

## СЕЛЕКЦИЯ, СЕМЕНОВОДСТВО И БИОТЕХНОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ / PLANT BREEDING, SEED PRODUCTION AND BIOTECHNOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.29>ОЦЕНКА СВЯЗИ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНА С ВЫСОТОЙ РАСТЕНИЙ МУТАНТНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ ЯРОВОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ (*TRITICUM AESTIVUM L.*) В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОГО ЗАУРАЛЬЯ

Научная статья

Салех С.<sup>1</sup>, Боме Н.А.<sup>2</sup>, Королев К.П.<sup>3,\*</sup><sup>3</sup>ORCID : 0000-0001-9595-3493;<sup>1,2,3</sup>Тюменский Государственный университет, Тюмень, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (corolev.konstantin2016[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Выявлены различия между мутантными формами пятого (M<sub>5</sub>), шестого (M<sub>6</sub>), седьмого (M<sub>7</sub>) поколений и стандартными сортами яровой мягкой пшеницы по изменчивости признака высоты растений в фазе колошения и урожайности зерна в течение трех вегетационных периодов 2021-2023 гг. под влиянием климатических условий Северного Зауралья. Показано, что химический мутаген фосфемид вызывает полезные мутации, повышающие адаптацию растений к метеорологическим факторам (среднесуточная температура воздуха, количество осадков). Положительное действие мутагена фосфемид подтверждается также широким диапазоном изменчивости изученных признаков. Обнаружена прямая связь между урожайностью изученных образцов и высотой растений, степень которой зависит от факторов окружающей среды и генотипа. Зависимость урожайности от высоты растений увеличивается при недостаточной влагообеспеченности и высокой температуре воздуха.

**Ключевые слова:** мутант, фосфемид, урожайность, корреляция, высота растения.

AN EVALUATION OF THE RELATIONSHIP OF GRAIN YIELD WITH PLANT HEIGHT OF MUTANT POPULATIONS OF SPRING SOFT WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM L.*) IN CONDITIONS OF NORTHERN TRANS-URALS

Research article

Saleh S.<sup>1</sup>, Bome N.A.<sup>2</sup>, Korolev K.P.<sup>3,\*</sup><sup>3</sup>ORCID : 0000-0001-9595-3493;<sup>1,2,3</sup>University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

\* Corresponding author (corolev.konstantin2016[at]yandex.ru)

**Abstract**

Differences between mutant forms of the fifth (M<sub>5</sub>), sixth (M<sub>6</sub>), seventh (M<sub>7</sub>) generations and standard varieties of spring soft wheat on variability of plant height at the earing phase and grain yield during three growing seasons 2021-2023 under the influence of climatic conditions of the Northern Trans-Urals have been determined. It is demonstrated that the chemical mutagen phosphemide causes beneficial mutations that increase the adaptation of plants to meteorological factors (average daily air temperature, precipitation). The positive effect of fosfemide mutagen is also confirmed by a wide range of variability of the studied traits. A direct relationship between the yield of the studied samples and plant height was found, the degree of which depends on environmental factors and genotype. The dependence of yield on plant height increases under insufficient moisture supply and high air temperature.

**Keywords:** mutant, fosfemide, yield, correlation, plant height.

**Введение**

В связи с климатическими изменениями существует необходимость в разработке для селекционных программ исходного материала с повышенным потенциалом урожайности и устойчивостью к биотическим и абиотическим факторам. Описано успешное использование химических мутагенов для улучшения агрономических показателей пшеницы (высота растений, урожайность, качество продукции, устойчивость к стресс-факторам) [1], [2], [3]. Обработка семян мутагеном позволяет получить популяции, состоящие из отдельных линий, несущих различные мутации, в том числе с интересующими и ценными для отбора признаками. Мутации, индуцированные с помощью различных мутагенов, рассматриваются как возможность получения исходного материала для селекции [4]. Создание качественно новых форм растений с высокой устойчивостью к внешним неблагоприятным факторам во многом зависит от понимания процессов адаптации растительного организма.

Цель исследования: определение изменчивости признака высоты растений мутантных образцов M<sub>5</sub>, M<sub>6</sub>, M<sub>7</sub> поколений яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum L.*) во взаимосвязи с урожайностью в условиях Северного Зауралья в течение трех вегетационных периодов 2021-2023 гг.

**Методы и принципы исследования**

Семена двух сортов яровой мягкой пшеницы Сара (Мексика), Скэнт 3 (Россия) и гибрида четвертого поколения (F<sub>4</sub>), полученного после скрещивания этих сортов (Сара x Скэнт 3), обрабатывали раствором фосфемид (ди-(этиленимид)-пиримидил-2-амидофосфорная кислота) в концентрациях 0,002 и 0,01% (экспозиция 3 часа). Начиная со второго поколения (M<sub>2</sub>) выполняли отбор растений, отличающихся от исходных форм по морфологическим признакам

и биологическим свойствам. После подтверждения обнаруженных изменений в третьем поколении ( $M_3$ ) осуществляли оценку по комплексу признаков с отбором лучших мутантных образцов. В статье представлены результаты полевой оценки 29 мутантов пятого ( $M_5$ ), шестого ( $M_6$ ) и седьмого ( $M_7$ ) поколений, отобранных по следующим признакам: крупный колос, пирамидальный колос, спельтоидный колос, окраска соломины ярко желтая и антоциановая, прочная соломина, широкий флаговый лист, высокорослые, позднеспелые, раннеспелые.

Исследование проведено в вегетационные периоды 2021-2023 годов на экспериментальном участке биостанции Тюменского государственного университета «Озеро Кучак» (57°20'57.3"N 66°03'21.8"E, Тюменская область, Нижнетавдинский район). Метеоданные получали с датчиков профессиональной локальной метеостанции IMetos IMT300. Гидротермический коэффициент (ГТК) рассчитывали согласно Г.Т. Селянинову (1930) [5].

Почва участка дерново-подзолистая, супесчаная, содержание гумуса составляет 3,67%, pH 6,6. Посев выполняли во второй декаде мая, площадь каждой делянки 1 м<sup>2</sup>, стандарты – сорта, рекомендованные для Тюменской области Тюменская 25, Тюменская 29, Новосибирская 31, повторность опыта 3-кратная. Высоту растений определяли в фазе колошения измерением от поверхности почвы до самой верхней части колоса в 5 точках на делянке, урожайность – взвешиванием зерна после ручной уборки растений, обмолота и очистки.

Для статистической обработки полученных данных использовали апробированные методики [6], табличный процессор Microsoft Excel и программное обеспечение STATISTICA 6.0 («StatSoft», Inc., США).

### Основные результаты

Вегетационные периоды 2021-2023 годов существенно отличались по температурному режиму, количеству выпавших осадков, что подтверждается значениями гидротермического коэффициента (ГТК) (табл. 1).

Таблица 1 - Метеорологические условия вегетационных периодов в годы проведения исследования

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.29.1>

Месяц	Осадки, ср. многолетнее, мм	2021 г.		2022 г.		2023 г.	
		осадки, мм	ГТК	осадки, мм	ГТК	осадки, мм	ГТК
Май	44,0	4,6	0,1	46,2	1,1	7,6	0,2
Июнь	61,0	22,4	0,4	42,4	0,8	105,8	0,5
Июль	86,0	49,6	0,9	78,6	1,3	116,2	1,7
Август	60,0	20,0	0,3	28,0	0,5	38,8	0,8
Сумма	251,0	96,6	-	195,2	-	268,4	-

Для прорастания семян и формирования всходов условия сложились крайне неблагоприятно в мае 2021 и 2023 годов. Этот период можно характеризовать как сухой, доля осадков от общей суммы за вегетационный период составила 4,8 и 2,8% соответственно. Отмечено неравномерное распределение осадков и в другие месяцы. Значительная часть осадков – 51,3% в 2021 году, 40,3% в 2022 году и 43,3% в 2023 году приходится на июль. Рост и развитие растений пшеницы в 2022 году сопровождался достаточной влагообеспеченностью, что помогло избежать водного стресса. В июне 2023 года отмечена большая месячная сумма осадков (105,8 мм) за 11 суток, при этом основная часть (95,8 мм) выпала в течение 5 суток. Июль также характеризовался обильным количеством осадков (116,2 мм), но большая часть (103,8 мм) их зарегистрирована в течение 3 суток. В связи с этим, несмотря на высокий гидротермический коэффициент (ГТК=1,7) позволяющий отнести данный месяц к избыточно-влажному, отмечен сильный расход влаги за короткий промежуток времени на фоне высоких среднесуточных температур воздуха (на 3,2°C выше среднего многолетнего значения, максимальная температура достигала 38°C). В этих контрастных условиях было важно определить биологический потенциал мутантных образцов.

Одним из признаков, характеризующим способность генотипов пшеницы адаптироваться к меняющимся условиям окружающей среды, является высота растений [7]. По нашим данным, варьирование высоты растений у мутантов, исходных форм и сортов-стандартов яровой пшеницы наблюдалось как по годам исследования, так и в пределах каждого вегетационного периода (табл. 2). По усредненным данным растения мутантных популяций уступали стандартным сортам по данному признаку, что мы объясняем присутствием в коллекции образцов, созданных на основе низкорослого сорта Сага из Мексики. Вместе с тем, пределы варьирования признака указывают на наличие образцов, которые находились на уровне стандартов или превосходили их. Реакция на водный и тепловой стресс проявлялась в снижении признака у мутантных образцов и районированных сортов. Среди стандартов наибольшей чувствительностью к неблагоприятным факторам характеризовался сорт Новосибирская 31, у мутантов самые низкие средние значения отмечены в 2021 году.

Таблица 2 - Изменчивость высоты растений мутантов в сравнении со стандартными сортами яровой мягкой пшеницы в различных условиях вегетации

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.29.2>

Год	Мутанты	Тюменская 25	Тюменская 29	Новосибирская
-----	---------	--------------	--------------	---------------

	(среднее)			31
Высота растений, см ( $\bar{x} \pm S_x$ )				
2021	55,7±2,12*	72,4±0,86	70,7±0,73	67,3±1,50
2022	76,3±2,35*	92,2±1,53	90,5±1,16	91,0±1,88
2023	68,5±2,49*	78,3±1,08	80,0±2,39	66,8±0,97

*Примечание: \*различия статистически достоверны при сравнении мутантов с лучшим стандартом ( $p < 0,05$ )*

Корреляционный анализ позволил выявить тесную взаимосвязь между урожайностью и высотой растений яровой пшеницы (рис. 1). Необходимо отметить, что сила связи усиливалась, когда рост и развитие растений проходили при недостатке влаги на фоне повышенных среднесуточных температур воздуха. Сильная прямая взаимосвязь отмечена в 2021 году ( $r=0,82^*$ ), средняя – в 2023 году ( $r=0,62^*$ ) и слабая обратная – в 2022 году ( $r=-0,31^*$ ). Другие исследователи [8] также сообщают о высокой корреляции ( $r=0,71$ ) урожайности зерна у генотипов пшеницы с высотой растений. В работе [9] отмечено увеличение вклада высоты растений в урожайность в раннеспелой группе сортов яровой пшеницы в условиях засухи в лесостепной зоне Курганской области.

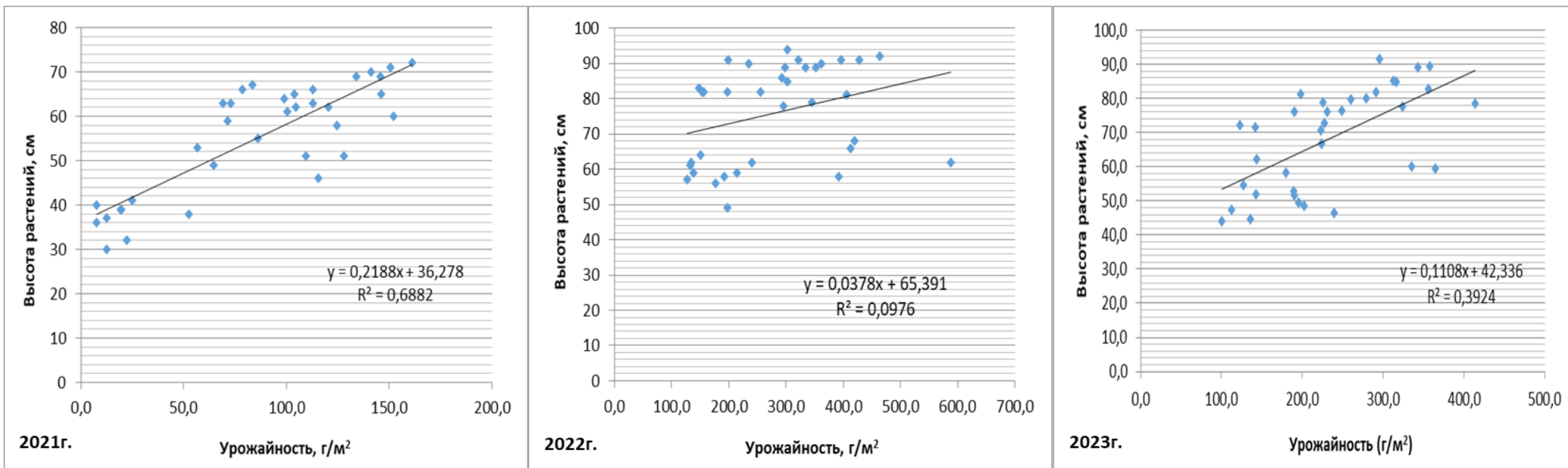


Рисунок 1 - Корреляция урожайности с высотой растений яровой мягкой пшеницы в 2021-2023 гг  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.29.3>

Урожайность по усредненным данным изученных мутантов самой низкой была в засушливом 2021 году и составила  $138,1 \pm 4,88$  г/м<sup>2</sup>. Несмотря на недостаток влаги и аномально высокие температуры воздуха в 2023 году, зерновая продуктивность была выше  $235,5 \pm 14,12$  г/м<sup>2</sup>. Анализ и сопоставление метеоданных с фенологическими фазами растений показал, что в 2023 году период формирования зерновок совпал с относительно благоприятными гидротермическими условиями. В 2022 году получена самая высокая урожайность  $279,4 \pm 7,75$  г/м<sup>2</sup>. У стандартных сортов урожайность изменялась от  $163,3$  г/м<sup>2</sup> (Тюменская 25, 2021 г.) до  $424,3$  г/м<sup>2</sup> (Тюменская 25, 2022 г.).

В работах других авторов также установлено, что неравномерное выпадение осадков и высокие температуры воздуха приводят к нарушению процессов формирования и налива зерна [10], [11] и снижению урожайности [12].

Особую ценность для практического применения в селекции могут иметь мутантные формы с повышенными адаптивными и продуктивными свойствами. В таблице 3 приведены данные по некоторым из них по признаку высоты растений и урожайности, но следует отметить, что при отборе перспективных мутантов учитывали еще по ряд других хозяйственно ценных признаков.

Таблица 3 - Сравнительная оценка мутантных образцов яровой пшеницы по высоте растений и урожайности зерна с сортами-стандартами, среднее 2021-2023 гг

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.29.4>

Образец	Высота растений, см			Урожайность, г/м <sup>2</sup>			
	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее
(4) F4 (0,01%) Сага х Скэнт 3	$46,4 \pm 1,36$ *	$62,2 \pm 2,24$ *	$60,0 \pm 0,55$ *	115,6	518,2	342,7	325,5
(5) F4 (0,01%) Сага х Скэнт 3	$51,6 \pm 1,57$ *	$66,5 \pm 1,80$ *	$59,4 \pm 1,40$ *	123,7	425,3	379,7	309,6
(17) P2 (0,002%) Скэнт 3	$60,8 \pm 1,03$	$91,7 \pm 1,86$	$91,4 \pm 1,36$	157,3	396,1	375,2	309,5
(20) P2 (0,002%) Скэнт 3	$62,1 \pm 1,33$	$81,9 \pm 1,60$	$85,1 \pm 2,10$	155,8	405,3	358,2	306,4
(32) F4 (0,002%) Сага х Скэнт 3	$53,3 \pm 0,64$ *	$68,4 \pm 1,17$ *	$52,7 \pm 2,56$ *	86,2	414,2	297,9	266,1
Тюменска я 25	$72,3 \pm 0,86$	$92,5 \pm 1,53$	$78,3 \pm 1,08$	163,3	424,5	364,3	317,0
Тюменска я 29	$70,7 \pm 0,73$	$90,5 \pm 1,16$	$80,0 \pm 2,39$	194,3	356,3	279,4	276,7
Новосиби рская 31	$67,3 \pm 1,50$	$91,0 \pm 1,88$	$66,8 \pm 0,97$	174,0	355,0	259,0	262,6

Примечание: \*различия статистически достоверны при сравнении мутантов с лучшим стандартом ( $p < 0,05$ )

Максимальная реализация биологического потенциала мутантов и сортов отмечена по показателям урожайности в условиях 2022 года. Растения характеризовались более активным ростом в высоту, и в фазе колошения имели преимущество по этому признаку по сравнению с 2021 годом. В 2023 году реакция на тепловой стресс у образцов была неоднозначной. Мутанты (17) P2 (0,002%) Скэнт 3 и (20) P2 (0,002%) Скэнт 3 были наиболее высокорослыми. В то же время у мутантов (5) F4 (0,01%) Сага х Скэнт 3; (32) F4 (0,002%) Сага х Скэнт 3 и сорта Новосибирская 31 наблюдалось уменьшение высоты по сравнению с 2022 годом. У большинства образцов за весь период изучения отмечена высокая устойчивость к полеганию (5 баллов) и только у двух мутантов, созданных на основе сорта Скэнт 3 (концентрация фосфемиды 0,002%), в 2022 году было полегание растений, в среднем за 3 года устойчивость составила 4,3 балла.

#### Заключение

Значительные корреляции, наблюдаемые между урожайностью и высотой растений, широкий диапазон фенотипической изменчивости подтверждают биологический эффект химического мутагена фосфемиды, зависят от

гидротермических условий вегетационного периода и позволяют предположить, что признаки являются взаимозависимыми и полезными для отбора хозяйственно ценных форм.

Мутанты с благоприятными агротехническими показателями могут быть рекомендованы в качестве родительских форм для создания исходного материала для практической селекции. Результаты, полученные после обработки семян фосфемидом гибрида Сага х Скэнт 3, позволяют говорить о перспективе комплексного использования мутационной и рекомбинационной изменчивости.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Dhaliwal A. An Ethylmethane Sulfonate Mutant Resource in Pre-Green Revolution Hexaploid Wheat / A. Dhaliwal, M. Amita, S. Gaganjot [et al.] // PloS one. — 2015. — Vol. 10. — №. 12. — P. e0145227.
2. Nazarenko M. Optimal Doses and Concentrations of Mutagens for Winter Wheat Breeding Purposes. Part I. Grain Productivity / M. Nazarenko, Y. Lykholat, I. Grygoryuk [et al.] // Journal of Central European Agriculture. — 2018. — Vol. 19. — №. 1. — P. 194-205.
3. Lethin J. Development and Characterization of an EMS-mutagenized Wheat Population and Identification of Salt-Tolerant Wheat Lines / J. Lethin, S.S.M. Shakil, S. Hassan // BMC Plant Biology. — 2020. — Vol. 20. — P. 1-15.
4. Кротова Л.А. Химический мутагенез как метод создания исходного материала для селекции мягкой пшеницы / Л. А. Кротова // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. — 2015. — №2(2).
5. Селянинов Г.Т. К методике сельскохозяйственной климатографии / Г. Т. Селянинов // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. — 1930. — №2. — Вып. 22. — С. 45-91.
6. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б.А. Доспехов. — М.: Агропромиздат, 1985. — 351 с.
7. Кривобочек В.Г. Биологические и хозяйственные признаки сортов яровой мягкой пшеницы, различающихся по высоте растений / В.Г. Кривобочек, И.Ф. Демина // Нива Поволжья. — 2018. — №4 (49). — С. 53-58.
8. Qaseem M.F. Effects of Pre-Anthesis Drought, Heat and Their Combination on the Growth, Yield and Physiology of diverse Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes Varying in Sensitivity to Heat and drought stress / M.F. Qaseem, R. Qureshi, H. Shaheen // Scientific Reports. — 2019 — 9. — P. 1-12.
9. Мальцева Л.Т. Влияние засухи на хозяйственно ценные признаки яровой мягкой пшеницы в условиях лесостепной зоны Курганской области / Л.Т. Мальцева, У.А. Филиппова, Н.Ю. Банникова [и др.] // Вестник Омского государственного аграрного университета. — 2021. — № 3(43). — С. 25-35.
10. Porter J.R. Crop Responses to Climatic Variation / J.R. Porter, M.A. Semenov // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. — 2005. — Vol. 360. — №. 1463. — P. 2021-2035.
11. Semenov M.A. Modelling Predicts that Heat Stress, not Drought, will Increase Vulnerability of Wheat in Europe / M.A. Semenov, P.R. Shewry // Scientific Reports. — 2011. — Vol. 1. — №. 1. — P. 66.
12. Rezaei E.E. Intensity of Heat Stress in Winter Wheat Phenology Compensates for the Adverse Effect of Global Warming / E.E. Rezaei, S. Siebert, F. Ewert // Environmental Research Letters. — 2015. — Vol. 10. — №. 2. — P. 024012.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Dhaliwal A. An Ethylmethane Sulfonate Mutant Resource in Pre-Green Revolution Hexaploid Wheat / A. Dhaliwal, M. Amita, S. Gaganjot [et al.] // PloS one. — 2015. — Vol. 10. — №. 12. — P. e0145227.
2. Nazarenko M. Optimal Doses and Concentrations of Mutagens for Winter Wheat Breeding Purposes. Part I. Grain Productivity / M. Nazarenko, Y. Lykholat, I. Grygoryuk [et al.] // Journal of Central European Agriculture. — 2018. — Vol. 19. — №. 1. — P. 194-205.
3. Lethin J. Development and Characterization of an EMS-mutagenized Wheat Population and Identification of Salt-Tolerant Wheat Lines / J. Lethin, S.S.M. Shakil, S. Hassan // BMC Plant Biology. — 2020. — Vol. 20. — P. 1-15.
4. Krotova L.A. Himicheskiy mutagenez kak metod sozdaniya ishodnogo materiala dlja selekcii mjagkoj pshenicy [Chemical Mutagenesis as a Method of Creating Source Material for Breeding Bread Wheat] / L.A. Krotova // Jelektronnyj nauchno-metodicheskiy zhurnal Omskogo GAU [Electronic Scientific and Methodological Journal of Omsk State Agrarian University]. — 2015. — №2(2). [in Russian]
5. Seljaninov G.T. K metodike sel'skohozjajstvennoj klimatografii [On the Methodology of Agricultural Climatography] / G. T. Seljaninov // Trudy po sel'skohozjajstvennoj meteorologii [Proceedings on Agricultural Meteorology]. — 1930. — №2. — Iss. 22. — P. 45-91. [in Russian]
6. Dosphehov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoj obrabotki rezul'tatov issledovanij) [Methodology of Field Experience (with the basics of statistical processing of research results)] / B.A. Dosphehov. — M.: Agropromizdat, 1985. — 351 p. [in Russian]

7. Krivoboček V.G. Biologičeskie i hozjajstvennye priznaki sortov jarovoj mjagkoj pšenicy, razlichajushhija po vysote rastenij [Biological and Economic Characteristics of Spring Soft Wheat Varieties that Differ in Plant Height] / V.G. Krivoboček, I.F. Demina // Niva Povolzh'ja [Niva Volga Region]. — 2018. — №4 (49). — P. 53-58. [in Russian]
8. Qaseem M.F. Effects of Pre-Anthesis Drought, Heat and Their Combination on the Growth, Yield and Physiology of diverse Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes Varying in Sensitivity to Heat and drought stress / M.F. Qaseem, R. Qureshi, H. Shaheen // Scientific Reports. — 2019 — 9. — P. 1-12.
9. Mal'ceva L.T. Vlijanie zasuhi na hozjajstvenno cennye priznaki jarovoj mjagkoj pšenicy v uslovijah lesostepnoj zony Kurganskoj oblasti [The Influence of Drought on Economically Valuable Traits of Spring Soft Wheat in the Forest-Steppe Zone of the Kurgan Region] / L.T. Mal'ceva, U.A. Filippova, N.Ju. Bannikova [et al.] // Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Omsk State Agrarian University]. — 2021. — № 3(43). — P. 25-35. [in Russian]
10. Porter J.R. Crop Responses to Climatic Variation / J.R. Porter, M.A. Semenov // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. — 2005. — Vol. 360. — №. 1463. — P. 2021-2035.
11. Semenov M.A. Modelling Predicts that Heat Stress, not Drought, will Increase Vulnerability of Wheat in Europe / M.A. Semenov, P.R. Shewry // Scientific Reports. — 2011. — Vol. 1. — №. 1. — P. 66.
12. Rezaei E.E. Intensity of Heat Stress in Winter Wheat Phenology Compensates for the Adverse Effect of Global Warming / E.E. Rezaei, S. Siebert, F. Ewert // Environmental Research Letters. — 2015. — Vol. 10. — №. 2. — P. 024012.