смоленской области соответственно 2,53 и 2,69 отелов [13].

Проблема увеличения сроков использования сельскохозяйственных животных волновала как основоположников советской зоотехнической науки, так и современных авторов [14]. Особенно значимой она стала в последние годы, так как тенденция снижения использования маточного поголовья сохраняется не только в зарубежных популяциях [15], но и в ведущих племенных хозяйствах страны [16]. На важность повышения длительности использования высокопродуктивных коров еще в прошлом веке обращал пристальное внимание выдающийся селекционер Штейман С. И., считавший, что это позволит, увеличивать количество выдающегося племенного материала, и будет способствовать снижению себестоимости продукции в целом [17].

Поэтому изучение и выявление факторов, способствующих как повышению, так и снижению продуктивного долголетия коров черно-пестрой породы в условиях Смоленской области актуально в практическом применении.

Цель исследований – изучить аспекты продуктивного долголетия голштинизированных коров черно-пестрой породы, полученных при поглотительном скрещивании черно-пестрой породы с использованием в качестве улучшающей породы быков-производителей голштинской породы черно-пестрой масти в условиях Смоленской области.



Рис. 1. Изменение доли кровности и возраста лактаций у коров в зависимости от периода разведения: □ – доля кровности, %; —●— продолжительность жизни, лактаций.

Для ее достижения решали следующие задачи: выявить характер влияния голштинизации на срок продуктивного использования коров черно-пестрой породы, их пожизненную продуктивность, удой на 1 день продуктивной жизни, соотношение числа дойных дней к числу дней жизни и удой на 1 день жизни; установить взаимосвязи между изучаемыми признаками.

Методика. Условия Смоленской области характеризуются умеренно-континентальным климатом с теплым и влажным летом, умеренно-холодной зимой с устойчивым снежным покровом, хорошо подходящим для содержания крупного рогатого скота молочного направления

Табл. 1. Характеристика продуктивных качеств коров черно-пестрой породы в зависимости от периода разведения

Период разведения (годы)	Дойные дни	Дней жизни	Дойные дни/дни жизни, %	Удой, кг		
				пожизненный	на 1 день продуктивной жизни	на 1 день жизни
1989–1994	2340±76	3181±74	72,7±0,7	36895±1365	15,9±0,4	11,5±0,3
1995–2000	1411±20	2241±20	59,0±0,4	23466±362	16,6±0,1	9,8±0,1
2001–2005	1248±15	2044±16	57,1±0,3	24742±351	19,4±0,1	11,2±0,1
2006–2010	1228±12	2066±13	55,6±0,3	26532±298	21,4±0,1	11,9±0,1
2011–2015	780±8	1648±8	44,4±0,2	17709±181	22,6±0,1	10,0±0,1
2016 и старше	419±9***	1329±9***	30,9±0,5***	9481±211***	22,5±0,2***	7,0±0,1***

*** $p \leq 0,001$ (по сравнению с результатами за 1989–1994 гг.).

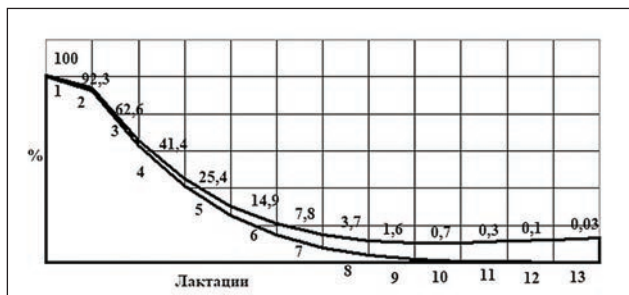


Рис. 2. Дожитие коров до следующей лактации (от 1 до 13), %.

продуктивности как в условиях привязного, так и беспривязного содержания. Средняя годовая температура воздуха варьирует в пределах 3,5...5,0 °С. Длительность периода с температурой ниже 0° составляет от 141 до 152 дней. Самый холодный месяц – январь (средняя температура –10 °С), самый теплый – июль (17...18 °С). По влагообеспеченности область относится к зоне достаточного увлажнения (ГТК=1,5...1,6). Сумма осадков за вегетационный период (май–сентябрь) составляет в среднем 332 мм, за год – 616 мм. Вегетационный период длится 170...180 дней с суммой положительных температур (2100...2200 °С), достаточной для созревания сельскохозяйственных культур умеренной зоны.

В хозяйствах используют круглогодичное стойловое привязное и беспривязное содержание с индивидуальным и групповым методами обслуживания. На сегодняшний день в регионе 3500 голов племенного скота черно-пестрой породы с удоем 6028...7820 кг за лактацию. В условиях Смоленской области оптимальной с точки зрения стабилизации продолжительности жизни коров голштинизированной черно-пестрой породы, можно считать кровность по голштинской породе на уровне 30...65 %. Продолжительность жизни должна составлять 6...10 лактаций, пожизненный удой – 30...50 тыс. кг, соотношение дойных дней к дням жизни – 50...75 %, удой на один день продуктивной жизни – 19...21 кг, на один день жизни – 14...17 кг.

Объект исследований – коровы черно-пестрой породы, полностью завершившие цикл производственного использования и по разным причинам выбывшие из стад в 1990–2020 гг., в количестве 9270 голов. Работу осуществляли в лаборатории зоотехнологий научного Центра лубяных культур и племенных хозяйств по разведению черно-пестрой породы в условиях Смоленской области по материалам зоотехнического учета из про-

граммы «Селэкс». Для изучения влияния голштинизации на продуктивное долголетие коров черно-пестрой породы был проведен текущий анализ с использованием метода группировки в зависимости от кровности по голштинской породе: по периоду разведения (с разницей между группами 5 лет – 6 групп), по количеству пройденных лактаций (от 1 до 13–13 групп), по уровню пожизненной продуктивности (с разницей между группами 10000 кг – 6 групп), по соотношению дойных дней к дням жизни (с разницей между группами 25 % – 4 группы). Между изучаемыми признаками продуктивности рассчитывали фенотипические корреляции. Полученные результаты обрабатывали методом вариационной статистики с использованием программы Excel.

Результаты и обсуждение. Средний возраст изучаемых животных составил 3,88 лактаций, лактационная деятельность коров – от 2 до 7 лактаций. Исходя из средних данных, рассчитанных по кровности в зависимости от периода разведения, её доля по голштинской породе у черно-пестрых коров за последние 30 лет увеличилась на 69,5 %. На сегодняшний день их основная часть представлена помесью с кровностью 90 % и более. При этом по мере ее повышения продолжительность жизни коров сокращалась. За изучаемый период она уменьшилась на 4,36 лактаций (рис. 1).

Эта тенденция подтвердилась при изучении возрастных и продуктивных качеств коров черно-пестрой породы в зависимости от периода разведения (табл. 1). Количество дойных дней уменьшилось на 1921,1 день, дней жизни – на 1852,0 дня, соотношение дойных дней к дням жизни – на 41,8 %, пожизненный удой – на 27414 кг, на 1 день жизни – на 4,5 кг. При этом удой на 1 день продуктивной жизни увеличился на 6,6 кг. Все изменения достоверны ($p \leq 0,001$).

Продолжительность продуктивной жизни черно-пестрого скота в условиях Смоленской области достигает 12...13 лактаций (рис. 2). Наибольшее количество животных выбывает в период между 2 и 3 лактациями (29,7 %), а также 3 и 4 лактациями (21,2 %).

Соотношение коров в зависимости от возраста лактаций показало, что законченные лактационные циклы с 1 по 5 имеют 85 % коров, более пяти лактаций живут 15 % животных, что значительно снижает их продуктивные качества и сказывается на результатах экономической деятельности хозяйствующих субъектов.

Анализ усредненных данных возрастных и продуктивных качеств коров в зависимости от продолжительности жизни (табл. 2) показывает значительное преимущество животных старше 6 лактации над коро-

Табл. 2. Характеристика возрастных и продуктивных качеств коров черно-пестрой породы в зависимости от продолжительности жизни

Возраст, лактаций	Дойные дни	Дни жизни	Дойные дни/дни жизни, %	Удой, кг		
				пожизненный	на 1 день продуктивной жизни	на 1 день жизни
1	452±7	1299±8	33,8±0,3	8327±127	19,1±0,2	6,3±0,1
2	537±4	1399±5	37,3±0,2	10999±83	21,1±0,2	7,7±0,1
3	920±6	1763±6	51,6±0,2	19029±128	20,9±0,1	10,7±0,1
4	1263±7	2090±7	59,9±0,2	26317±165	21,0±0,1	12,6±0,1
5	1586±9	2418±1	65,3±0,1	32373±229	20,6±0,1	13,4±0,1
1...5	891±5	1736±5	48,3±0,2	18278±109	20,8±0,1	9,9±0,1
6	1876±11	2699±11	69,3±0,2	38386±301	20,6±0,2	14,3±0,1
7	2236±15	3054±15	73,0±0,2	45494±457	20,5±0,2	14,9±0,1
8	2513±22	3329±23	75,3±0,2	50399±706	20,2±0,3	15,2±0,2
9	2857±39	3657±40	77,9±0,3	58935±1129	20,8±0,4	16,2±0,3
10	3088±45	3892±46	79,3±0,4	66602±1548	21,6±0,5	17,1±0,4
11	3505±71	4293±71	81,6±0,6	73405±2650	21,0±0,8	17,1±0,6
12	3792±104	4578±104	82,8±0,7	73333±3182	19,5±1,0	16,1±0,8
13	4184±125	4974±123	84,1±0,6	86803±9470	20,7±2,0	17,4±1,7
6...13	2190±13***	3008±13***	72,2±0,1***	44719±320***	20,6±0,1	14,8±0,1***

*** $p \leq 0,001$ (при сравнении результатов между группами по продолжительности жизни 6...13 и 1...5 лактаций).

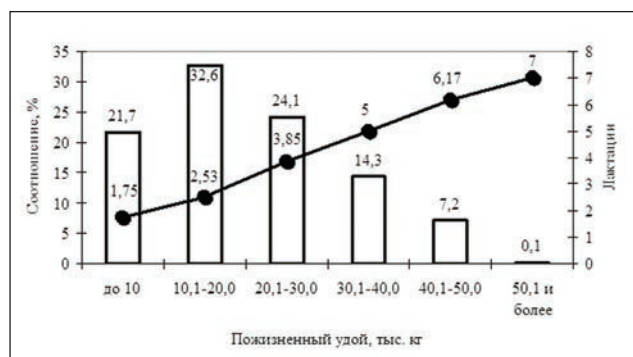
Табл. 3. Характеристика возрастных и продуктивных качеств коров черно-пестрой породы в зависимости от уровня пожизненной продуктивности

Уровень пожизненного удоя, кг	Дойные дни	Дней жизни	Дойные дни/дни жизни, %	Удой, кг	
				на 1 день продуктивной жизни	на 1 день жизни
до 10000	386±3	1252±4	30,6±0,2	20,0±0,1	5,9±0,1
10001...20000	755±4	1598±5	46,6±0,2	20,4±0,1	9,3±0,1
20001...30000	1235±6	2074±7	59,0±0,1	20,7±0,1	12,0±0,1
30001...40000	1652±10	2473±10	66,3±0,1	21,4±0,1	14,0±0,1
40001...50000	2033±13	2858±14	70,8±0,2	22,1±0,1	15,6±0,1
50001 и более	2460±298***	3334±31***	72,4±3***	30,7±1,0***	20,4±4,8**

** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$ (при сравнении результатов с группой с пожизненным удоем до 10,0 тыс. кг).

вами с продолжительностью жизни менее 6 лактаций: по количеству дойных дней – на 1299 дней, дней жизни – на 1272 дня, пожизненному удою – на 26441 кг, удою за 1 день жизни – на 4,9 кг. С возрастом у животных меняется соотношение дойных и недойных дней, и чем продолжительнее срок использования, тем большее число дойных дней приходится в среднем на каждый год жизни коровы. По нашим данным разница достигает 24 %. Все перечисленные различия достоверны ($p \leq 0,001$). При этом удой на 1 день продуктивной жизни менялся незначительно.

Уровень пожизненного удоя у коров черно-пестрой породы исследуемой популяции в основном варьирует от 10 тыс. кг до 30 тыс. кг – 56,7 % из общего числа животных (рис. 3). Следует отметить тенденцию к увеличению продолжительности жизни в зависимости от размеров пожизненного удоя.

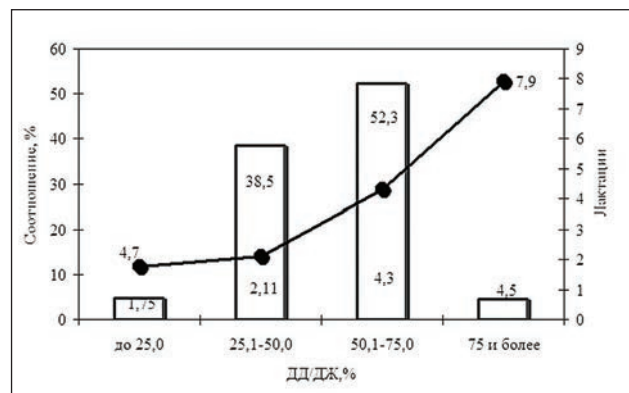
**Рис. 3. Соотношение коров в стадах и продолжительность жизни, в зависимости от пожизненного удоя:**

□ – соотношение, %; ● – продолжительность жизни, лактаций.

Аналогично с увеличением пожизненного удоя наблюдается повышение возрастных и продуктивных качеств (табл. 3). Между группами коров с продуктивностью до 10 тыс. кг и 50 тыс. кг и более отмечены достоверные ($p \leq 0,001$, $p \leq 0,01$) различия по количеству дойных дней – 2074 дня, дней жизни – 2082 дня, соотношению дойных дней к дням жизни – 41,8 %, удою на 1 день продуктивной жизни – 10,7 кг, на 1 день жизни – 14,5 кг.

Соотношение количества дойных дней к дням жизни коровы отражает, на сколько эффективно использует-

ся животное на протяжении лактации, продуктивной жизни, чем оно выше, тем выше эффективность. Кроме того, величина этого показателя зависит от продолжительности жизни, чем дольше продуцирует корова, тем выше соотношение. У основной части животных в нашем исследовании при продолжительности жизни 4,3 лактации оно находилось в пределах 50...75 % (рис. 4), что также подтверждает результаты анализа предыдущих градаций.

**Рис. 4. Соотношение коров в стадах и продолжительность жизни, в зависимости от соотношения дойных дней к дням жизни: □ – соотношение, %; ● – продолжительность жизни, лактаций.**

Тенденция повышения продолжительности жизни проявляется при увеличении соотношения дойных дней к дням жизни (табл. 4). Различия ($p \leq 0,001$, $p \leq 0,01$) между группами коров с соотношением дойных дней к дням жизни до 25 % и 75 % и более по количеству дойных дней, в пользу особей с большей величиной этого показателя, составляют 2453 дня, дней жизни – 2209 дней, пожизненному удою – 47348 кг, удою на 1 день жизни – 10,3 кг. В то же время величина удоя на 1 день продуктивной жизни, наоборот, снизилась на 2,8 кг ($p \leq 0,001$).

Высокие, положительные и достоверные фенотипические корреляции установлены (табл. 5) между величинами следующих показателей:

дойные дни с днями жизни ($r=0,98$), соотношением дойных дней к дням жизни ($r=0,92$), возрастом в лакта-

Табл. 4. Характеристика возрастных и продуктивных качеств коров черно-пестрой породы в зависимости от процентного соотношения между дойными днями и днями жизни

Дойные дни/дни жизни, %	Дойные дни	Дней жизни	Удой, кг		
			пожизненный	на 1 день продуктивной жизни	на 1 день жизни
до 25	293±2	1302±10	6608±68	22,5±0,2	5,1±0,1
25,1...50,0	556±3	1421±4	11688±75	21,0±0,1	8,0±0,1
50,1...75,0	1399±6	2215±6	28591±145	20,5±0,1	12,7±0,1
75,1 и более	2746±21***	3511±23***	53956±631***	19,7±0,2***	15,4±0,2***

* $p \leq 0,5$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$ (по сравнению с группой с соотношением до 25 %).

Табл. 5. Фенотипические корреляции молочной продуктивности коров черно-пестрой породы

Признак	Доля кровности, %	Дойные дни, всего	Дней жизни	Дойные дни/дни жизни, %	Возраст, лактаций	Удой, кг		
						пожизненный	на 1 день продуктивной жизни	на 1 день жизни
Период разведения	0,38*	-0,42	-0,39	-0,44	-0,31	-0,24	0,52**	-0,08
Дойные дни, всего			0,98***	0,92***	0,92***	0,93***	-0,11	0,74***
Дней жизни				0,86***	0,90***	0,92***	-0,09	0,70**
Дойные дни/дни жизни, %					0,82***	0,86***	-0,14	0,81***
Возраст, лактаций						0,89***	0,01	0,73**
Пожизненный удой							0,20*	0,90***
Удой на 1 день продуктивной жизни								0,44**

* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$.

циях ($r=0,92$), пожизненным удоем ($r=0,93$), удоем на 1 день жизни ($r=0,74$);

дни жизни с соотношением дойных дней к дням жизни ($r=0,86$), возрастом в лактациях ($r=0,90$), пожизненным удоем ($r=0,92$), удоем на 1 день жизни ($r=0,70$); соотношение дойных дней к дням жизни с возрастом в лактациях ($r=0,82$), пожизненным удоем ($r=0,86$), удоем на 1 день жизни ($r=0,81$);

возраст в лактациях с пожизненным удоем ($r=0,89$), удоем на 1 день жизни ($r=0,73$);

пожизненный удой с удоем на 1 день жизни ($r=0,90$).

Невысокие положительные, но достоверные величины фенотипической корреляции отмечены в следующих сочетаниях:

период разведения с долей кровности ($r=0,38$), удоем на 1 день продуктивной жизни ($r=0,52$);

пожизненный удой с удоем на 1 день продуктивной жизни ($r=0,20$);

удой на 1 день продуктивной жизни с удоем на 1 день жизни ($r=0,44$).

В целом для общей характеристики продуктивного долголетия коров возможно использовать показатель удоя на 1 день жизни, так как установлены его высокие положительные взаимосвязи со всеми изучаемыми признаками, кроме периода разведения.

Выводы. Изучение результатов голштинизации черно-пестрой породы в условиях Смоленской области показало, что за последние 30 лет селекционно-племенной работы произошло активное поглощение массива черно-пестрого скота быками-производителями голштинской породы. Основная масса животных сейчас состоит из помесей с кровностью 90 % и более.

По мере повышения кровности по голштинской породе, снижается продолжительность жизни коров (за период исследований — 4,36 лактации), количество дойных дней, дней жизни, соотношение дойных дней к дням жизни и пожизненный удой.

Продолжительность продуктивной жизни черно-пестрых коров в условиях Смоленской области может достигать 12...13 лактаций при этом 51 % животных выбывает в период между 2-й и 4-й лактациями, уровень пожизненного удоя у 56,7 % животных варьирует от 10 тыс. кг до 30 тыс. кг молока. С возрастом меняется соотношение дойных и недойных дней, чем дольше лактирует корова, тем выше величина этого показателя и продолжительность ее жизни.

В дальнейшем в качестве индикатора продуктивного долголетия коров можно использовать показатель удоя на 1 день жизни, который тесно ($r=0,44-0,90$) связан с возрастными и продуктивными признаками.

Литература.

1. Оценка современного состояния генофонда холмогорской и черно-пестрой пород крупного рогатого скота на основе полногеномного SNP-анализа /

А. В. Доцев, А. А. Сермягин, А. В. Шахин, и др. // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018. № 22 (6). С. 742–747. doi: 10.18699/VJ18.418.

2. Молочная продуктивность коров австралийской селекции разной линейной принадлежности / И. Ф. Горлов, Е. Ю. Злобина, А. А. Кайдулина и др. // Молочное и мясное скотоводство. 2019. № 7. С. 27–31. doi: 10.33943/MMS.2019.7.42229.

3. Эффективность использования коров Ярославской породы разных генотипов по голштинам/ Н. П. Сударев, Д. Абылкасымов, О. В. Абрампольская и др. // Молочное и мясное скотоводство. 2020. № 7. С. 20–23. doi: 10.33943/MMS.2020.46.67.005.

4. Динамика численности и продуктивности молочного и молочно-мясного скота в Российской Федерации/ Е. А. Матвеева, Е. Е. Тяпугин, Л. П. Боголюбова и др. // Молочное и мясное скотоводство. 2020. № 8. С. 3–6. doi: 10.33943/MMS.2020.17.96.001.

5. Ежегодник по племенной работе в молочном скотоводстве в хозяйствах Российской Федерации (2021 год). ФГБНУ ВНИИплем, М.: 2022 г. 263с.

6. Генетическая структура популяции голштинизированного черно-пестрого скота на территории Урала / М. В. Модоров, И. В. Ткаченко, А. А. Грин и др. // Генетика. 2021. Т. 57. № 4. С. 437–444. doi: 10.31857/S001667582104010X

7. Мкртчян Г. В., Бакай А. В., Кровикова А. Н. Белково-молочность коров и возможные пути ее повышения // Зоотехния. 2020. № 4. С. 2–7. doi: 10.25708/ZT.2020.35.14.001.

8. Титова С. В. Продолжительность продуктивного использования и пожизненная продуктивность голштинизированного черно-пестрого скота// Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2016. № 5 (54). С. 68–72. doi: 10.30766/2072–9081.2016.54.5.68–72

9. Бабайлова Г. П., Березина Т. И. Молочная продуктивность и пожизненный удой коров черно-пестрой породы разных типов телосложения // Зоотехния. 2014. № 2. С. 15–17.

10. Wright J. R., Van Raden P. M. Genetic evaluation of dairy cow livability // Journal of Animal Science. 2016. Vol. 94(5). P. 178–178. doi: 10.2527/jam2016–0368.

11. Николаев С. В., Шемуранова Н. А. Продуктивность коров холмогорской породы с различной степенью голштинизации в условиях республики Коми // Молочное и мясное скотоводство. 2020. № 2. С. 19–23. doi: 10.33943/MMS.2020.82.49.005.

12. Голштинская порода в создании улучшенных генотипов и внутрипородных типов крупного рогатого скота / Косяченко Н. М., Абрамова М. В., Ильина А. В. и др. Ярославль: Канцлер, 2020. 157с.

13. Ежегодник по племенной работе в молочном скотоводстве в хозяйствах Российской Федерации (2019 год). М.: ФГБНУ ВНИИплем, 2020. 271с.

14. *Genome-wide association study for lactation persistency, female fertility, longevity, and lifetime profit index traits in Holstein dairy cattle* / S. Navey, M. Sargolzaei, M. K. Abo-Ismael, et al. // *Journal of Dairy Science*. 2016. Vol. 100(2) P. 1246–1258. doi: 10.3168/jds.2016-11770.
15. Sawa A., Bogucki M. Longevity of cows depending on their first lactation yield and herd production level // *Annals of Animal Science*. 2017. Vol. 17(4). P. 1171–1183. doi: 10.1515/aoas-2016-0096.
16. Санова З. С. Прогноз продуктивного долголетия голштинских коров по косвенным признакам // *Молочное и мясное скотоводство*. 2020. № 4. С. 22–25. doi: 10.33943/MMS.2020.55.90.006
17. Бекенёв В. А. Продуктивное долголетие животных, способы его прогнозирования и продления (обзор) // *Сельскохозяйственная биология*. 2019. Т. 54. № 4. С. 655–666. doi: 10.15389/agrobiologi.2019.4.655rus.

Поступила в редакцию 26.03.2023

После доработки 12.04.2023

Принята к публикации 20.06.2023

**ИНФОРМАТИВНОСТЬ L-ЛАКТАТА КРОВИ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЛЕЙКОЦИТАРНЫХ ИНДЕКСОВ
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЯЖЕЛОГО ТЕЧЕНИЯ МИКОПЛАЗМОЗА У ТЕЛЯТ**

А. Е. Черницкий, доктор биологических наук, **И. А. Шкуратова**, член-корреспондент РАН, **А. П. Порываева**, доктор биологических наук, **Е. В. Печура**, доктор ветеринарных наук, **О. Г. Томских**, кандидат ветеринарных наук

Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук,
620142, Екатеринбург, ул. Белинского, 112а
E-mail: cherae@mail.ru

Исследование проводили с целью изучения информативности L-лактата крови и интегральных лейкоцитарных индексов для прогнозирования тяжелого течения микоплазмоза у телят при их естественном заражении *M. bovis*. В условиях сельскохозяйственных предприятий Уральского федерального округа в течение месяца вели ежедневное клиническое наблюдение за 36 телятами голштинской породы, естественно инфицированными *M. bovis* в возрасте 10...15 суток. В образцах крови, полученных из яремной вены животных, при первых признаках заболевания определяли содержание гемоглобина, эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов, гематокрит на анализаторе Abacus Junior Vet (Diatron), концентрацию L-лактата – по реакции с параоксидифенилом на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu), выполняли дифференциальный подсчет лейкоцитов в мазках крови, окрашенных по Романовскому-Гимзе, на микроскопе Olympus BX43 (Olympus, Япония), рассчитывали интегральные лейкоцитарные индексы – индекс Кребса (ИК), лейкоцитарный индекс интоксикации Я. Я. Кальф-Калифа (ЛИИ), реактивный ответ нейтрофилов Т. Ш. Хабирова (РОН), индекс адаптации (ИА), индекс Бредекка (ИБ), ядерный индекс сдвига (ЯИС), лимфоцитарно-гранулоцитарный индекс (ИЛГ), индекс соотношения нейтрофилов и моноцитов (ИСНМ), индекс сдвига лейкоцитов крови (ИСЛК), индекс соотношения лимфоцитов и моноцитов (ИСЛМ) и лимфоцитарно-нейтрофильное соотношение (ЛНС). У 22 (61,1 %) телят установлено легкое и средне-тяжелое течение, у 14 (38,9 %) – тяжелое течение микоплазмоза. У животных, предрасположенных к тяжелому течению заболевания, при первых клинических признаках болезни регистрировали повышенное содержание L-лактата в крови $> 1,68$ ммоль/л, ИА $> 1,57$ ед., ИЛГ $> 16,7$ ед., ЛНС $> 1,41$ ед., пониженные ИК $< 0,645$ ед. и ИСЛК $< 0,600$ ед. Информативность предикторов для прогнозирования тяжелого течения микоплазмоза у телят оценивали как очень хорошую, чувствительность составила 71,4...85,7 %, специфичность – 81,8...90,9 %. Накопление L-лактата в крови животных и изменения лейкоцитарных индексов (ИА, ИЛГ, ЛНС, ИК, ИСЛК) взаимосвязаны.

**INFORMATIVE VALUE OF BLOOD L-LACTATE AND INTEGRAL LEUKOCYTE INDICES
FOR PREDICTING SEVERE COURSE OF MYCOPLASMOSIS IN CALVES**

A. E. Chernitskiy, I. A. Shkuratova, A. P. Poryvaeva, E. V. Pechura, O. G. Tomskikh

Ural Federal Agrarian Scientific Research Center,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
620142, Ekaterinburg, ul. Belinskogo, 112a
E-mail: cherae@mail.ru

The aim was to study the informativity of blood L-lactate and integral leukocyte indices for predicting a severe course of mycoplasmosis in calves during their natural infection with *M. bovis*. Daily clinical observation of 36 Holstein calves naturally infected with *M. bovis* (at the age of 10–15 days) was carried out for one month on the farms of the Ural Federal District. In blood samples obtained from the jugular vein of animals at the first signs of the disease, the levels of hemoglobin, erythrocytes, leukocytes, platelets, hematocrit on Abacus Junior Vet analyzer (Diatron, Austria), L-lactate concentration – by reaction with paraoxydiphenyl on UV-1800 spectrophotometer (Shimadzu, Japan) were studied. Differential leukocyte counts in Romanowsky-Giemsa stained blood smears were performed using Olympus BX43 microscope (Olympus, Japan). The following integral leukocyte indices were calculated: Krebs index (KI), leukocyte index of intoxication by Y. J. Calf-Calif (LI), neutrophil reactive response by T. Sh. Khabirov (NRR), adaptation index (AI), Bredeck index (IB), nuclear shift index (NSI), lymphocyte-granulocyte index (ILG), neutrophil to monocyte ratio index (NMR), leukocyte shift index (LSI), lymphocyte to monocyte ratio index (LMR) and lymphocyte to neutrophil ratio (LNR). In 22 (61,1 %) calves a mild to moderately severe course was detected, in 14 (38,9 %) – a severe course of mycoplasmosis. The animals predisposed to a severe course of mycoplasmosis had higher blood L-lactate > 1.68 mmol/l, AI > 1.57 units, ILG > 16.7 units, LNR > 1.41 units, reduced KI < 0.645 units and LSI < 0.600 units at the first clinical signs of disease. The information value of predictors for prognosing severe mycoplasmosis in calves was evaluated as very good; the sensitivity was 71.4–85.7 %, the specificity made 81.8–90.9 %. The accumulation of L-lactate in the blood of animals and changes in leukocyte indices (AI, ILG, LNR, KI, LSI) were shown to be interrelated.

Ключевые слова: телята, респираторный микоплазмоз, прогнозирование течения болезни, ROC-анализ, L-лактат, интегральные лейкоцитарные индексы.

Key words: calves, respiratory mycoplasmosis, disease course prediction, ROC-analysis, L-lactate, integral leukocyte indices.

Mycoplasma bovis – один из ключевых патогенов, участвующих в этиологии респираторных болезней телят [1, 2]. *M. bovis*, как и другие представители класса *Mollicutes*, не имеют истинной клеточной стенки, полиморфны, являются мембранными и внутриклеточными

паразитами с высокой степенью тканевой специфичности [3, 4]. При аэрогенном заражении они размножаются в эпителии дыхательных путей [2, 5]. Колонизация дыхательных путей *M. bovis* у телят может длительное время не проявляться клинически, однако после стрессовых

ситуаций, как правило, инициирует воспаление легких [2, 6, 7]. Течение болезни чаще подострое и хроническое; заболеваемость составляет 20...40 %, летальность – 20 % и более [8]. У заболевших животных наблюдают повышение температуры, затрудненное дыхание, носовые истечения, кашель, конъюнктивиты, синуситы, отиты, воспаление суставов, отставание в росте [2, 8]. При патологоанатомическом исследовании у павших и вынужденно убитых телят обнаруживают поражения легких (от интерстициальных до некротизирующих, часто локализованные в краниальных и средних долях), увеличение заглочных, бронхиальных и средостенных лимфатических узлов (с выраженной гиперплазией лимфоидной ткани), плеврит, перикардит, дистрофию паренхиматозных органов, деструкцию носовых раковин и лабиринта решетчатой кости, артриты запястных и коленных суставов [2, 7, 8]. В. J. White и соавт. показали, что уже через 96 ч после экспериментального интраназального заражения телят *M. bovis* у 65,0 % особей развиваются симптомы поражения органов дыхания [9]. При этом тяжесть заболевания телят в эксперименте не зависела от дозы инокулируемого патогена ($< 10^8$ КОЕ или $> 10^9$ КОЕ). Среди животных, зараженных *M. bovis* в дозе $< 10^8$ КОЕ, тяжелое течение болезни авторы регистрировали в 2 раза чаще, чем в группе особей, которым патоген инокулировали в большем количестве ($> 10^9$ КОЕ) [9]. Вероятно, тяжесть течения микоплазмоза у телят в большей степени определяло состояние их иммунологической реактивности, чем заражающая доза *M. bovis*.

Исследования S. Buczinski и соавт., а также M. Zeineldin и соавт. показали, что неблагоприятным прогностическим признаком при инфекционных пневмониях телят, в том числе вызванных *M. bovis*, служит повышенное накопление L-лактата в крови [10, 11]. Установлено, что он может контролировать эффектор-ные функции Т-клеток при воспалении и активировать сигнал остановки миграции, вызывая (при повышении концентрации) нарушение иммунных реакций, опосредованных CD8+ Т-клетками [12, 13]. Кроме того, при лактоацидозе активируется провоспалительный путь IL-23/IL-17, но не путь Т-хелперов, что может привести к развитию хронического воспаления у животных [13]. В эксперименте на мышах было продемонстрировано, что введение L-лактата в верхнем диапазоне физиологических концентраций сопровождается снижением уровня лейкоцитов в костном мозге и мобилизацией их в периферическую кровь [14]. Несмотря на экспрессию переносчиков L-лактата MCT4 и MCT1, а также лактатного рецептора GPR81 и на других иммунных клетках костного мозга, введение L-лактата приводило к мобилизации в кровотока преимущественно нейтрофильных гранулоцитов и (несколько позже) моноцитов [14]. Также показано, что L-лактат участвует в регуляции проницаемости сосудов костного мозга путем связывания и передачи сигналов через эндотелиальный GPR81 [14].

Таким образом, накопление L-лактата в крови и изменения лейкоцитарной формулы физиологически взаимосвязаны. Изменения морфологического состава белой крови у животных могут быть сопряжены как с развитием патологического процесса, так и с индивидуальной реактивностью лейкоцитарной системы (ИРЛС) [15, 16]. Важный инструмент для оценки ИРЛС – анализ интегральных лейкоцитарных индексов [16, 17].

Цель исследований – изучить информативность L-лактата крови и интегральных лейкоцитарных индексов для прогнозирования тяжелого течения микоплазмоза у телят при их естественном заражении *M. bovis*.

Методика. В сельскохозяйственных предприятиях Уральского федерального округа исследовали 36 телят голштинской породы в возрасте 10...15 суток. Критериями для включения животных в опыт служили: наличие признаков поражения органов дыхания (спонтанный или индуцированный кашель, носовые истечения, тахипноэ, одышка), выявленных впервые не более 3 дней назад; клиническая оценка по Wisconsin respiratory scoring chart® (WRSC) [18] ≥ 4 балла; выделение генома *M. bovis* из носовой слизи. При постановке опыта (до лечения) у телят отбирали образцы крови и носовой слизи для лабораторных исследований. Забор крови проводили в утренние часы до кормления, из яремной вены с помощью вакуумных коммерческих систем с гепарином лития. Все процедуры выполнялись в соответствии с международными и национальными рекомендациями по уходу и использованию животных, согласно разрешению № 507 экспертной комиссии ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН от 16.02.2023 г. Содержание в крови гемоглобина, эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов, гематокрит исследовали на гематологическом ветеринарном анализаторе Abacus Junior Vet (Diatron, Австрия); концентрацию L-лактата – по реакции с параоксидифенилом [19] на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония). Лейкоцитарную формулу определяли путем дифференциального подсчета 200 лейкоцитов в мазках крови, окрашенных по Романовскому-Гимзе, на микроскопе Olympus BX43 (Olympus, Япония); интегральные лейкоцитарные индексы – индекс Кребса (ИК), лейкоцитарный индекс интоксикации Я. Я. Кальф-Калифа (ЛИИ), реактивный ответ нейтрофилов Т. Ш. Хабирова (РОН), индекс адаптации (ИА), индекс Бредекка (ИБ), ядерный индекс сдвига (ЯИС), лимфоцитарно-гранулоцитарный индекс (ИЛГ), индекс соотношения нейтрофилов и моноцитов (ИСНМ), индекс сдвига лейкоцитов крови (ИСЛК), индекс соотношения лимфоцитов и моноцитов (ИСЛМ) и лимфоцитарно-нейтрофильное соотношение (ЛНС) – рассчитывали по соответствующим формулам [17, 20]. Геном *M. bovis* в образцах носовой слизи выявляли методом ПЦР в режиме реального времени на амплификаторе Rotor-Gene 3000 (Corbett Life Science, Австралия) с использованием видоспецифичных наборов производства ООО «ИДС» (Россия). Для уточнения этиологической структуры заболевания образцы носовой слизи подвергали бактериологическим исследованиям [8]. Сопутствующая микрофлора, выделенная из исследованных образцов, в 47,2 % случаев была представлена *Escherichia coli* (серотипы O8, O9, O26, O78, O115), в 66,7 % *Enterococcus faecalis*, в 22,2 % *Enterococcus faecium*, в 25,0 % *Staphylococcus epidermidis*; в 44,4 % образцов обнаружены монокультуры микроорганизмов, в 55,6 % их ассоциации.

В течение месяца за животными вели постоянное клиническое наблюдение: оценивали поведение, аппетит, состояние суставов и видимых слизистых оболочек, наличие и характер выделений из глаз, носовых истечений, кашля, одышки, чувствительность гортани, трахеи и межреберных промежутков при пальпации, измеряли ректальную температуру, частоту и глубину дыхания с помощью маски с системой клапанов и спирометра ССП (КПО «Медаппаратура»), частоту сердечных сокращений, выполняли аускультацию грудной клетки, используя ветеринарный стетоскоп Littmann® Master Classic II (3М), проводили оценку по шкале WRSC (для провокации кашля применяли 30-секундное апноэ на выдохе) [8, 18], учитывали тяжесть течения и продолжительность болезни. Показаниями для начала лечения телят считали угнетение, отказ от приема корма, кашель, хрипы при

Табл. 1. Клинико-физиологические показатели телят при первых признаках микоплазмоза

Показатель	Mean $\pm$ SEM; Med	Min...Max
Клиническая оценка по WRSC, балл	5,72 $\pm$ 0,27; 4,00	4,00...8,00
Ректальная температура, °C	39,2 $\pm$ 0,09; 39,0	38,8...40,3
Частота сердечных сокращений, в мин.	97,8 $\pm$ 3,56; 96,0	70,0...120,0
Частота дыхания, в мин.	35,8 $\pm$ 2,01; 37,0	19,0...54,0
Глубина дыхания, мл	279,1 $\pm$ 17,0; 298,5	154,0...410,0
Гемоглобин, г/л	110,8 $\pm$ 4,45; 114,3	69,4...143,4
Гематокрит, %	35,5 $\pm$ 1,48; 37,0	24,0...46,0
Эритроциты, 10 ¹² /л	7,03 $\pm$ 0,22; 7,05	5,40...8,80
Лейкоциты, 10 ⁹ /л	10,5 $\pm$ 0,58; 10,5	6,00...16,2
Тромбоциты, 10 ⁹ /л	1469 $\pm$ 96,3; 1422	797...2300
L-лактат, ммоль/л	1,54 $\pm$ 0,14; 1,65	0,65...2,85

аускультации, одышку, при условии клинической оценки по WRSC ≥ 5 баллов [8, 18]. Для лечения применяли Азитронит® (ООО «Нита-Фарм», Россия) внутримышечно из расчета 0,5 мл на 10 кг массы тела 1 раз в сутки в течение 4 дней, при необходимости курс повторяли. Клиническое исследование животных по завершению курса лечения дополняли лабораторными анализами крови и носовой слизи; заключение о выздоровлении делали на основании комплексного анализа результатов. Ретроспективно всех телят разделили на две группы: в первую вошли особи с легким и среднетяжелым течением ($n = 22$), во вторую – с тяжелым течением болезни ($n = 14$).

При тяжелом течении микоплазмоза у животных регистрировали угнетение, лихорадку ремитирующего типа, слизисто-гнойные носовые истечения, учащенное, поверхностное дыхание, одышку, самопроизвольный повторяющийся, часто болезненный кашель, при аускультации легких влажные хрипы, у 57,1 % – признаки отита, у 35,7 % – поражения запястных и коленных суставов; 1 теленок пал. В первой группе (с легким и среднетяжелым течением болезни) случаев падежа не было. При патологоанатомическом исследовании павшего животного выявлены катарально-гнойный ринит, деструкция носовых раковин и лабиринта решетчатой кости, двусторонняя острая катарально-гнойная бронхопневмония с поражением краниальных, средних долей и передне-нижних участков каудальных долей легких, двусторонний очаговый фиброзный плеврит, гиперплазия брыжеечных, средостенных и бронхиальных лимфатических узлов, фибринозное воспаление запястных и коленных суставов. При ПЦР-исследовании образцов пораженных тканей легких (оборудование и реагенты использовали те же, что и при анализе носовой слизи) выделен геном *M. bovis*.

Статистический анализ экспериментальных данных выполняли в программе IBM SPSS Statistics 20.0 (IBM Corp.). Результаты представляли в формате: среднее (Mean) $\pm$ стандартная ошибка среднего (SEM), медиана (Med), минимальное (Min) и максимальное значения (Max). Достоверность различий между группами определяли по U-критерию Манна-Уитни; взаимосвязи между показателями – по критерию Спирмена. Информативность интегральных лейкоцитарных индексов для прогнозирования тяжелого течения микоплазмоза у телят оценивали с помощью ROC-анализа [21] по следующим параметрам: площадь под ROC-кривой (AUC), критическое значение, отсекающее группу риска, чувствительность (Se) и специфичность (Sp). Проверять статистические гипотезы, использовали уровень значимости 5 %.

Результаты и обсуждение. При первых признаках микоплазмоза (начало опыта) у 38,9 % обследованных телят клиническая оценка по шкале WRSC составила

5 баллов или более, у 27,8 % наблюдали повышенную (более 39,5 °C) температуру тела, у 72,2 % – тахикардию, у 61,1 % – тахипноэ, у 27,8 % – одышку, у 5,56 % – самопроизвольный кашель (табл. 1). По результатам лабораторных исследований крови у 44,4 % животных выявлен пониженный гематокрит, у 22,2 % – анемия разной степени тяжести, у 66,7 % – лейкоцитоз. Показатели лейкоцитарной формулы характеризовались значительной вариабельностью: палочкоядерные нейтрофилы составили 1,00...7,00 %, сегментоядерные нейтрофилы 19,0...53,0 %, моноциты 3,00...10,0 %, лимфоциты 39,0...73,0 %.

Ранее К. Dudek и соавт. при экспериментальном интраназальном заражении 7-недельных телят *M. bovis* отмечали достоверное ($p < 0,05$) увеличение в крови животных относительного содержания гранулоцитов и уменьшение лимфоцитов [22]. Наблюдаемые сдвиги в лейкоцитарной формуле авторы объяснили миграцией лимфоцитов в очаги инфекции и компенсаторным увеличением в периферической крови других популяций лейкоцитов, главным образом, гранулоцитов в результате усиленного их образования и выхода из костного мозга.

В нашем эксперименте у животных с тяжелым течением микоплазмоза (вторая группа), по сравнению с особями с легким и среднетяжелым течением болезни (первая группа), на начало опыта было выше относительное содержание в крови палочкоядерных нейтрофилов ($4,14 \pm 0,59$, Med = 4,00 % против $3,82 \pm 0,50$, Med = 3,00 % при $p < 0,05$) и лимфоцитов ($60,4 \pm 3,99$, Med = 62,0 % против $50,5 \pm 2,38$, Med = 52,0 % при $p < 0,05$) и ниже – сегментоядерных нейтрофилов ($30,1 \pm 3,36$, Med = 28,3 % против $39,5 \pm 2,27$, Med = 39,9 % при $p < 0,05$). Различия по содержанию других форм лейкоцитов между выборками были статистически недостоверными.

Известно, что гранулоциты, особенно нейтрофилы, играют ключевую роль в обеспечении первой линии неспецифической антимикробной защиты за счет механизмов фагоцитоза и окислительного взрыва [15, 23]. К. Dudek и соавт. у телят, экспериментально зараженных *M. bovis*, наблюдали уменьшение лимфоцитарно-нейтрофильного соотношения с увеличением числа фагоцитирующих нейтрофилов в начале заболевания [22]. С развитием инфекции у животных отмечали снижение числа фагоцитирующих клеток в периферической крови, наиболее выраженным оно было в конце исследования (хроническая стадия заболевания) [22]. Показано, что в глубоких слоях паренхимы легких *M. bovis*, стимулируя реакции клеточного иммунного ответа, приводит к образованию тяжелых поражений с обширными фокусами коагуляционных некрозов, окруженных клетками воспаления [24].

У телят обеих групп при первых признаках микоплазмоза, по сравнению с нормой [17], были понижены ИК (в большей степени во второй группе) и ЯИС (табл. 2), повышены – ИСНМ и ИСЛМ; ИЛГ – повышен во второй группе и находился у нижней границы нормы [17] в первой; ЛИИ, РОН, ИА, ИБ, ИСЛК и ЛНС оставались в пределах референсных значений [17]. Уменьшение ИК и ЯИС у животных косвенно указывало на снижение активности фагоцитарных реакций и иммунной реактивности организма, а увеличение ИСНМ и ИСЛМ свидетельствовало о недостаточности клеточно-эффекторного звена иммунитета [17, 20].

У телят с последующим тяжелым течением микоплазмоза на начало опыта были понижены ИК (на 37,9 %, $p < 0,05$) и ИСЛК (на 40,2 %, $p < 0,05$), повышены – ИА (на 78,0 %, $p < 0,01$), ИЛГ (на 59,9 %, $p < 0,05$) и ЛНС (на 59,5 %, $p < 0,05$), по сравнению с особями первой

Табл. 2. Интегральные лейкоцитарные индексы у телят с разной тяжестью течения микоплазмоза (при первых признаках болезни), Mean $\pm$ SEM; Med

Индекс (референсные значения [17])	Первая группа (n = 22)	Вторая группа (n = 14)
ИК (0,82...1,26)	0,90 $\pm$ 0,09; 0,87	0,62 $\pm$ 0,13; 0,54*
ЛИИ (0,54...1,27)	0,84 $\pm$ 0,09; 0,85	0,62 $\pm$ 0,11; 0,60
РОН (0,44...7,31)	3,14 $\pm$ 0,65; 2,60	2,10 $\pm$ 0,56; 2,00
ИА (1,08...3,24)	1,37 $\pm$ 0,18; 1,27	2,23 $\pm$ 0,34; 2,26*
ИБ (14,7...16,1)	18,5 $\pm$ 5,08; 14,0	17,0 $\pm$ 3,14; 15,5
ЯИС (0,19...0,64)	0,09 $\pm$ 0,01; 0,08	0,15 $\pm$ 0,03; 0,13
ИЛГ (12,1...17,0)	12,5 $\pm$ 1,65; 11,6	19,3 $\pm$ 2,80; 18,5*
ИСНМ (4,09...6,44)	9,71 $\pm$ 1,72; 8,40	7,53 $\pm$ 1,76; 5,80
ИСЛК (0,37...1,16)	0,80 $\pm$ 0,08; 0,82	0,55 $\pm$ 0,10; 0,49*
ИСЛМ (7,63...8,79)	11,3 $\pm$ 2,11; 8,33	14,0 $\pm$ 3,22; 10,7
ЛНС (1,22...2,51)	1,26 $\pm$ 0,16; 1,16	1,93 $\pm$ 0,28; 1,85*

*различия между группами статистически достоверны при $p < 0,05$.

группы (табл. 2). Такие изменения лейкоцитарного профиля крови у животных второй группы указывали на значительное снижение их иммунной реактивности при выраженной инфекционной интоксикации [15, 20].

ROC-анализ показал, что ИК, ИСЛК, ИА, ИЛГ и ЛНС могут использоваться для прогнозирования тяжелого течения микоплазмоза у телят, информативность предикторов оценивалась как очень хорошая (AUC 0,800...0,900). Чувствительность ИК и ИСЛК составила 85,7 %, специфичность – 90,9 % при критических значениях менее 0,645 и 0,600 ед. соответственно. Чувствительность ИА составила 85,7 %, ИЛГ – 71,4 %, ЛНС – 85,7 %, специфичность – соответственно 81,8, 90,9 и 81,8 % при критических значениях более 1,57, 16,7 и 1,41 ед.

У животных с последующим тяжелым течением микоплазмоза при первых признаках заболевания концентрация L-лактата в крови была достоверно выше, чем у особей с легким и среднетяжелым течением болезни (2,01 $\pm$ 0,16, Med = 1,85 ммоль/л против 1,24 $\pm$ 0,15, Med = 1,25 ммоль/л при $p < 0,01$). ROC-анализ показал, что концентрация L-лактата в крови можно использовать для прогнозирования тяжелого течения микоплазмоза у телят: информативность предиктора оценивалась как очень хорошая (AUC 0,896), чувствительность составила 85,7 %, специфичность – 81,8 % при критическом значении более 1,68 ммоль/л. Наши данные подтверждают результаты более ранних исследований S. Buczinski и соавт. [10] и M. Zeineldin и соавт. [11], показавших высокую информативность определения уровня L-лактата в крови телят для оценки степени поражения легких и прогнозирования неблагоприятного исхода респираторных заболеваний.

Корреляционный анализ выявил умеренную отрицательную зависимость между содержанием L-лактата в крови телят и ИК ($r = -0,44$, $p < 0,05$), ИСЛК ($r = -0,45$, $p < 0,05$). Напротив, положительная зависимость обнаружена между уровнем L-лактата в периферической крови и ИЛГ ($r = +0,44$, $p < 0,05$), ИА ($r = +0,43$, $p < 0,05$), а также ЛНС ($r = +0,44$, $p < 0,05$). Обнаруженные в эксперименте зависимости согласуются с результатами недавних исследований [12, 13, 14] и подтверждают ключевую роль L-лактата в регуляции иммунных реакций у животных.

Выводы. Результаты исследования и анализ литературных данных позволяют считать, что индивидуальная реактивность лейкоцитарной системы в значительной степени взаимосвязана с содержанием L-лактата в крови животных. В эксперименте уровень L-лактата в крови телят коррелировал с ИК ($r = -0,44$, $p < 0,05$),

ИСЛК ($r = -0,45$, $p < 0,05$), ИЛГ ($r = +0,44$, $p < 0,05$), ИА ($r = +0,43$, $p < 0,05$), а также ЛНС ($r = +0,44$, $p < 0,05$). У особей, предрасположенных к тяжелому течению микоплазмоза, при первых клинических признаках болезни наблюдали повышенные содержание L-лактата в крови более 1,68 ммоль/л, ИА более 1,57 ед., ИЛГ более 16,7 ед., ЛНС более 1,41 ед. при пониженных ИК (менее 0,645 ед.) и ИСЛК (менее 0,600 ед.). Информативность перечисленных показателей для прогнозирования тяжелого течения микоплазмоза у телят оценивали как очень хорошую (AUC 0,800...0,900), чувствительность составила 71,4...85,7 %, специфичность – 81,8...90,9 %.

Литература

1. *Mycoplasma bovis infections in cattle* / F. P. Maunsell, A. R. Woolums, D. Francoz, et al. // J. Vet. Intern. Med. 2011. Vol. 25. No. 4. P. 772–783. doi: 10.1111/j.1939–1676.2011.0750.x.
2. *Mycoplasma bovis infections – occurrence, diagnosis and control* / K. Dudek, R.A.J. Nicholas, E. Szacawa, et al. // Pathogens. 2020. Vol. 9. No. 8. 640. URL: <https://www.mdpi.com/2076-0817/9/12/994> (дата обращения: 16.02.2023). doi: 10.3390/pathogens9080640.
3. *A review of Mycoplasma diagnostics in cattle* / A. M. Parker, P. A. Sheehy, M. S. Hazelton, et al. // J. Vet. Intern. Med. 2018. Vol. 32. No. 3. P. 1241–1252. doi: 10.1111/jvim.15135.
4. *Molecular genetic and bacteriological methods of bovine mycoplasmosis diagnosis* / E. V. Remizova, A. V. Gorbato, L. K. Semina, et al. // Veterinary Science Today. 2022. Vol. 11. No. 4. P. 335–340. doi: 10.29326/2304-196X-2022-11-4-335-340.
5. *Perez-Casal J. Pathogenesis and virulence of Mycoplasma bovis* // Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract. 2020. Vol. 36. No. 2. P. 269–278. doi: 10.1016/j.cvfa.2020.02.002.
6. *The upper respiratory tract microbiome and its potential role in bovine respiratory disease and otitis media* / S. F. Lima, A.G.V. Teixeira, C. H. Higgins, et al. // Sci. Rep. 2016. Vol. 6. 29050. URL: <https://www.nature.com/articles/srep29050> (дата обращения: 16.02.2023). doi: 10.1038/srep29050.
7. *Mycoplasma bovis arthritis and pneumonia in calves in Jordan: An emerging disease* / W. M. Hananeh, W.M.A. Momani, M. M. Ababneh, et al. // Vet. World. 2018. Vol. 11. No. 12. P. 1663–1668. doi: 10.14202/vetworld.2018.1663–1668.
8. *Методическое пособие по прогнозированию и ранней диагностике респираторных болезней у телят* / А. Е. Черницкий, Л. И. Ефанова, А. И. Золотарев и др. Воронеж: Истоки, 2013. 48 с. doi: 10.13140/RG.2.2.11326.28481.
9. *Clinical, behavioral, and pulmonary changes in calves following inoculation with Mycoplasma bovis* / B. J. White, D. E. Anderson, D. G. Renter, et al. // Am. J. Vet. Res. 2012. Vol. 73. No. 4. P. 490–497. doi: 10.2460/ajvr.73.4.490.
10. *Assessment of L-lactatemia as a predictor of respiratory disease recognition and severity in feedlot steers* / S. Buczinski, R. D. Rademacher, H. M. Tripp, et al. // Prev. Vet. Med. 2015. Vol. 118. No. 4. P. 306–318. doi: 10.1016/j.prevetmed.2014.12.003.
11. *Clinical utilization of point-of-care blood L-lactate concentrations in naturally occurring respiratory disease in feedlot cattle* / M. Zeineldin, M. Ghanem, Y. A. El-Raof, et al. // Pak. Vet. J. 2017. Vol. 37. No. 2. P. 210–214.
12. *Lactate regulates metabolic and pro-inflammatory circuits in control of T cell migration and effector functions* /

- R. Haas, J. Smith, V. Rocher-Ros, et al. // *PLoS Biol.* 2015. Vol. 13. No. 7. e1002202. URL: <https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.1002202> (дата обращения: 16.02.2023). doi: 10.1371/journal.pbio.1002202.
13. Lactate at the crossroads of metabolism, inflammation, and autoimmunity / V. Pucino, M. Bombardieri, C. Pitzalis, et al. // *Eur. J. Immunol.* 2017. Vol. 47. No. 1. P. 14–21. doi: 10.1002/eji.201646477.
14. Lactate released by inflammatory bone marrow neutrophils induces their mobilization via endothelial GPR81 signaling / E. Khatib-Massalha, S. Bhattacharya, H. Massalha, et al. // *Nat. Commun.* 2020. Vol. 11. No. 1. 3547. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-17402-2> (дата обращения: 16.02.2023). doi: 10.1038/s41467-020-17402-2.
15. Individual reactivity of granulocytic system of newborn calves and its role in pathogenesis of inflammatory diseases of respiratory and gastrointestinal tracts / Sidel'nikova V.I., Chernitskiy A. E., Zolotarev A. I., et al. // *Agricultural biology.* 2015. Vol. 50. No. 4. P. 486–494. doi: 10.15389/agrobiology.2015.4.486eng.
16. Чуличикова С.А., Дерхо М. А. Лейкоцитарные индексы как индикатор иммунного статуса организма коров на ранних сроках стельности // *АПК России.* 2016. Т. 75. № 1. С. 47–51.
17. Возрастные изменения интегральных гематологических индексов у крупного рогатого скота / А. П. Жуков, Е. Б. Шарафутдинова, А. П. Датский и др. // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета.* 2016. № 4 (60). С. 213–216.
18. McGuirk S.M., Peek S. F. Timely diagnosis of dairy calf respiratory disease using a standardized scoring system // *Anim. Health Res. Rev.* 2014. Vol. 15. No. 2. P. 145–147. doi: 10.1017/S1466252314000267.
19. Pino R.M., Singh J. Appropriate clinical use of lactate measurements // *Anesthesiology.* 2021. Vol. 134. No. 4. P. 637–644. doi: 10.1097/ALN.0000000000003655.
20. Сперанский И.И., Самойленко Е. М., Лобачева И. Н. Общий анализ крови – все ли его возможности исчерпаны? Интегральные индексы интоксикации как критерии оценки тяжести течения эндогенной интоксикации, ее осложнений и эффективности проводимого лечения // *Здоровье Украины.* 2009. № 6 (19). С. 51–57.
21. DeLong E.R., DeLong D.M., Clarke-Pearson D. L. Comparing the areas under two or more correlated receiver operating characteristic curves: a nonparametric approach // *Biometrics.* 1988. Vol. 44. No. 3. P. 837–845. doi: 10.2307/2531595.
22. Analysis of the leukocyte response in calves suffered from *Mycoplasma bovis pneumonia* / K. Dudek, D. Bednarek, U. Lisiecka, et al. // *Pathogens.* 2020. Vol. 9, No. 5. 407. URL: <https://www.mdpi.com/2076-0817/9/5/407> (дата обращения: 16.02.2023). doi: 10.3390/pathogens9050407.
23. Effect of *Mycoplasma bovis* on bovine neutrophils / S. Jimbo, M. Suleman, T. Maina, et al. // *Vet. Immunol. Immunopathol.* 2017. Vol. 188. P. 27–33. doi: 10.1016/j.vetimm.2017.04.011.
24. Глотов А.Г., Глотова Т. И. Респираторные болезни телят вирусно-бактериальной этиологии. Новосибирск: Агрос, 2008. 256 с.
25. Оценка уровней реактивности, интоксикации и активности воспаления у собак при бронхопневмонии с использованием лейкоцитарных индексов / Е. Б. Шарафутдинова, Н. В. Сорокин, А. П. Жуков и др. // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета.* 2022. № 6 (98). С. 204–212. doi: 10.37670/2073-0853-2022-98-6-204-212.

Поступила в редакцию 16.03.2023

После доработки 19.04.2023

Принята к публикации 15.06.2023

Хранение и переработка сельскохозяйственной продукции

УДК 633.63:632.934:631.563

DOI: 10.31857/S2500262723040130, EDN: JYSAUC

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ЗАЩИТЫ СЫРЬЯ В СЕМЕНОВОДСТВЕ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ**М. А. Смирнов**, кандидат экономических наук, **И. И. Бартенев**, кандидат технических наук, **О. М. Нечаева**

*Всероссийский научно-исследовательский институт
сахарной свеклы и сахара имени А. Л. Мазлумова,
396030, Воронежская обл., Рамонский р-н, пос. ВНИИСС, 86
E-mail: masmirnov@rambler.ru*

Обеспечение товарных хозяйств качественным посевным материалом определяет основной вектор развития отечественного семеноводства сахарной свеклы. При этом особая роль отводится совершенствованию приемов хранения сырья. Цель исследований – выявить влияние физических и химических факторов на сохранность посадочного материала, а также продуктивность семенных растений сахарной свеклы. Работу выполняли в 2019–2021 гг. в Воронежской области. Объект исследования – маточные корнеплоды и семенные растения мужскостерильной формы гибрида отечественной селекции РМС-127. Опыты закладывали в корневых хранилищах, а также на изолированных участках в соответствии с методическими рекомендациями и указаниями по семеноводству сахарной свеклы. Схема эксперимента включала следующие варианты: без обработки (контроль); обработка маточных корнеплодов инфракрасным излучением (30 с) с использованием рефлектора Минина (синяя лампа); опрыскивание маточных корнеплодов фунгицидом Кагатник, ВРК (0,10 л/т); опрыскивание маточных корнеплодов фунгицидом Кагатник, ВРК (0,10 л/т) + инфракрасное излучение (30 с); опрыскивание маточных корнеплодов фунгицидом Кагатник, ВРК (0,10 л/т) + поверхностно-активное вещество Аллур, Ж (0,003 л/т). Обработка маточных корнеплодов сахарной свеклы фунгицидом Кагатник, ВРК совместно с инфракрасным излучением или с поверхностно-активным веществом Аллур, Ж позволяет снизить потери массы в процессе хранения на 1,6...2,3 % и израсходование на 21,4...23,3 %, увеличить выход годных к высадке корнеплодов на 6...7 %. В последствии установлено положительное влияние изучаемых приемов оптимизации технологии хранения маточных корнеплодов на развитие и продуктивность семенных растений сахарной свеклы. Прибавка урожая вороха семян сахарной свеклы составляла 0,5 т/га, а доброкачественность основных посевных фракций (3,5...4,5 мм и 4,5...5,5 мм) – 96...98 %.

PROSPECTS OF USING CHEMICAL AND PHYSICAL METHODS OF RAW MATERIAL PROTECTION IN SUGAR BEET SEED-GROWING**M. A. Smirnov, I. I. Bartenev, O. M. Nechaeva**

*The A. L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar,
396030, Voronezhskaya obl., Ramonskii r-n, pos. VNISS, 86
E-mail: masmirnov@rambler.ru*

Necessity to provide beet-growing farms with high-quality planting material determines the main vector of domestic sugar beet seed-growing development. And a special role in the crop seed-growing is assigned to improvement of the main methods including development of promising raw material storage technique. Aim of the investigations is to reveal influence of physical and chemical methods of raw material storage, both separately and in combination, on planting material safety as well as productivity of sugar beet seed-bearing plants. The investigations have been carried out by Federal State Budgetary Scientific Institution «The A. L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar» in 2019–2021. Objects of the studies are beet mother roots and seed-bearing plants of the domestic hybrid (RMS-127) male sterile form. The experiments have been performed in a beet root storehouse and isolated plots according to methodological recommendations and instructions for sugar beet seed-growing. The experiment scheme is: 1) control (without treatment); 2) treatment of beet roots mother with infra-red radiation (30 sec.) using the Minin reflector (blue lamp); 3) spraying of beet mother roots with the fungicide of «Kagatnik, VRK» (0.10 l/t); treatment with «Kagatnik, VRK» (0.10 l/t) + infra-red radiation (30 sec.); 5) treatment with «Kagatnik, VRK» (0.10 l/t) + the surfactant of «Allure, Zh» (0.003 l/t). As a result, treatment of sugar beet mother roots with the fungicide of «Kagatnik, VRK» together with infrared radiation as well as in a tank mixture with the surfactant of «Allure, Zh» makes it possible to reduce mass losses by 1.6–2.3 absolute % and proliferation by 21.4–23.3 absolute % during storage, and to increase the yield of suitable for planting beet roots by 6–7 absolute %. Positive dynamics of beet mother roots' storage technique aftereffect on development and productivity of sugar beet seed-bearing plants has been determined. The yield increase of the obtained sugar beet seeds is 0.5 t / ha, and high quality of seed sowing fractions (3.5–4.5 mm and 4.5–5.5 mm) is 96–98 %.

Ключевые слова: сахарная свекла (*Beta vulgaris* L.), семеноводство, посадочный материал, хранение, семенные растения, продуктивность.

Key words: sugar beet (*Beta vulgaris* L.), seed-growing, planting material, storage, seed-bearing plants, productivity.

Ежегодная потребность свеклосахарного производства в посевном материале современных гибридов сахарной свеклы в России составляет от 1300 до 1400 тыс. посевных единиц (п. е.). Согласно Доктрине продовольственной безопасности, к 2030 г. самообеспеченность

семенами этой культуры должна составлять не менее 75 % [1].

Основные способы производства семян гибридов сахарной свеклы – безвысадочный и высадочный. По мнению ряда авторов, более эффективен высадоч-

ный способ на основе использования мелкого (менее 200 г) посадочного материала в условиях поливного земледелия, обеспечивающий значительный (более 1:6) коэффициент выхода посадочного материала и высокую продуктивность семенных растений с минимальными производственными затратами. При этом необходимы дополнительные исследования в части совершенствования основных приемов агротехнологии семеноводства культуры: механизация полевых работ; система применения удобрений; система орошения; хранение маточных корнеплодов [2].

В последние годы в сельском хозяйстве России, в том числе в свеклосахарном производстве, осуществляется совершенствование способов и приемов хранения сырья на основе применения препаратов фунгицидного действия (химической и биологической природы) [3, 4] и различного вида излучений (СВЧ, ионизирующего, рентгеновского, ультрафиолетового, инфракрасного и низкоинтенсивного когерентного) [5, 6, 7]. Наиболее широкое распространение получила обработка посадочного материала перед закладкой на хранение фунгицидами [8, 9].

В международной практике при хранении сочной растительной продукции в борьбе с опасными послеуборочными фитопатогенами высокую эффективность показывают методы на основе использования синтетических фунгицидов, биофунгицидов, микроорганизмов-антагонистов, ультрафиолетового излучения, ионизирующего и неионизирующего излучения [10, 11, 12]. Установлено, что интеграция нескольких подходов позволяет преодолевать недостатки отдельных из них и, как следствие, обеспечивать дополнительный синергетический эффект в повышении сохранности сырья [13].

В целом, имеющиеся в научной литературе сведения показывают высокую важность использования в семеноводческом процессе сахарной свеклы, в целях формирования стабильно высоких урожаев семян современных гибридов культуры, физических и химических способов защиты посадочного материала на стадии послеуборочного хранения. Особую актуальность и значимость этот вопрос приобретает при хранении сырья в нерегулируемых условиях.

Цель исследований – определить влияние физических и химических методов оптимизации технологии хранения сырья как отдельно, так и в комплексе на сохранность посадочного материала, а также продуктивность семенных растений сахарной свеклы.

Методика. Работу выполняли в лаборатории аналитической оценки технологического качества сахарной свеклы и лаборатории семеноводства и семеноведения сахарной свеклы с механизацией семеноводческих процессов ФГБНУ «ВНИИСС им. А. Л. Мазлумова» в 2019–2021 гг. Схема опыта включала следующие варианты обработки маточных корнеплодов: без обработки (контроль); инфракрасным излучением (ИК-излучение) с использованием рефлектора Минина (синяя лампа) в экспозиции 30 с; фунгицидом Кагатник, ВРК (бензойная кислота, 300 г/л) в норме расхода препарата 0,10 л/т; фунгицидом Кагатник, ВРК (0,10 л/т) с последующей обработкой ИК-излучением (30 с); баковой смесью фунгицида Кагатник, ВРК (0,10 л/т) с поверхностно-активным веществом (ПАВ) Аллюр, Ж (0,003 л/т).

Предмет исследований – сохранность посадочного материала и продуктивность семенных растений сахарной свеклы. Объект исследований – маточные корнеплоды (масса 100...150 г) и семенные растения МС-компонента гибрида сахарной свеклы отечественной селекции РМС-127 (оригинатор ФГБНУ «ВНИИСС им. А. Л. Мазлумова»).

Обработку фунгицидом осуществляли непосредственно перед закладкой маточных корнеплодов на хранение однократно с использованием ранцевого опрыскивателя при расходе рабочей жидкости 5 л/т. Воздействие на посадочный материал ИК-излучением проводили рефлектором Минина с расстояния 50...60 см от поверхности. Источником ИК-излучения служила лампа накаливания с вольфрамовой нитью мощностью 60 Вт и длиной волны излучения 780...1000 нм со стеклянной колбой синего цвета.

Хранили маточные корнеплоды сахарной свеклы в специализированном хранилище в полипропиленовых мешках. Условия хранения нерегулируемые: температура от 10 °С при закладке и до 2...4 °С в середине и в конце хранения; относительная влажность воздуха – от 90 до 95 %. Продолжительность хранения, в среднем, 155 суток. Перед высадкой в поле проводили оценку сохранности посадочного материала, в том числе отбраковку пораженных кагатной гнилью корнеплодов. Сахаристость маточных корнеплодов определяли методом холодного водного дигерирования.

Изучение влияния последствий приемов хранения маточных корнеплодов на биологические особенности развития семенных растений сахарной свеклы и их продуктивность проводили в рамках полевого опыта. Для этого корнеплоды высаживали на опытных пространственно-изолированных участках среди посевов озимой пшеницы (2019–2020 гг.), а в 2021 г., в связи с гибелью культуры, среди посевов сои. Высадку маточных корнеплодов гибрида РМС-127 осуществляли по схеме 70×35 см при соотношении растений мужскостерильной формы (МС-компонент) и опылителя – 4:1. Такая схема предусматривала размещение, в среднем, на 1 м рядка 2,86 шт. растений МС-компонента, что обеспечило его густоту насаждения в пересчете на 1 га – 32604 шт. Общая площадь изолированного участка – 200 м², размещение вариантов – рендомизированное. Повторность опытов трехкратная.

Уборку семенных растений сахарной свеклы выполняли в фазе полной спелости (I декада августа) с использованием комбайна «Сампо-500», а доочистку вороха семян сахарной свеклы – на специализированной очистительной машине «горке». Закладку полевых опытов, фенологические наблюдения за семенными растениями сахарной свеклы, оценку их продуктивности, лабораторный анализ качества семян, статистическую обработку результатов исследований осуществляли согласно традиционным методикам и нормативным документам, применяемым в семеноводстве культуры.

Результаты и обсуждение. После продолжительного хранения наибольшие потери массы маточных корнеплодов (6,7 %) отмечали в контроле (табл. 1). Применение фунгицида Кагатник, ВРК в сочетании с ИК-излучением и в баковой смеси с ПАВ Аллюр, Ж обеспечивало минимальные в опыте потери массы – 5,1 и 4,4 %. Использование этих приемов, в сравнении с контролем, снизило степень израстания маточных корнеплодов в 3,0...3,5 раза. Содержание сахарозы в маточных корнеплодах было на 0,75...0,87 % выше, чем в контроле. Это связано с синергетическим эффектом от сочетания химических и физических способов оптимизации технологии хранения сырья, а также использования ПАВ, позволяющего ускорить проникновение активных ингредиентов фунгицида в проводящую систему растений. В результате

Табл. 1. Влияние приемов оптимизации технологии хранения маточных корнеплодов сахарной свеклы на сохранность посадочного материала (среднее за 2019–2021 гг.)

Вариант	Корнеплоды, годные к посадке, %	Корнеплоды, пораженные корневыми гнилями, %	Степень израстания, %	Потери массы, %	Сахаристость, %
Контроль	83,8	16,2	32,7	6,7	15,98
Кагатник, 0,10 л/т	86,0	14,0	12,7	5,9	16,63
ИК-излучение, 30 с	86,4	13,6	11,4	6,6	16,63
Кагатник, 0,10 л/т + ИК-излучение, 30 с	89,8	10,2	11,3	5,1	16,73
Кагатник, 0,10 л/т + ПАВ Аллюр, 0,003 л/т	91,0	9,0	9,4	4,4	16,85
НСР ₀₅	1,6	1,6	5,4	0,7	0,27

происходит инактивация ферментов, отвечающих за окислительно-восстановительные реакции, что благоприятно отражается на физиологических и биохимических процессах, происходящих в маточных корнеплодах при хранении.

При обработке маточных корнеплодов фунгицидом Кагатник, ВРК и ИК-излучением как отдельно, так и в комплексе, а также баковой смесью фунгицида с ПАВ Аллюр, Ж количество годных к весенней высадке маточных корнеплодов составляло от 86,0 до 91,0 %. Больше всего их было при опрыскивании посадочного материала баковой смесью Кагатник, ВРК с ПАВ Аллюр, Ж, а также в результате комплексной обработки Кагатник, ВРК с ИК-излучением. Это связано с уменьшением доли маточных корнеплодов, поврежденных корневыми гнилями, до 9,0 и 10,2 %. Применение отдельно фунгицида Кагатник, ВРК и ИК-излучения увеличивало выход годных к высадке корнеплодов, в сравнении с контролем (83,8 %), но существенной разницы между этими вариантами не отмечали.

Густота всходов в контроле в пересчете на 1 га высадков в среднем составляла 28626 шт. (табл. 2). Густота стояния семенных растений сахарной свеклы на фоне применения фунгицида Кагатник, ВРК совместно с ИК-излучением и в баковой смеси с ПАВ Аллюр, Ж составляла 30583 и 30876 шт./га, что было выше контроля

на 6,8 и 7,9 %. В вариантах с однократной обработкой маточных корнеплодов фунгицидом Кагатник, ВРК или ИК-излучением густота величина этого показателя была выше, чем в контроле, на 4,0 и 2,1 %. Это связано с действием фунгицида и ИК-излучения на приживаемость и развитие семенных растений сахарной свеклы в последующем. Количество не взошедших растений в вариантах опыта составляло от 5,3 до 12,2 %. Наименьшим оно было при комплексной обработке Кагатник, ВРК с ИК-излучением и Кагатник, ВРК с ПАВ Аллюр, Ж, а самым высоким – в контроле.

Наибольшее увеличение высоты семенных растений, по сравнению с контролем (88,9 см), отмечали в вариантах с применением Кагатник, ВРК с ИК-излучением – на 4,4 см (5,0 %), Кагатник, ВРК с ПАВ Аллюр, Ж – на 5,8 см (6,5 %). В вариантах с однократной обработкой маточных корнеплодов Кагатник, ВРК и ИК-излучением она была сопоставима с контролем. Стандартное отклонение (S) по высоте семенных растений в опыте составило 2,8.

Доля продуктивных биотипов семенных растений варьировала от 89,7 до 93 %. Максимальное в опыте количество непродуктивных растений, с учетом не взошедших, отмечено в контроле – 30,0 %. Комплексное применение фунгицида Кагатник, ВРК с ИК-излучением, а также баковой смеси Кагатник, ВРК с ПАВ Аллюр, Ж позволило снизить долю непродуктивных растений до 16,0 и 18,8 %, или в 2,0 и 1,6 раза, по сравнению с контролем. Растения «упрямцы», не дававшие цветоносных побегов, отмечены во всех вариантах, а их количество составляло от 4,6 до 6,4 %. Наибольшее количество «холостяков», или растений без завязи семян, зафиксировано в вариантах с применением фунгицида Кагатник, ВРК и ИК-излучения как отдельно, так и в комплексе (0,7...4,9 %). Максимальное в опыте количество (10,8 %) преждевременно усохших (больных) растений выявлено в контроле, минимальное – в вариантах с применением фунгицида Кагатник, ВРК с ИК-излучением и Кагатник, ВРК с ПАВ Аллюр, Ж – 4,5 и 5,8 %, или в 2,4 и 1,9 раза ниже, что обусловлено положительным влиянием изучаемых приемов на сохранность и качество посадочного материала. Обработка маточных корнеплодов только фунгицидом Кагатник, ВРК, а также ИК-излучением, в сравнении с контролем, позволила снизить количество преждевременно усохших семенных растений до 8,5 %, или в 1,3 раза.

В опыте основную часть составляли растения с II типом куста, которые имеют два и более развитых центральных побега, из которых один главный с ветвями второго и третьего порядка – 71,0...83,0 %. Расте-

Табл. 2. Влияние приемов оптимизации технологии хранения маточных корнеплодов на биологические особенности развития семенных растений сахарной свеклы (среднее за 2019–2021 гг.)

Показатель	Вариант					НСР ₀₅ , тыс. шт., %
	контроль	Кагатник, 0,10 л/т	ИК-излучение, 30 с	Кагатник, 0,10 л/т + ИК-излучение, 30 с	Кагатник, 0,10 л/т + ПАВ Аллюр, 0,003 л/т	
Густота насаждения растений, шт./га	28626	29767	29213	30583	30876	1,35
Невзошедшие растения, %	12,2	8,7	10,4	6,2	5,3	1,42
Средняя высота растения, см	88,9	89,1	88,8	93,3	94,7	1,21
Биотип растения, %:						
«упрямцы»	6,4	5,5	5,4	4,6	5,9	
«холостяки»	0,6	3,5	4,9	0,7	1,8	
продуктивные, в том числе	93,0	91,0	89,7	94,8	92,3	
преждевременно усохшие (больные)	10,8	8,5	8,4	4,5	5,8	
Сумма непродуктивных растений, %	30,0	26,2	29,1	16,0	18,8	
Тип куста, %:						
I	26	28	21	17	27	
II	74	71	79	83	73	
III	0	1	0	0	1	

Табл. 3. Последствие приемов обработки маточных корнеплодов перед хранением на качественные характеристики посевных фракций семян (среднее за 2019–2021 гг.)

Вариант	Выполненность, %		Энергия прорастания, %		Лабораторная всхожесть, %		Масса 1000 семян, г		Доброкачественность, %	
	фракция									
	3,5...4,5 мм	4,5...5,5 мм	3,5...4,5 мм	4,5...5,5 мм	3,5...4,5 мм	4,5...5,5 мм	3,5...4,5 мм	4,5...5,5 мм	3,5...4,5 мм	4,5...5,5 мм
Контроль	89,5	93,4	86,1	89,4	87,5	91,3	11,1	18,0	97,8	97,7
Кагатник, 0,10 л/т	86,4	92,2	82,1	85,2	83,6	89,6	11,1	17,7	96,7	97,1
ИК-излучение, 30 с	90,8	95,6	86,0	91,2	87,9	94,0	11,4	18,6	96,8	98,4
Кагатник, 0,10 л/т + ИК-излучение, 30 с	93,6	92,3	88,4	86,2	91,0	89,1	11,1	17,5	97,2	96,5
Кагатник, 0,10 л/т + ПАВ Аллор, 0,003 л/т	91,1	92,6	86,0	89,3	88,8	91,0	11,3	17,9	97,5	98,3
НСР ₀₅	1,8	0,7	1,2	2,0	1,6	1,5	0,1	0,3	0,8	0,7

ния I типа с одним главным побегом с ветвями второго и третьего порядка встречались реже – 17,0...28,0 %. Доля растений III типа с двумя и более развитыми побегами без ветвей третьего порядка не превышала 1,0 %. Это связано, прежде всего, с выбранной технологией семеноводства – высадка мелких корнеплодов-штеклингов массой до 100...150 г.

Обработка маточных корнеплодов перед хранением препаратом Кагатник, ВРК и ИК-излучением, отдельно и в комплексе повышает урожайность семенных растений сахарной свеклы. Максимальная в опыте прибавка отмечена на фоне комплексных обработок перед хранением фунгицидом Кагатник, ВРК с ИК-излучением и Кагатник, ВРК с ПАВ Аллор, Ж – 0,47 и 0,48 т/га, или 26,3 и 26,8 % соответственно. Это объясняется лучшей приживаемостью и, как следствие, большей густотой насаждения семенных растений, а также меньшей долей непродуктивных растений, по отношению к контролю.

Оценка вороха семян показала, что доли посевных фракций 3,5...4,5 мм и 4,5...5,5 мм в контрольном варианте составляли 51 и 18 %, мелкой фракции 3,0...3,5 мм – 22 % (см. рисунок). Следует отметить, что использование всех приемов обработки маточных корнеплодов перед хранением способствовало увеличению общей суммы посевных фракций семян (3,5...4,5 мм и 4,5...5,5 мм) и снижению доли мелкой фракции, по сравнению с контролем. Наибольший в опыте эффект отмечали при комплексной обработке фунгицидом Кагатник, ВРК и ИК-излучением, где сумма основных посевных фракций семян составила 76 %, что выше контроля (69 %) на 7 %.

Результаты анализа посевных характеристик основных фракций семян сахарной свеклы (3,5...4,5 мм

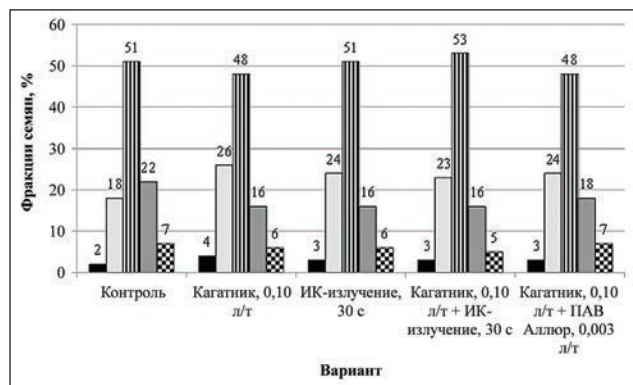
и 4,5...5,5 мм) свидетельствуют, что приемы оптимизации технологии хранения маточных корнеплодов оказывали заметное влияние на изменение их качества, по отношению к контролю. Так, за период исследований энергия прорастания и лабораторная всхожесть семян фракции 3,5...4,5 мм в контроле составляла соответственно 86,1 и 87,5 %, фракции 4,5...5,5 мм – 89,4 и 91,3 %. При этом интегральный показатель качества семян – доброкачественность, или отношение всхожих семян к выполненным, для фракции 3,5...4,5 мм был равен 97,8 %, для фракции 4,5...5,5 мм – 97,7 %. В варианте с обработкой маточных корнеплодов перед хранением фунгицидом Кагатник в сочетании с ИК-излучением у семян фракции 3,5...4,5 мм энергия прорастания и лабораторная всхожесть возрастали соответственно на 2,3 и 3,5 %, у семян фракции 4,5...5,5 мм оставались примерно такими же, как в контрольном варианте, при величине показателя доброкачественности в обоих случаях близкой к контролю (табл. 3).

Выводы. Приемы оптимизации технологии хранения маточных корнеплодов сахарной свеклы имеют определяющее значение в получении высокопродуктивного посадочного материала. Обработка маточных корнеплодов сахарной свеклы перед хранением фунгицидом Кагатник, ВРК с ИК-излучением, а также в баковой смеси с ПАВ Аллор, Ж способствует снижению израстания корнеплодов, по отношению к контролю, в 3,0...3,5 раза, а также сокращению потерь массы – в 1,3...1,5 раза.

Применение фунгицида Кагатник, ВРК с ИК-излучением и Кагатник, ВРК с ПАВ Аллор, Ж обеспечивает наибольшее снижение количества не взшедших семенных растений с 12,2 % (контроль) до 5,3...6,2 %, или в 2,0 раза. Сумма непродуктивных растений в этих вариантах опыта также уменьшилась с 30,0 % (контроль) до 16,0...18,8 %, или в 1,6...2,0 раза. В дальнейшем это обеспечило максимальную (0,47...0,48 т/га) в опыте прибавку урожая вороха семян сахарной свеклы, что было на 26,3...26,8 % выше, чем в контроле. При этом более существенно положительное влияние изучаемых приемов на качество семян проявилось на посевной фракции 3,5...4,5 мм.

Литература

- Кузьмин В. Н. Измерение уровня самообеспечения семенами основных сельскохозяйственных культур // Экономика сельского хозяйства России. 2022. № 12. С. 45–51. doi: 10.32651/2212-45.
- Кухарев О. Н., Семов И. Н., Старостин И. А. К вопросу технико-технологического обеспечения селекции и семеноводства сахарной свеклы // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. Т. 14. № 4–2 (56). С. 25–30. doi: 10.12737/2073-0462-2020-25-30.



Влияние приемов оптимизации технологии хранения маточных корнеплодов на фракционный состав вороха семян сахарной свеклы (среднее за 2019–2021 гг.):

■ – фракция более 5,5 мм; ■ – 4,5...5,5 мм; ▨ – 3,5...4,5 мм; ▩ – 3,0...3,5 мм; ▤ – менее 3,0 мм (отход).

3. Маскаленко О. А., Нековаль С. Н. Биопрепараты для защиты томата от семенной инфекции при хранении генетической коллекции // *Аграрная наука*. 2019. № S3. С. 124–126. doi: 10.32634/0869-8155-2019-326-3-124-126.
4. Мохаммед С. Р., Еськов И. Д. Использование хитозана против фомоза (гангрены) картофеля при хранении // *Аграрный научный журнал*. 2022. № 1. С. 17–21. DOI: 10.28983/asj.y2020i1pp17-21.
5. Исследование воздействия рентгеновского излучения на концентрацию восстанавливающих сахаров в картофеле и на его прорастание / В. М. Авдюхина, У. А. Ближнюк, П. Ю. Борщеговская и др. // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия*. 2018. № 3. С. 99–103.
6. Федянина Н. И., Карастоянова О. В., Коровкина Н. В. Сравнительная оценка хранимостпособности шампиньонов по показателю «текстура» после обработки УФ-излучением в диапазонах А и С // *Вестник КрасГАУ*. 2021. № 10 (175). С. 195–202. doi: 10.36718/1819-4036-2021-10-195-202.
7. Воздействие импульсным СВЧ излучением на образцы пищевой продукции с целью увеличения показателей ее микробиологической безопасности и сроков хранения / Ю. В. Гуляев, В. П. Мещанов, Б. М. Кац и др. // *Проблемы особо опасных инфекций*. 2022. № 3. С. 70–74. doi: 10.21055/0370-1069-2022-3-70-74.
8. Путилина Л. Н., Лазутина Н. А. Формирование технологического качества и продуктивности сахарной свеклы в результате действия современных фунгицидов // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2021. № 1. С. 38–51. doi: 10.36107/spfr.2021.184.
9. Защита картофеля при хранении / В. Н. Зейрук, Г. Л. Белов, С. В. Васильева и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. № 2. С. 27–31. doi: 10.53859/02352451_2022_36_2_27.
10. UV-C treatment enhances organic acids and GABA accumulation in tomato fruits during storage / L. Yan, H. Zheng, W. Liu, et al. // *Food Chem*. 2021. Vol. 15. No. 338. P. 128126. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33091993/> (дата обращения: 12.01.2023). doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128126.
11. The role of essential oils in maintaining the postharvest quality and preservation of peach and other fruits / Z. Cao, D. Zhou, X. Ge, et al. // *J Food Biochem*. 2022. Vol. 46. No. 12. e14513. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36385402/> (дата обращения: 18.01.2023). doi: 10.1111/jfbc.14513.
12. Natural plant products as effective alternatives to synthetic chemicals for postharvest fruit storage management / N. N. Chowdhury, M. N. Islam, R. Jafrin, et al. // *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2022. Vol. 25. P. 1–19. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35612470/> (дата обращения: 23.01.2023). doi: 10.1080/10408398.2022.2079112.
13. Emerging Postharvest Technologies to Enhance the Shelf-Life of Fruit and Vegetables: An Overview / M. Palumbo, G. Attolico, V. Capozzi, et al. // *Foods*. 2022. Vol. 11. No. 23. 3925. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9737221/> (дата обращения: 25.01.2023). doi: 10.3390/foods11233925.

Поступила в редакцию 25.04.2023

После доработки 20.06.2023

Принята к публикации 04.07.2023

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.