

СЕЛЕКЦИЯ И СЕМЕНОВОДСТВО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

УДК 633.111.1:58.009:58.087(470.54/.56+.58)

DOI: 10.31367/2079-8725-2025-98-3-5-12

ИЗМЕНЧИВОСТЬ МАССЫ 1000 ЗЕРЕН И УРОЖАЙНОСТИ МУТАНТНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ ЯРОВОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ (*TRITICUM AESTIVUM* L.) В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОГО ЗАУРАЛЬЯ

Н. А. Боме¹, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой ботаники, биотехнологии и ландшафтной архитектуры, bomena@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-5467-6538;
С. Салех², младший научный сотрудник лаборатории геномных исследований в растениеводстве, samuel.biotech@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0007-6907-7371;

Л. И. Вайсфельд³, главный специалист лаборатории солнечных фотопреобразователей, liv11@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-8449-3979

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный университет»,

625003, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6; e-mail: ceo@utmn.ru;

²Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья –

филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра
Сибирского отделения Российской академии наук,

625501, Тюменская обл., пос. Московский, ул. Бурлаки, д. 2; e-mail: gnu_niicx@mail.ru;

³Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля Российской академии наук,
119334, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4; e-mail: ibcp@sky.chph.ras.ru, golan@sky.chph.ras.ru

Цель исследования – определить изменчивость массы 1000 зерен мутантных образцов пятого (M_5), шестого (M_6) и седьмого (M_7) поколений яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) во взаимосвязи с другими признаками в условиях Северного Зауралья. В течение трех вегетационных периодов (2021–2023 гг.) были протестированы 29 мутантных образцов пятого (M_5), шестого (M_6) и седьмого (M_7) поколений в полевых опытах. Мутации индуцированы с помощью химического мутагена фосфемида после обработки семян сортов Скэнт 3 (Россия), Сага (Мексика) и гибрида F_4 (Сага × Скэнт 3). Были обнаружены значительные различия по массе 1000 зерен и урожайности зерна среди мутантов, превосходящих исходные формы. Высокие показатели массы 1000 зерен отмечены у перспективных мутантов по сравнению с районированными (контрольными, стандартными) сортами (Тюменская 25, Тюменская 29, Новосибирская 31). Установлена достоверная ($p < 0,05$) положительная связь массы 1000 зерен с урожайностью ($r = 0,680–0,760$), массой зерна с колоса ($r = 0,691–0,703$), высотой растений ($r = 0,478–0,586$), шириной ($r = 0,370–0,371$) и площадью ($r = 0,391$) флагового листа, числом растений ($r = 0,342$) и продуктивных побегов ($r = 0,336$) на 1 м², обратной – с длиной колосьев ($r = -0,493$) и числом зерен в колосе ($r = -0,387$). Результаты исследований изменчивости и взаимосвязи между признаками показали, что признак массы 1000 зерен может использоваться в качестве параметра отбора ценных генотипов. Мутанты, выделившиеся по крупности зерна и урожайности, с хорошими показателями белка и стекловидности представляют генетический ресурс для программ селекции яровой мягкой пшеницы в определенных агроэкологических условиях.

Ключевые слова: мутант, генотип, признак, изменчивость, корреляция.

Для цитирования: Боме Н. А., Салех С., Вайсфельд Л. И. Изменчивость массы 1000 зерен и урожайности мутантных популяций яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в условиях Северного Зауралья // Зерновое хозяйство России. 2025. Т. 17, № 3. С. 5–12. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-98-3-5-12.



VARIABILITY OF 1000-GRAIN WEIGHT AND PRODUCTIVITY OF MUTANT POPULATIONS OF SPRING COMMON WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM* L.) IN THE NORTHERN TRANS-URALS

N. A. Bome¹, Doctor of Agricultural Sciences, professor, head of the department of botany, biotechnology and landscape architecture, bomena@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-5467-6538;

S. Salekh², junior researcher of the laboratory for genomic research in plant breeding, samuel.biotech@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0007-6907-7371;

L. I. Vaisfeld³, major specialist of the photoconverter laboratory, liv11@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-8449-3979

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “University of Tyumen”, 625003, Tyumen region, Tyumen, Volodarsky Str., 6; e-mail: ceo@utmn.ru;

²Scientific Research Institute of Agriculture for Northern Trans-Urals – Branch of Federal State Institution, Federal Research Center, Tyumen Scientific Center of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 625501, Tyumen region, Moskovsky, Burlaki Str., 2; e-mail: gnu_niicx@mail.ru;

³Emanuel Institute of Biochemical Physics of RAS (IBCP RAS),
119334, Moscow, Kosygin Str., 4; e-mail: ibcp@sky.chph.ras.ru, golan@sky.chph.ras.ru

The purpose of the current study was to determine the variability of 1000-grain weight of mutant samples of the fifth (M_5), sixth (M_6) and seventh (M_7) generations of spring common wheat (*Triticum aestivum* L.) in correlation with other traits in the Northern Trans-Urals. During three growing seasons (2021–2023), 29 mutant samples of the fifth (M_5), sixth (M_6), and seventh (M_7) generations were tested in field trials. Mutations were induced using the chemical mutagen phosphemid after treating seeds of the varieties 'Scant 3' (Russia), 'Cara' (Mexico), and the hybrid F_4 ('Cara' x 'Scant 3'). There have been established significant differences in 1000-grain weight and grain productivity among mutants that exceeded the original forms. High indicators of the trait '1000-grain weight' were found in promising mutants compared to zoned (control, standard) varieties ('Tyumenskaya 25', 'Tyumenskaya 29', 'Novosibirskaya 31'). There has been identified a reliable ($p < 0.05$) positive correlation between 1000-grain weight and productivity ($r = 0.680$ – 0.760), grain weight per ear ($r = 0.691$ – 0.703), plant height ($r = 0.478$ – 0.586), width ($r = 0.370$ – 0.371) and area ($r = 0.391$) of a flag leaf, number of plants ($r = 0.342$) and productive shoots ($r = 0.336$) per 1 m^2 , and a negative correlation with length of ears ($r = -0.493$) and number of grains per ear ($r = -0.387$). The study results of variability and correlation between traits has shown that the trait '1000-grain weight' can be used as a parameter for selecting valuable genotypes. The mutants with the best grain size and productivity, with good indices protein and hardness represent a genetic resource for spring common wheat breeding programs in certain agroecological conditions.

Keywords: mutant, genotype, trait, variability, correlation.

Введение. Пшеница является одной из важнейших основных культур и составляет около 21 % мирового производства продовольственных видов растений (FAOSTAT, 2021). Получение стабильной урожайности с хорошим качеством зерна пшеницы в условиях с резкими колебаниями гидротермических показателей в период вегетации достигается подбором и созданием сортов с высокой экологической пластичностью с учетом агроэкологических факторов (Евдокимов и др., 2020).

В условиях меняющегося климата является актуальным увеличение генетического разнообразия сельскохозяйственных растений с целью получения форм с высокой адаптационной способностью по отношению к абиотическим и биотическим факторам окружающей среды. С помощью физического и химического мутагенеза по различным видам растений создано 3432 сорта, задокументированных в базе данных МАГАТЭ (IAEA, 2023), из них к официальному выпуску в 2023 году предложено 275 мутантных сортов пшеницы. Мутационная селекция рассматривается как относительно быстрый, эффективный и проверенный подход в создании платформы для отбора генотипов с новыми или улучшенными полезными признаками. Однако для получения высокой частоты и спектра мутаций необходим поиск новых мутагенов с разработкой технологии их применения на растениях (Ренгартен, 2022). В данной работе изучается мутагенный эффект химического мутагена фосфемид.

Цель исследования – определить изменчивость массы 1000 зерен мутантных образцов пятого (M_5), шестого (M_6) и седьмого (M_7) поколений яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) во взаимосвязи с другими признаками в условиях Северного Зуралья.

Материалы и методы исследований. Исследование провели в вегетационные периоды 2021–2023 гг. на экспериментальном участке биостанции «Озеро Кучак» (57°20'57.3"N 66°03'21.8"E, Тюменская область, Нижнетавдинский район) и в лаборатории биотехнологи-

ческих и микробиологических исследований Школы естественных наук Тюменского государственного университета. Почва участка дерново-подзолистая, супесчаная, содержание гумуса составляет 3,67 %, pH 6,6.

Объекты опытов – 29 мутантных образцов пятого (M_5), шестого (M_6) и седьмого (M_7) поколений, полученных с помощью химического мутагена фосфемид. Семена двух сортов – Скэнт 3 (Россия), Cara (Мексика) и гибрида от скрещивания этих сортов в четвертом (F_4) поколении были обработаны раствором мутагена в концентрациях 0,01 и 0,002 % (экспозиция 3 ч). Фосфемид (phosphemidum), или ди-(этиленмид)пиримидил-2-амидофосфорная кислота, – белый или желтоватый кристаллический порошок, молекулярная масса 137,1 г/моль, растворимый в воде и спирте.

Биологический эффект фосфемиды был доказан полученным спектром мутаций, что позволило выделить и отобрать из мутантных популяций ценные генотипы по ряду хозяйственно-ценных признаков: раннеспелые ($n = 6$), позднеспелые ($n = 3$), пирамидальный колос ($n = 2$), спельтоидный колос ($n = 1$), крупный колос ($n = 3$), желтая окраска соломины и колоса ($n = 4$), высокорослые, устойчивые к полеганию ($n = 2$), широкий флаговый лист ($n = 5$), прочная соломина ($n = 3$). По результатам тестирования мутантных популяций во втором (M_2) и третьем (M_3) поколениях были выявлены образцы, превосходящие по изученным признакам исходные сорта и гибрид. Сравнение мутантных образцов пятого (M_5), шестого (M_6) и седьмого (M_7) поколений выполнено с районированными в Тюменской области сортами и взятыми в качестве стандартов (Тюменская 25, Тюменская 29 и Новосибирская 31).

Полевое испытание было проведено в соответствии с методическими указаниями Всероссийского института генетических ресурсов им. Н. И. Вавилова на делянках с учетной площадью 1 m^2 , глубина посева семян 5–6 см, междурядье 20 см, число высеванных семян – 650 шт./1 m^2 (из расчета 6,5 млн всхожих семян/га), повторность четырехкратная. Посев

выполняли в первой половине мая: 10.05.2021 г.; 07.05.2022 г.; 15.05.2023 г. с помощью сеялки точного высева Wintersteiger Rowseed 1R (Австрия), уборку растений – вручную в фазу полной спелости зерна. Содержание общего хлорофилла в клетках флагового листа измеряли с помощью прибора Spad 502 («Minolta Camera Co, Ltd», Япония). Урожайность рассчитывали после обмолота колосьев на молотилке (Wintersteiger LD 180, Австрия), очистки и взвешивания. Массу 1000 зерен определяли по ГОСТ 10842-89 с предварительным подсчетом на автоматическом счетчике Wintersteiger Seed Count S-25+ (DATA Detection Technologies, Австрия). Для оценки зерна по стекловидности использовали диафаноскоп ДСЗ-2 (ГОСТ 10987-76). Содержание белка в зерне определяли методом Кельдаля (ГОСТ 10846-91) в Аналитическом центре по определению качества почвы и растениеводческой продукции ТОО «НПЦ ЗХ им. А.И. Бараева» (Казахстан).

Для статистической обработки полученных данных использовали апробированные методики, табличный процессор Microsoft Excel и программное обеспечение STATISTICA 6.0 («StatSoft», Inc., США). Рассчитывали средние значения ($\bar{x}$), ошибки средних (S_x), коэффициент вариации (CV, %), достоверности различий между средними значениями вариантов с использованием t-критерия Стьюдента; выполняли дисперсионный и корреляционный анализ.

Анализ погодных условий в период вегетации растений проводили на основе метеоданных, полученных с датчиков профессиональной локальной метеостанции IMetos IMT300 («Pessl Instruments», Австрия). Гидротермический ко-

эффициент Г.Т. Селянинова (ГТК) рассчитывали по формуле:

$$\text{ГТК} = \frac{R}{0,1} \cdot \sum t,$$

где R – сумма осадков за месяц, мм; $\sum t$ – сумма среднесуточных значений температуры воздуха больше 10 °C.

Отмечено неравномерное распределение осадков в каждый вегетационный период исследования, а также при сравнении со средними многолетними значениями. В 2021 г. в течение периода май–август наблюдался значительный недостаток осадков, рост и развитие растений от всходов до налива и созревания зерна проходили в условиях атмосферной и почвенной засухи (ГТК = 0,1–0,9). Вегетационный период 2022 г. характеризовался относительно благоприятными условиями по влаго- и теплообеспеченности в мае (посев и формирование всходов, ГТК = 1,1). Недостаток влаги наблюдался при прохождении растениями фенологической фазы «выход в трубку» (июнь, ГТК = 0,8) и в период налива и созревания зерна (август, ГТК = 0,5). В 2023 г. начальные этапы онтогенеза протекали в условиях водного и теплового стресса (ГТК = 0,2).

В наиболее засушливый из трех вегетационных периодов 2021 г. (с меньшим по сравнению с нормой количеством осадков и высокими значениями среднесуточной температуры воздуха) у мутантных образцов и стандартных сортов яровой пшеницы отмечено более быстрое наступление фенологических фаз развития, также ускорялось прохождение периодов – от посева до колошения и от колошения до спелости зерна (табл. 1).

Таблица 1. Фенологические характеристики роста и развития яровой пшеницы в контрастных условиях вегетационных периодов 2021–2023 годов
Table 1. Phenological characteristics of growth and development of spring wheat in contrasting conditions of the vegetation periods of 2021–2023

Год*	Среднесуточная температура воздуха $\bar{x}$ (°C)	Сумма осадков Σ (мм)	Период «посев – колошение» $\bar{x}$ (сутки)	Период «колошение – спелость» $\bar{x}$ (сутки)
2021	18,4	96,6	51,0	29,5
2022	16,5	195,2	59,8	36,8
2023	17,3	267,8	52,0	33,4
n**	16,0	251,0	–	–

Примечание. * – вегетационный период (май – август); ** – средние многолетние значения осадков и среднесуточной температуры воздуха (условная норма).

В 2022 г. при увеличении количества осадков на фоне пониженной температуры в июне и июле изученным образцам пшеницы потребовалось более длительное время для достижения полной спелости.

Результаты и их обсуждение. Урожайность зерна пшеницы является сложным количественным признаком, который может значительно варьировать под воздействием различных факторов окружающей среды. В работе, выполненной в условиях Республики Тыва, вы-

явлена положительная корреляция урожайности и массы 1000 зерен яровой пшеницы с гидротермическим коэффициентом июня и июля (Донгак, 2024). В связи с этим, отбор ценных генотипов эффективен, если в селекционном материале существует адекватная генетическая изменчивость (Miao et al., 2022).

В нашем исследовании отмечены высокие диапазоны варьирования урожайности как при сравнении средних значений по годам, так и между образцами в пределах каждо-

го года. Самая низкая урожайность у мутантов и контрольных сортов получена в засушливом 2021 г., при сравнении с 2022 и 2023 гг. различия достоверны (табл. 2).

В работах ряда авторов (Chowdhry et al., 2020; Li et al., 2022) показано, что масса 1000 зерен – один из основных признаков, определя-

ющих урожайность пшеницы. Более крупное зерно мутантные образцы и районированные сорта яровой пшеницы формировали в относительно благоприятных метеорологических условиях вегетационного периода 2023 г. (табл. 2).

Таблица 2. Сравнительный анализ мутантных образцов и стандартных сортов яровой пшеницы по массе 1000 зерен и урожайности (2021–2023 гг.)
Table 2. Comparative analysis of mutant samples and standard varieties of spring wheat according to 1000-grain weight and productivity (2021–2023)

Год	Признак	Мутанты				Сорта-стандарты	
		min	max	$\bar{X} \pm Sx$	CV, %	$\bar{X} \pm Sx$	CV, %
2021	Масса 1000 зерен, г	10,4	39,9	27,0 $\pm$ 1,20	26,29	32,3 $\pm$ 2,43	13,07
	Урожайность, г/м ²	7,5	161,3	86,5 $\pm$ 8,08	55,34	128,7 $\pm$ 23,30	31,36
2022	Масса 1000 зерен, г	17,4	38,6	29,75 $\pm$ 1,13	22,44	33,7 $\pm$ 3,48	17,89
	Урожайность, г/м ²	126,5	588,7	278,9 $\pm$ 19,49*	41,35	382,6 $\pm$ 42,45*	19,21
2023	Масса 1000 зерен, г	29,4	43,1	36,0 $\pm$ 0,58*	9,62	35,0 $\pm$ 2,83*	14,04
	Урожайность, г/м ²	100,2	414,4	235,5 $\pm$ 14,12*	35,47	305,8 $\pm$ 56,64*	32,08

Примечание. CV – коэффициент вариации; $\bar{X} \pm Sx$ – среднее значение признака и ошибка среднего. Достоверные отличия по годам $P < 0,05$: * урожайность 2021–2022, 2021–2023; • – масса 1000 зерен 2023–2021, 2023–2022.

В засушливом 2021 г. показатель массы 1000 зерен снижался по сравнению с 2022 г. на 10,2 % у мутантных образцов, на 4,3 % – у сортов, взятых в качестве стандартов, по сравнению с 2023 г. – на 33,3 и 8,4 % соответственно. Следует отметить, что в 2023 г. между средними значениями массы 1000 зерен мутантных генотипов и стандартных сортов достоверных различий не обнаружено, в другие вегетационные периоды данный показатель был выше у стандартов. Степень изменчивости признака у мутантов была слабой в 2023 г. и высокой в два других года исследований, у стандартов – средняя.

В соответствии с Международным классификатором СЭВ рода *Triticum* L. в засушливом 2021 г. по крупности зерна большинство образцов вошли в две группы с массой 1000 зерен: очень малой (10,4–28,2 г) – 22 образца (62,8 %), и малой – 12 образцов (34,3 %); и только один мутантный образец (2,9 %) соответствовал средней крупности (39,9 г).

В стрессовых условиях выделились четыре мутантных образца под номерами 18, 19, 20 (получены на основе сорта Скэнт 3, концентрация мутагена 0,002 %) и номером 26 (на основе сорта Сара, 0,01 %) с массой 1000 зерен 35,8–38,6 г (стандарты 27,6–35,8 г).

В более благоприятных условиях вегетации 2022 г. в группах с очень малой (17,4–29,4 г) и малой (31,3–37,8 г) массой 1000 зерен было 18 (51,4 %) и 17 (48,6 %) номеров соответственно.

У 10 мутантов получено зерно с массой 1000 зерен 35,8–38,6 г, при варьировании этого признака у стандартов от 26,8 до 37,8 г. В данной группе три образца получены после обработки семян сорта Сара раствором с концентрацией фосфемиды 0,01 % (номера 4 и 11) и 0,002 % (номер 32), четыре образца (номера 16, 17, 18, 20) – на основе сорта Скэнт 3 (0,002 %) и три об-

разца (номера 26, 27, 29) – на основе сорта Сара (0,01 %).

Зерно урожая 2023 г. характеризовалось более высокими показателями массы 1000 зерен по сравнению с двумя предыдущими вегетационными периодами. Согласно международному классификатору, увеличилась доля образцов с малой (31,4–38,2 г) и средней (38,4–43,1 г) массой 1000 зерен – 62,7 % и 25,9 % соответственно, у четырех образцов (11,4 %) отмечен наименьший показатель – 29,4–30,4 г.

Выделились четыре образца (номера 1, 9, 23, 31) с максимальным значением признака – 40,2–43,1 г, у стандартов – 29,4–38,7 г. Из них образец под номером 1 – исходный сорт Сара не подвергался мутагенному воздействию, два образца отобраны из мутантной популяции сорта Скэнт 3 (0,002 и 0,01 %), один – из популяции сорта Сара (0,002 %). Следует отметить, что масса 1000 зерен у остальных изученных образцов была 30 г и более, за исключением стандартного сорта Новосибирская 31 – 29,4 г и мутанта (8) Р1 (0,002 %) Сара – 29,9 г.

Для снижения варьирования урожайности пшеницы в различных условиях окружающей среды важное агрономическое значение имеют стабильные показатели крупности зерна (Кинчаров и др., 2020).

Широкий диапазон варьирования массы 1000 зерен у мутантных образцов увеличивает возможности отбора ценных генотипов яровой пшеницы по данному признаку во взаимосвязи с продуктивностью. На основе сравнительного анализа зерна, выращенного в контрастных погодных условиях, к числу перспективных отнесли мутанты яровой пшеницы толерантные к воздействию неблагоприятных факторов по признаку массы 1000 зерен и обеспечившие хороший урожай (табл. 3).

Таблица 3. Масса 1000 зерен и урожайность некоторых мутантов и районированных сортов яровой пшеницы в различных условиях вегетации
Table 3. 1000-grain weight and productivity of some mutants and zoned varieties of spring wheat in different growing conditions

Образец	2021 год	2022 год	2023 год	Среднее 2021–2023 годы	CV, %
Масса 1000 зерен, г					
Тюменская 25	35,8	37,8	38,7	37,4±0,86	3,97
Тюменская 29	33,4	36,6	36,8	35,6±1,10	5,36
Новосибирская 31	27,6	26,8	29,4	27,9±0,77	4,77
(4) F4 (0,01%) Сага х Скэнт 3	20,3	37,7	32,8	30,3±5,18	29,64
(5) F4 (0,01%) Сага х Скэнт 3	23,8	22,3	31,4	25,8±2,82*	18,89
(16) P2 (0,002%) Скэнт 3	33,8	37,5	38,7	36,7±1,47°	6,97
(17) P2 (0,002%) Скэнт 3	34,5	35,5	36,8	35,6±0,67°	3,24
(18) P2 (0,002%) Скэнт 3	37,8	35,8	37,2	36,9±0,59°	2,78
(20) P2 (0,002%) Скэнт 3	39,9	35,8	37,7	37,8±1,18°	5,43
(26) P1 (0,01%) Сага	35,8	37,3	36,3	36,5±0,44°	2,09
(29) P1 (0,01%) Сага	31,4	37,2	38,2	35,6±2,12°	10,31
НСР ₀₅	–	–	–	2,81	–
Урожайность, г/м ²					
Тюменская 25	161,3	464,2	414,4	346,6±93,78	46,86
Тюменская 29	141,2	362,3	279,4	260,9±64,49	42,80
Новосибирская 31	83,5	321,4	223,6	209,5±69,04	57,08
(4) F4 (0,01%) Сага х Скэнт 3	115,6	588,7	335,3	346,5±136,7	68,32
(5) F4 (0,01%) Сага х Скэнт 3	109,4	412,8	364,6	295,6±94,13	55,16
(16) P2 (0,002%) Скэнт 3	146,3	351,6	324,2	274,0±64,35	40,68
(17) P2 (0,002%) Скэнт 3	152,3	428,3	295,5	292,0±79,69	47,27
(18) P2 (0,002%) Скэнт 3	124,6	345,0	259,3	243,2±64,17	45,71
(20) P2 (0,002%) Скэнт 3	104,5	405,3	316,8	275,5±89,25	56,10
(26) P1 (0,01%) Сага	112,9	298,7	356,3	256,0±73,44	49,69
(29) P1 (0,01%) Сага	112,8	395,6	225,8	244,7±82,18	58,16
НСР ₀₅	–	–	–	50,8	–

Примечание. F₄ – гибрид четвертого поколения от скрещивания двух исходных сортов: Сага (P1) и Скэнт 3 (P2). В скобках указаны номер образца и концентрация фосфемиды. CV – коэффициент вариации. Достоверные отличия от стандартов $P \leq 0,05$: *Тюменская 25, /Тюменская 29, Новосибирская 31.

Признак массы 1000 зерен характеризовался стабильностью по годам исследования у стандартных сортов и шести мутантных образцов. У двух мутантов – (4) F4 (0,01 %) Сага х Скэнт 3 и (5) F4 (0,01 %) Сага х Скэнт 3 при близких значениях за два года отмечены существенные отличия в третий год. Анализ данного признака по годам и в сравнении с сортами стандартами показал, что в 2021 г. два мутанта (18) P2 (0,002 %) Скэнт 3 и (20) P2 (0,002 %) Скэнт 3 достоверно превосходили лучший стандарт Тюменская 25, мутант (26) P1 (0,01%) Сага был на уровне с ним. Два мутанта (16) P2 (0,002 %) Скэнт 3 и (29) P1 (0,01 %) Сага были на уровне лучшего стандарта Тюменская 25 в 2022 и 2023 гг., (26) P1 (0,01 %) Сага – в 2021 и 2022 годах.

В среднем за три года исследования масса 1000 зерен составила у восьми мутантных образцов 25,8–37,8 г, при этом шесть из них были на уровне или превышали лучшие стандартные сорта Тюменская 25 и Тюменская 29. Вариабельность признака была слабой у районированных сортов и большинства мутантов, за исключением образцов (4) F4 (0,01 %) Сага х Скэнт 3 и (5) F4 (0,01 %) Сага х Скэнт 3. Увеличение вариабельности у этих мутан-

тов связано со значительным снижением массы 1000 зерен под влиянием стресс-факторов в 2021 году. В то же время максимальные значения признака (31,4–37,7 г) во взаимосвязи с урожайностью позволяют говорить о высоком потенциале этих генотипов.

Урожайность зерна выделенных мутантов пшеницы в среднем за три года составила 244,7–346,5 г/м²; стандартных сортов – 209,5–346,6 г/м². Значительное снижение урожайности отмечено в засушливом 2021 г., что связано с совпадением периодов цветения и формирования зерновок с высокой температурой воздуха и недостатком осадков. Максимальная урожайность 405,3–588,7 г/м² получена у двух мутантов (номера 4, 5), созданных на основе гибрида Сага х Скэнт 3, и двух (номера 17, 20) – на основе сорта Скэнт 3.

Вариабельность средних показателей за три года была высокой как у мутантов, так и стандартов. Урожайность существенно зависела от метеорологических факторов, что подтверждается значениями коэффициента вариации. В то же время выявленные различия между образцами отражают роль генотипа в формировании зерновой продуктивности.

Для оптимального выбора ценных генотипов очень важно, чтобы зерно характеризовалось высокими показателями не только урожайности, но и качества. Учитывая, что максимальная урожайность была получена в 2022 г., провели сравнительный анализ мутантных и стандартных образцов по содержанию белка в зерне. В целом по изученным образцам признак изменялся от 13,05 до 16,38 % при среднем значении $14,57 \pm 0,69$ %. У контрольных сортов количество белка составило: Тюменская 25 – 14,56 %, Тюменская 29 – 13,35 %, Новосибирская 31 – 15,17 %. Зерно перспективных мутантных образцов содержало белка 13,65–14,87 %, что по классификации ГОСТ 43702-2020 соответствовало сильной пшенице или улучшителю.

Стекловидность – один из основных параметров качества, характеризующий прочность связи «крахмал – белок» и определяющий дальнейшую переработку зерна. Наиболее благоприятные условия для формирования стекловидного зерна складывались в вегетационный период 2023 года. У мутантных образцов показатель стекловидности изменялся от 68,8 до 85,7 %, у сортов Тюменская 25, Тюменская 29, Новосибирская 31 составил 73,5; 66,8 и 75,6 % соответственно. При сравнении с лучшим стандартом зерно трех мутантов – (5) F4 (0,01 %) Сага х Скэнт 3; (16) P2 (0,002%) Скэнт 3; (18) P2 (0,002%) Скэнт 3 – характеризовалось более высокими показателями стекловидности (85,7; 81,8 и 80,9 % соответственно). Образцы под номерами 5, 20, 26 были на уровне с сортом Новосибирская 31.

Для понимания взаимосвязей между массой 1000 зерен и другими признаками генотипов яровой пшеницы в контрастных условиях вегетации 2021–2023 гг. был выполнен корреляционный анализ. Установлено, что сила связи между массой 1000 зерен и урожайностью изменялась от слабой в 2023 г. ($r = 0,290$, $p > 0,05$) до высокой в 2021 г. ($r = 0,680$; $p < 0,05$) и 2022 г. ($r = 0,760$; $p < 0,05$).

Известно, что формирование технологических свойств зерна пшеницы зависит от целого ряда факторов, под воздействием которых происходят рост и развитие растений. В работе Е. В. Агеевой с соавторами (2021) показано, что в условиях лесостепи Приобья существенный вклад в урожайность яровой пшеницы вносят масса зерна с колоса и масса 1000 зерен. Авторы отмечают необходимость выявления для селекционных программ источников с хорошей выраженностью данных признаков.

Анализ взаимосвязи между признаками массы 1000 зерен и массы зерна с колоса выявил высокую корреляцию в 2021 г. ($r = 0,703$, $p < 0,05$) и 2022 г. ($r = 0,691$, $p < 0,05$). Ослабление силы и характера связи в 2023 г. ($r = -0,069$, $p > 0,05$) может быть связано с меньшим диапазоном изменчивости массы зерна с колоса у изученных образцов, что подтверждается коэффициентом вариации – 18,31 % в 2023 г.

против 28,88 % в 2022 г. и 49,23 % в 2021 году. Среднее значение продуктивности одного колоса в среднем по образцам в годы исследования составило $0,42 \pm 0,21$, $0,91 \pm 0,26$ и $1,25 \pm 0,23$ г соответственно.

Установлена положительная средняя связь массы 1000 зерен с высотой растений в фазу колошения во все вегетационные периоды 2021–2023 гг. ($r = 0,561$, $p < 0,05$; $r = 0,586$, $p < 0,05$; $r = 0,478$, $p < 0,05$ соответственно). Почти равное значение коэффициентов корреляции по годам показало, что высота растений имела положительное и прямое влияние на крупность зерна в разных условиях выращивания. В засушливых условиях (2021 г.) растения пшеницы были низкорослыми ($32\text{--}72$ см), среднее значение по образцам составило $55,7 \pm 12,54$ см ($CV = 22,53$ %), в два других вегетационных периода (2022, 2023 гг.) – $76,3 \pm 13,93$ и $68,5 \pm 14,75$ см ($CV = 18,25$ %, $CV = 21,55$ % соответственно).

Отмечено положительное средней силы влияние на массу 1000 зерен в 2021 и 2022 гг. ширины ($r = 0,370$, $r = 0,371$, $p < 0,05$), в 2022 г. площади ($r = 0,391$, $p < 0,05$) флагового листа. С длиной флагового листа корреляция во все годы исследования была недостоверной. Метеорологические факторы наиболее благоприятно для формирования листовой поверхности растений пшеницы складывались в 2022 году. По длине ($16,3 \pm 3,53$ см), ширине ($12,1 \pm 1,35$ мм), площади ($14,2 \pm 2,26$ см²) флагового листа превышение над средними значениями 2021 и 2023 гг. составило 19,0–33,1; 19,8–29,8 и 38,7–54,9 % соответственно.

Прямая связь крупности зерна с содержанием хлорофилла в клетках флагового листа в фазу колошения растений, выявленная в засушливом 2021 г. ($r = 0,192$, $p > 0,05$), в последующие годы ослабевает и становится обратной ($r = -0,060$, $p > 0,05$; $r = -0,124$, $p > 0,05$). Количество пигмента составило $46,8 \pm 3,38$; $43,9 \pm 2,94$; $40,9 \pm 5,58$ ед. Spad.

Длина колоса является важным компонентом урожайности пшеницы, так как на колосе с большей длиной формируется больше колосков и соответственно зерен. По нашим данным связь между массой 1000 зерен и длиной колоса за весь период исследования была обратной, достоверной в 2023 г. ($r = -0,493$, $p < 0,05$). Длина колосьев изученных образцов варьировала от 5 см (2021 г.) до 13 см (2023 г.) при средних значениях $6,0 \pm 1,00$ см и $8,4 \pm 1,84$ см; степень изменчивости признака увеличивалась в 2023 г. ($CV = 21,81$ %) против $CV = 11,62\text{--}16,64$ % в другие годы.

Обнаружена средняя сопряженность массы 1000 зерен в 2021 г. ($r = 0,342$, $p < 0,05$) и слабая в 2022 и 2023 гг. ($r = 0,165$, $p > 0,05$; $r = 0,191$, $p > 0,05$) с выживаемостью растений в течение вегетационного периода и числом продуктивных побегов на 1 м² в фазе полной спелости зерна ($r = 0,336$, $p < 0,05$; $r = 0,209$, $p > 0,05$; $r = 0,219$, $p > 0,05$ соответственно). По усредненным данным, наибольшее число продуктивных побегов

отмечено в 2022 г. ($358 \pm 60,5$ шт./1 м²) при варьировании признака от 253 до 524 шт./1 м².

Выводы. Наши результаты показали, что увеличение генетического разнообразия яровой мягкой пшеницы с помощью химического мутагена фосфемида может снизить неблагоприятное воздействие стресс-факторов на показатели массы 1000 зерен и урожайности.

Выявленные положительные связи массы 1000 зерен с другими селекционно-ценными признаками (урожайность, масса зерна с колоса, высота растений, выживаемость, число побегов на 1 м², ширина и площадь флагового листа), а также диапазоны варьирования признаков в пределах мутантных популяций позволяют рассматривать возможность эф-

фективного отбора ценных генотипов яровой пшеницы с учетом определенных агроклиматических условий.

Генотипы яровой мягкой пшеницы ((18) P2 (0,002 %) Скэнт 3; (20) P2 (0,002 %) Скэнт 3; (26) P1 (0,01 %) Cara), способные формировать высокую массу 1000 зерен и урожайность при недостатке влаги на фоне повышенных температур воздуха (2021 г.), могут обладать высоким уровнем устойчивости к засухе.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FEWZ-2021-0007 «Адаптивная способность сельскохозяйственных растений в экстремальных условиях Северного Зауралья».

Библиографический список

1. Агеева Е. В., Леонова И. Н., Лихенко И. Е., Советов В. В. Масса зерна колоса и масса тысячи зерен как признаки продуктивности у сортов яровой мягкой пшеницы разных групп спелости в условиях лесостепи Приобья // Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021. № 7(1). С. 5–11. DOI: 10.18699/LettersVJ2021-7-0
2. Донгак М. С. М. Влияние гидротермического режима на урожайность яровой пшеницы в условиях Республики Тыва // Вестник КрасГАУ. 2024. № 10. С. 10–15. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-10-10-15
3. Евдокимов М. Г., Юсов В. С., Пахотина И. В. Зависимость урожайности и качества зерна твердой яровой пшеницы от метеорологических факторов в южной лесостепи Западной Сибири // Зерновое хозяйство России. 2020. № 5. С. 26–31. DOI: 10.31367/2079-8725-2020-71-5-26-31
4. Кинчаров А. И., Таранова Т. Ю., Демина Е. А., Чекмасова К. Ю. Селекционная оценка признака «масса 1000 зерен» в засушливых условиях // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 7–12.
5. Ренгартен Г. А. Использование химического мутагенеза в селекции растений в России и за рубежом // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 4. С. 42–46.
6. Chowdhry M. A., Ali M., Subhani G. M., Khaliq I. Path Coefficient Analysis for Water Use Efficiency, Evapo-Transpiration Efficiency, Transpiration Efficiency and Some Yield Related Traits in Wheat // Pakistan Journal of Biological Sciences. 2000. Vol. 3, P. 313–317. DOI: 10.3923/pjbs.2000.313.317
7. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Food and agriculture organization of the United Nations (Rome, Italy). 2021. URL: <http://faostat.fao.org/> (дата обращения: 20.02.25).
8. IAEA International Atomic Energy Agency (Mutant Varieties Database). IAEA. 2023. URL: <https://nucleus.iaea.org/> (дата обращения: 05.02.25).
9. Li Y., Hou R., Liu X., Chen Y., Tao F. Changes in wheat traits under future climate change and their contributions to yield changes in conventional vs. conservation tillage systems // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 815, Article number: 152947. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.152947
10. Miao Y., Jing F., Ma J., Liu Y., Zhang P., Chen T., Che Z., Yang D. Major genomic regions for wheat grain weight as revealed by QTL linkage mapping and meta-analysis. // Front. Plant Sci. 2022. Vol. 13, DOI: 10.3389/fpls.2022.802310

References

1. Ageeva E. V., Leonova I. N., Likhenco I. E., Sovetov V. V. Massa zerna kolosa i massa tysyachi zeren kak priznaki produktivnosti u sortov yarovoi myagkoi pshenitsy raznykh grupp spelosti v usloviyakh lesostepi Priob'ya [Grain weight per ear and 1000-grain weight as productivity traits in spring common wheat varieties of different maturity groups in the Ob forest-steppe] // Pis'ma v Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii. 2021. № 7(1). S. 5–11. DOI: 10.18699/LettersVJ2021-7-0
2. Dongak M. S. M. Vliyanie gidrotermicheskogo rezhima na urozhainost' yarovoi pshenitsy v usloviyakh Respubliki Tyva [The effect of hydrothermal regime on spring wheat productivity in the Republic of Tyva] // Vestnik KrasGAU. 2024. № 10. S. 10–15. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-10-10-15
3. Evdokimov M. G., Yusov V. S., Pakhotina I. V. Zavisimost' urozhainosti i kachestva zerna tverdoi yarovoi pshenitsy ot meteorologicheskikh faktorov v yuzhnoi lesostepi Zapadnoi Sibiri [Dependence of productivity and grain quality of spring durum wheat on meteorological factors in the southern forest-steppe of Western Siberia] // Zernovoe khozyaistvo Rossii. 2020. № 5. S. 26–31. DOI: 10.31367/2079-8725-2020-71-5-26-31
4. Kincharov A. I., Taranova T. Yu., Demina E. A., Chekmasova K. Yu. Selektionnaya otsenka priznaka massa 1000 zeren v zasushlivykh usloviyakh [Breeding estimation of the trait '1000-grain weight' in arid conditions] // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2020. № 5. S. 7–12.
5. Rengarten G. A. Ispol'zovanie khimicheskogo mutageneza v selektsii rastenii v Possii i za rubezhom [mutagenesis in plant breeding in Russia and abroad] // Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii. 2022. № 4. S. 42–46.
6. Chowdhry M. A., Ali M., Subhani G. M., Khaliq I. Path Coefficient Analysis for Water Use Efficiency, Evapo-Transpiration Efficiency, Transpiration Efficiency and Some Yield Related Traits in Wheat // Pakistan Journal of Biological Sciences. 2000. Vol. 3, P. 313–317. DOI: 10.3923/pjbs.2000.313.317

7. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Food and agriculture organization of the United Nations (Rome, Italy). 2021. URL: <http://faostat.fao.org/> (data obrashcheniya: 20.02.25).
8. IAEA International Atomic Energy Agency (Mutant Varieties Database). IAEA. 2023. URL: <https://nucleus.iaea.org/> (data obrashcheniya: 05.02.25).
9. Li Y., Hou R., Liu X., Chen Y., Tao F. Changes in wheat traits under future climate change and their contributions to yield changes in conventional vs. conservation tillage systems // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 815, Article number: 152947. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.152947
10. Miao Y., Jing F., Ma J., Liu Y., Zhang P., Chen T., Che Z., Yang D. Major genomic regions for wheat grain weight as revealed by QTL linkage mapping and meta-analysis. // Front. Plant Sci. 2022. Vol. 13, DOI: 10.3389/fpls.2022.802310

Поступила: 04.03.25; доработана после рецензирования: 31.03.25; принята к публикации: 09.04.25.

Критерии авторства. Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад. Боме Н. А. – концептуализация, проектирование исследования, выполнение полевых опытов, анализ и интерпретация данных, подготовка рукописи. Салех С. – выполнение полевых опытов, сбор и статистическая обработка экспериментальных данных, подготовка рукописи. Вайсфельд Л. И. – анализ литературных источников, обобщение и интерпретация данных, подготовка рукописи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.