УДК 631.52:633.25 DOI: 10.25680/S19948603.2026.152.18

ВЛИЯНИЕ ГЕНОТИПА И УСЛОВИЙ СРЕДЫ НА УРОЖАЙНОСТЬ И СТРУКТУРУ УРОЖАЯ ПШЕНИЧНО-ПЫРЕЙНЫХ ГИБРИДОВ

Т.С. Аниськина, Д.А. Щелканов, В.Е. Самохина, А.Д. Аленичева, О.А. Щуклина, к.с-х.н,
ФГБУН Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН,
Россия, 127276, Москва, Ботаническая ул., д. 4
tatianiskina@gmail.com

Исследование выполнено в рамках государственного задания №126012215936-0

Цель исследования — оценка вклада генотипа и условий среды в изменчивость компонентов структуры урожая 13 линий яровых пшенично-пырейных гибридов (ППГ). Исследования проводили в 2020–2022 г. в Московской области на дерново-подзолистой почве. Стандарт — сорт Злата. Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что доля влияния условий года на изменчивость признаков составила 51–79%, генотипа — 3–33%. Наибольшее влияние среды отмечено для высоты растений (79%) и урожайности (77%), наименьшее — для массы 1000 зерен (51%). Генотипические различия максимально проявились в массе 1000 зерен (33%), что указывает на эффективность селекции по данному признаку. AMMI-анализ (PC1 — 76,2%, PC2 — 23,8%) позволил разделить генотипы на две селекционно значимые группы: стабильные (ППГ 59, 81, 96, 107, 138, 146, 2430) и слабо реагирующие на изменение условий, и интенсивные (ППГ 12, 27, 127, 200, 220, 2714), характеризующиеся экстремальной реакцией на среду. ППГ 107 рекомендован для зон рискованного земледелия, ППГ 127 и 200 — для благоприятных условий или орошения. Результаты позволяют обоснованно выделять генотипы для дальнейшей селекционной работы.

Ключевые слова: селекция, пшенично-пырейные гибриды, структура урожая, урожайность, отдаленная гибридизация, AMMI-анализ.

Для цитирования: *Аниськина Т.С., Щелканов Д.А., Самохина В.Е., Аленичева А.Д., Щуклина О.А.* Влияние генотипа и среды на урожайность и компоненты структуры урожая пшенично-пырейных гибридов // Плодородие. - 2026. - №5. – С. 93-97. DOI: 10.25680/S19948603.2026.152.18.

Глобальное изменение климата, проявляющееся в повышении температуры воздуха, дефиците водных ресурсов, а также в заболачивании и засолении почв, создаёт серьёзную угрозу для продовольственной безопасности во всём мире [1]. В зависимости от региона возделывания неблагоприятные погодные условия ежегодно приводят к снижению урожайности основных сельскохозяйственных культур — пшеницы, риса, кукурузы, рапса и сои [2, 3]. По прогнозам [4], в ближайшие десятилетия негативные последствия изменений климата будут только усиливаться.

Среди наиболее эффективных мер по снижению влияния климатических стрессов на продуктивность растений — переход к точному земледелию, внедрение новых систем орошения и, что особенно важно, создание устойчивых к стрессам сортов. Однако длительная селекция, ориентированная исключительно на повышение урожайности, привела к утрате многих генов, отвечающих за толерантность к неблагоприятным факторам среды [5]. Восстановить утраченные гены можно путём вовлечения в скрещивания диких сородичей или стародавних местных сортов, которые в процессе эволюции сохранили высокий уровень адаптации к абиотическим стрессам [6]. Генетический потенциал таких форм используется в селекционных программах, направленных либо на одомашнивание диких видов, либо на привлечение их в качестве доноров устойчивости через отдалённую гибридизацию [7–9]. Например, при скрещивании видов пшеницы *Triticum monococcum* и *Tr. durum*, а также видов ячменя *Hordeum vulgare ssp. spontaneum* и *H. vulgare* были получены линии, устойчивые к засолению почв [10, 11]. Однако для целенаправленного использования генетического потенциала гибридов в селекции необходима количественная оценка вклада генотипа и условий среды в формирование урожайности.

Цель исследования - провести двухфакторный дисперсионный анализ и определить долю влияния факторов «генотип», «среда» и их взаимодействия на изменчивость признаков структуры урожая 13 линий пшенично-пырейных гибридов в контрастных погодных условиях Московской области.

Методика. Объектом изучения служили 13 линий пшенично-пырейных гибридов (ППГ), созданных в отделе отдаленной гибридизации ГБС РАН путем многоступенчатых скрещиваний между озимыми и яровыми формами пшеницы (*Triticum aestivum* L.), пшенично-пырейными гибридами (2n=42) и линиями трититригии (×*Tititrigia*). В родословной большинства линий пшенично-пырейных гибридов присутствует сорт мягкой яровой пшеницы Саратовская 29. В качестве сорта-контроля использован сорт мягкой яровой пшеницы Злата – стандарт для условий Центрального региона, выведенный в ФИЦ «Немчиновка». Полевые эксперименты закладывали в 2020-2022 г. в условиях Московской области (Отдел отдаленной гибридизации ГБС РАН, с. Рождествено).

Почва опытных участков дерново-подзолистая тяжелосуглинистая. Агрохимические показатели пахотного горизонта (0-20 см) определялись ежегодно перед закладкой опытов. Содержание гумуса (по ГОСТ 26213-2021) варьировало от 1,3 до 1,7%. Обеспеченность подвижным фосфором (метод Кирсанова, ГОСТ Р 54650-2011) была повышенной и составляла 150-166 мг/кг почвы, обменным калием – 116-119 мг/кг. Реакция почвенной среды слабокислая (pH_{KCl} 4,8).

Полевой опыт заложен в коллекционном питомнике методом рандомизированных блоков в трехкратной повторности. Учетная площадь делянки 1 м². Предшественник – чистый пар, что обеспечивало выравненный фон минерального питания. Посев проводили селекционной сеялкой СКС-6-10 с нормой высева 480 всхожих зерен/м² в оптимальные для зоны сроки (конец апреля – начало мая). В фазе кущения проводили азотную подкормку аммиачной селитрой из расчета 70 кг д.в/га. В течение вегетации осуществляли ручные прополки для поддержания посевов в чистом от сорняков состоянии. Уборку проводили по мере достижения зерном восковой спелости (влажность 14-18%) - с конца июля по первую декаду августа. Сбор данных осуществляли по Методике Госсортоиспытания [12].

Метеорологические условия вегетационных периодов существенно различались по годам, что позволило оценить реакцию генотипов на стрессовые факторы. 2020 г. характеризовался относительно равномерным распределением тепла и влаги. Несмотря на засушливую первую декаду мая, обильные осадки в последующие месяцы (трехкратное превышение нормы в июне) обеспечили благоприятные условия для продуктивного кущения, формирования и налива зерна. Погода в августе способствовала проведению уборочных работ в оптимальные сроки. 2021 г. оказался экстремальным по гидротермическому режиму. С фазы кущения (середина мая) установилась аномально жаркая погода с превышением среднемноголетних температур на 4-7°С. Наибольший стресс растения испытали в июле, когда дефицит осадков достиг критических значений: в первой декаде выпало лишь 2,4 мм (при норме 35 мм), в третьей – 9,0 мм (при норме около 30 мм). Обильные осадки в начале августа осложнили уборку, но уже не смогли повлиять на формирование элементов продуктивности. 2022 г. занимал промежуточное положение, с отдельными периодами почвенной засухи, которые компенсировались осадками последующих декад.

Для оценки влияния факторов «среда» (год) и «генотип» на изменчивость признаков применяли двухфакторный дисперсионный анализ (ANOVA) в пакете SPSS Statistics 25. Нормальность распределения проверяли по критерию Колмогорова–Смирнова. Достоверность влияния факторов оценивали по критерию Фишера при $p \leq 0,05$. Сравнение средних выполняли с использованием критерия Дункана (5%-ный уровень значимости). Для более глубокого анализа взаимодействия «генотип × среда» и оценки стабильности изучаемых линий проведен AMMI-анализ (Additive Main effects and Multiplicative Interaction) в программе R с использованием пакетов metan и ggplot2.

Результаты и их обсуждение. Двухфакторный дисперсионный анализ влияния «среда» и «генотип» на урожайность выявил достоверное воздействие на параметры структуры урожайности яровых ППГ (табл.).

Установлено, что наибольшему влиянию среды подвержены высота растений, урожайность и число колосков в колосе. Генотипические различия наиболее сильно проявлялись в массе 1000 семян, что указывает на возможность эффективной селекции по данному показателю. Высокая доля случайных факторов для кустистости свидетельствует о значительной фенотипической изменчивости этого признака под влиянием неучтенных микроусловий. Для признаков с низкой наследуемостью целесообразно применение маркер-ориентированного отбора на основе QTL, связанного с массой 1000 зерен и стабильностью колоса.

Доля влияния факторов среды и генотипа на структуру урожая пшенично-пырейных гибридов (в среднем за 2020-2022 г.) %*

Показатель	Доля влияния, %			
	генотипа	условий года	совместного года*генотипа	случайных факторов
Урожайность, г/м²	3	77	7	13
Масса 1000 семян, г	33	51	8	8
Масса зерна с 1 колоса, г	9	66	16	9
Число зерен в 1 колосе	6	65	17	12
Длина колоса, см	13	70	9	8
Число колосков в колосе	6	74	14	6
Кустистость, шт/раст.	6	68	3	23
Высота растений, см	14	79	5	2

*Получено в результате двухфакторного дисперсионного анализа (p=0,05).

Метеорологические условия вегетационного периода по-разному влияли на величину отдельных элементов структуры урожая у изучаемых образцов и сорта-стандарта Злата. Математическая обработка выявила вклад среды в фенотипическое проявление признаков продуктивности на уровне 51–77%, что согласуется с исследованиями, проведёнными в иных эколого-географических условиях [13]. Среднемесячные показатели осадков и температуры воздуха за время эксперимента не так сильно отклонялись от многолетней нормы, как декадные значения. Однако, в период интенсивного роста и развития культуры с коротким вегетационным периодом (85–115 дней) условия каждого дня приобретают решающее значение.

Яровые пшенично-пырейные гибриды из коллекции ГБС РАН отличаются более высокой способностью к продуктивному кущению, что, вероятно, унаследовано от пырея через трититригию, также обладающую высокой кустистостью [14]. Кроме того, они имеют несколько более продолжительный вегетационный период (на 2–5 дней), что сказалось на реакции на одинаковые погодные условия при формировании урожайности по сравнению со стандартом, который «ушёл» от засухи в 2021 г.

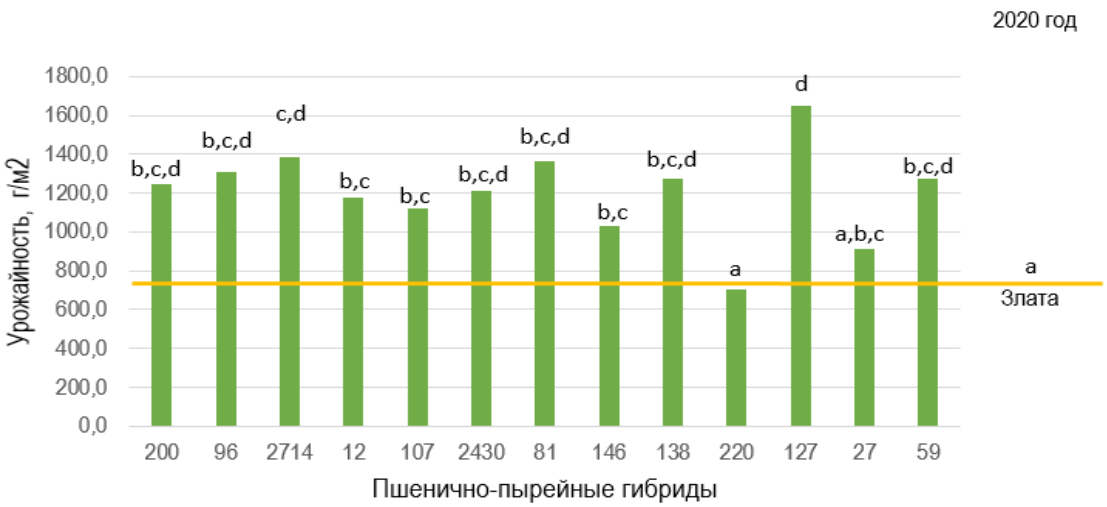


Рис. 1. Урожайность ППГ и сорта-стандарта Злата в 2020 г. (буквами обозначены ППГ, не отличающиеся друг от друга согласно критерию Дункана, p=0.05)

В благоприятном по влагообеспеченности 2020 г. урожайность линий ППГ варьировала от 707,4 (ППГ 220) до 1647,3 (ППГ 127) г/м² (рис. 1). Сорт-стандарт Злата сформировал урожайность 777,3 г/м², что было одним из самых низких показателей в опыте. Наибольшую урожайность в 2020 г. сформировали ППГ 127 за счет максимальных значений всех признаков структуры урожая (продуктивная кустистость 3,3 стебля, длина колоса до 10 см, число зерен с растения до 33), а также ППГ 2714 (за счет сбалансированного развития) и ППГ 81 (за счет крупного зерна, масса 1000 семян 50,2 г).

Экстремальная засуха 2021 г. привела к резкому снижению урожайности всех изучаемых образцов (рис. 2) более чем вдвое по сравнению с 2020 г. Сорт Злата снизил продуктивность в 2,5 раза, так как его стратегия формирования небольшого числа очень хорошо развитых колосьев в благоприятных условиях оказалась не приспособленной к острой засухе, и масса зерна с колоса, которая является его ключевым фактором продуктивности, резко уменьшилась. ППГ 107 достиг урожайности на уровне стандарта за счет максимальной среди образцов массы зерна с колоса, при этом он характеризуется минимальными кустистостью (1 продуктивный стебель на растение) и массой соломы. Это указывает на стратегию «экономии ресурсов», т.е. растение направило доступную влагу на формирование зерна в ущерб вегетативной массе. В 2022 г., который по гидротермическому режиму занимал промежуточное положение между благоприятным 2020 г. и экстремальным 2021 г., урожайность изучаемых образцов также имела промежуточные значения (рис. 3).

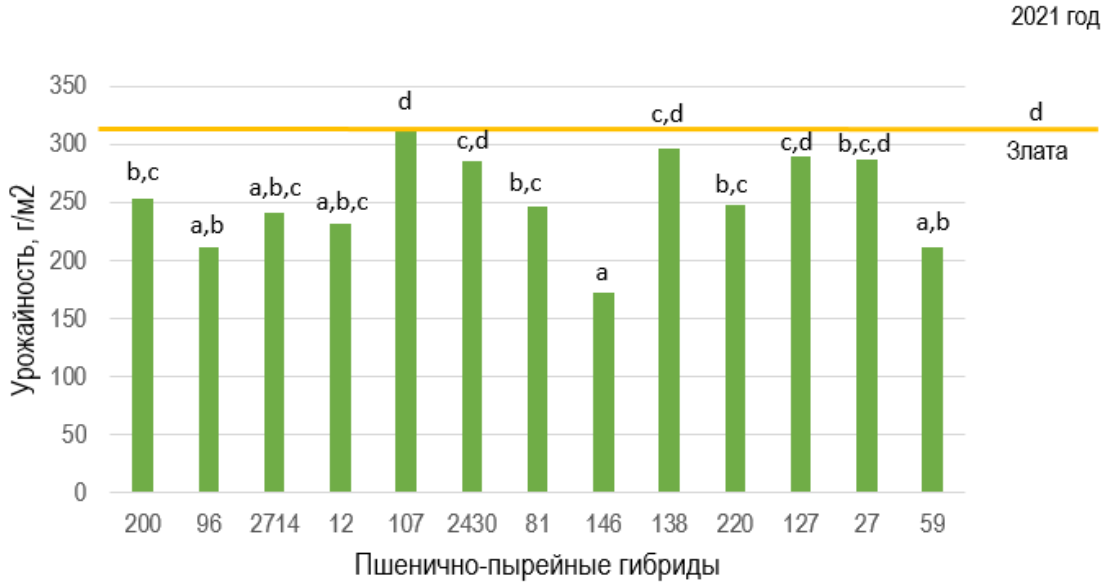


Рис. 2. Урожайность ППГ и сорта-стандарта Злата в 2021 г. (буквами обозначены генотипы, не отличающиеся друг от друга согласно критерию Дункана, p=0.05)

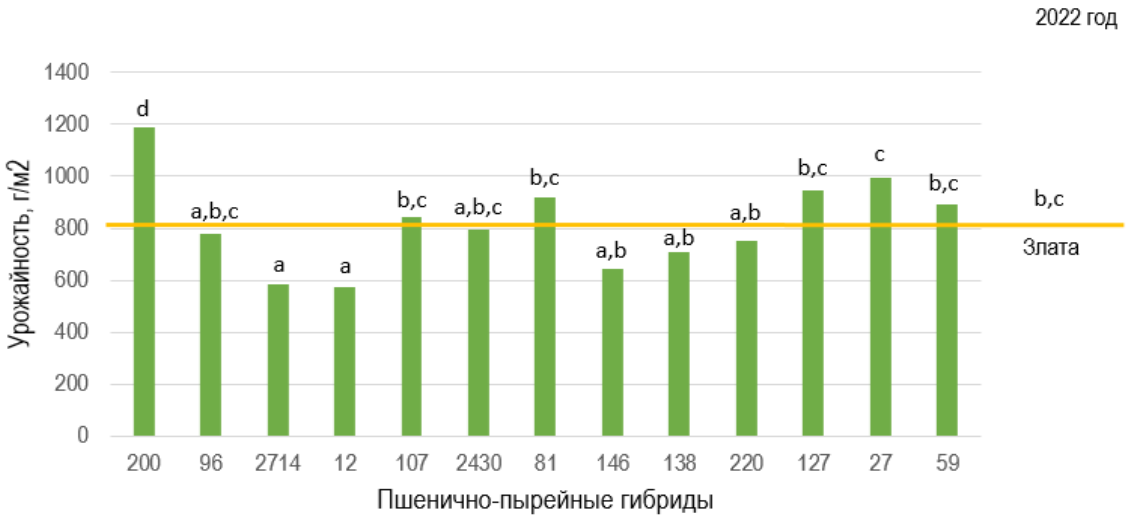


Рис. 3. Урожайность пшенично-пырейных гибридов и сорта-стандарта Злата в 2022 г. (буквами обозначены гибриды, не различающиеся друг от друга согласно критерию Дункана, p=0,05)

Сорт Злата в 2022 г. сформировал урожайность, которая существенно превысила показатель засушливого 2021 г. (в 2,6 раза выше), однако уступила результату благоприятного 2020 г., так как доступной влаги было меньше. ППГ 200 и 27 достоверно превысили стандарт за счет более мощного вегетативного развития и высокой продуктивности колоса, а гибрид 127 – благодаря большому числу продуктивных стеблей, несмотря на посредственные показатели индивидуального колоса.

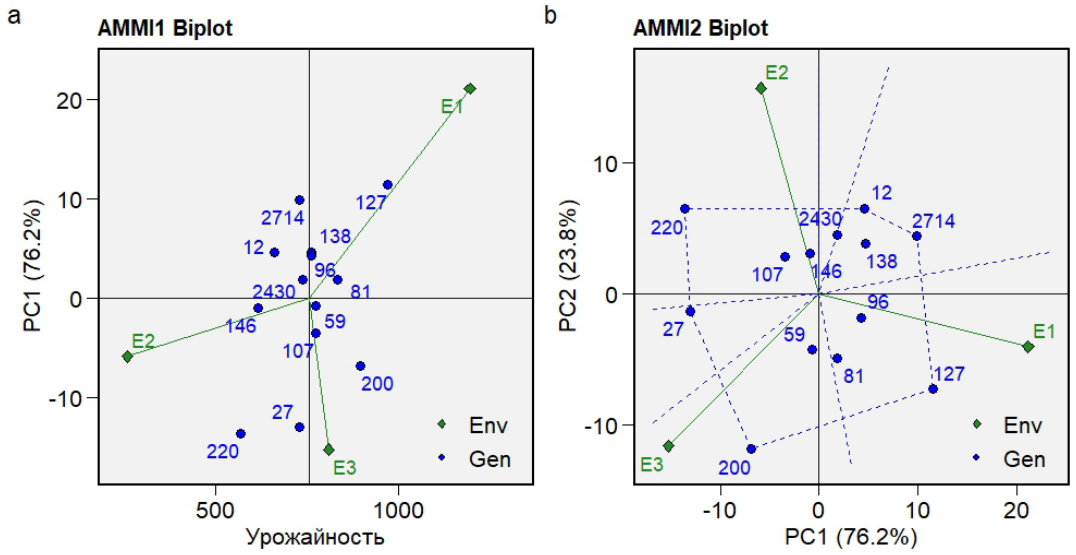


Рис. 4. AMMI-биплоты взаимодействия «генотип и среда» (цифрами обозначены пшенично-пырейные гибриды; E1, E2, E3 – среды выращивания, т.е. условия 2020, 2021 и 2022 г.)

AMMI-анализ взаимодействия «генотип × среда» показал, что доля первого главного компонента (PC1) составила 76,2%, второго (PC2) - 23,8%, что в сумме составляет 100% дисперсии взаимодействия (рис.4). На AMMI-биплоте в координатах «PC1 – урожайность» (рис. 4a) генотипы, расположенные близко к началу координат (ППГ 59, 81, 96, 107, 138, 2430), характеризуются высокой общей адаптивностью и слабой реакцией на изменение условий среды. Генотип 127, удаленный от центра и ориентированный на среду E1 (условия 2020 г.), обладает высокой специфической адаптацией к благоприятным условиям, что согласуется с его максимальной урожайностью в 2020 г. (1647,3 г/м²). Генотипы 27 и 220, расположенные между осями сред E2 (2021 г.) и E3 (2022 г.), проявляют устойчивость к засушливым условиям, хотя их потенциальная продуктивность умеренна. Генотип 200 занимает промежуточное положение, тяготея к E3, что соответствует его лидирующим показателям в 2022 г.

На биплоте с осями PC1 и PC2 (рис. 4b) построен «многоугольник стабильности». Вершины многоугольника образовали генотипы 12, 27, 127, 200, 220, 2714, что указывает на их экстремальную реакцию на условия среды. Внутри многоугольника сконцентрированы стабильные генотипы (ППГ 59, 81, 96, 107, 138, 146), которые могут быть рекомендованы для зон с нестабильным увлажнением. Особого внимания заслуживает ППГ 107, который, имея среднюю продуктивность, сочетает ее с высокой стабильностью и сохранением урожайности в засушливом 2021 г. Напротив, ППГ 127 и ППГ 200

целесообразно использовать в благоприятных условиях или при орошении, где они полностью реализуют свой потенциал.

Таким образом, AMMI-анализ позволил стратифицировать изученную коллекцию на две группы: стабильные генотипы «универсального типа» (ППГ 107, 59, 81, 96, 138, 146, 2430) и генотипы «интенсивного типа» с высокой отзывчивостью на улучшение условий (ППГ 12, 27, 127, 200, 220, 2714). Такое разделение имеет непосредственное селекционное значение. Полученные данные о соотношении генотипической и средовой изменчивости согласуются с результатами оценки адаптивности этих же гибридов с использованием AMMI-моделей [15].

Заключение. 1. Генотипические различия пшенично-пырейных гибридов максимально проявились в массе 1000 семян (33%), что указывает на эффективность селекции по данному признаку.

2. На основе трёхлетних полевых испытаний и AMMI-анализа выделены две селекционно значимые группы генотипов: стабильные (универсальные) генотипы (ППГ 59, 81, 96, 107, 138, 146, 2430), они могут быть рекомендованы для зон с нестабильным увлажнением; интенсивные (отзывчивые) генотипы (ППГ 12, 27, 127, 200, 220, 2714), которые реализуют высокий потенциал продуктивности только в условиях достаточного увлажнения и резко снижают урожайность при засухе.

3. Для зон рискованного земледелия (с нестабильным увлажнением) рекомендован стабильный ППГ 107, который в засушливом 2021 г. достоверно не уступал стандарту. Для благоприятных условий или орошения перспективны интенсивные генотипы — ППГ 127 и ППГ 200.

Литература

1. *Ahmad W., Ullah N., Xu L., et al.* Editorial: Global Food and Nutrition Security Under Changing Climates // Front. Agron. 2022. Vol. 3, P.799878. doi: 10.3389/fagro.2021.799878

2. *Кошкин Е.И., Андреева И.В., Гусейнов Г.Г.* Влияние глобальных изменений климата на продуктивность и устойчивость сельскохозяйственных культур к стрессорам // Агрохимия. - 2019. - №12, - С. 83-96. DOI: 10.1134/S0002188119120068

3. *Saud S., Wang D., Fahad S., et al.* Comprehensive Impacts of Climate Change on Rice Production and Adaptive Strategies in China // Frontiers in Microbiology. 2022. Vol. 13, P. 926059. doi: 10.3389/fmicb.2022.926059

4. *Wang F., Harindintwali J.-D., Wei K., et al..* Climate change: Strategies for mitigation and adaptation // The Innovation Geoscience. 2023. Vol. 1(1), P. 100015. https://doi.org/10.59717/j.xinn-geo.2023.100015

5. *Kole C., Muthamilarasan M., Henry R., et al.* Application of genomics-assisted breeding for generation of climate resilient crops: progress and prospects // Frontiers in Plant Science. 2015. Vol. 6, P. 563. doi: 10.3389/fpls.2015.00563

6. *Хлесткина Е.К., Чухина И.Г.* Генетические ресурсы растений: стратегия сохранения и использования // Вестник РАН. - 2020. - Т.90, №6. - С. 522-527.

7. *Palmgren M., Shabala S.* Adapting crops for climate change: regaining lost abiotic stress tolerance in crops // Frontiers in Science. 2024. Vol. 2, P. 1416023. doi: 10.3389/fsci.2024.1416023

8. *Morgounov A., Shchuklina O., Pototskaya I. et al.* Perennial Grains in Russia: History, Status, and Perspectives // Crops. 2025. V. 5(4), P. 46.

9. *Крупин П.Ю., Дивашук М.Г., Карлов Г.И.* Использование генетического потенциала многолетних дикорастущих злаков в селекционном улучшении пшениц // Сельскохозяйственная биология. - 2019. – Т.54, № 3. - С. 409-425.

10. *Yolcu S., Alavilli H., Lee B-H.* Natural Genetic Resources from Diverse Plants to Improve Abiotic Stress Tolerance in Plants // International journal of molecular sciences. 2020. Vol 21(22), P. 8567. doi: 10.3390/ijms21228567.

11. *Shavrukov Y., Gupta N.K., Miyazaki J. et al. HvNax3*—a locus controlling shoot sodium exclusion derived from wild barley (*Hordeum vulgare* ssp. *spontaneum*) // Functional & Integrative Genomics. 2010. Vol. 10, P. 277–291. https://doi.org/10.1007/s10142-009-0153-8

12. *Методика* Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып.2. -М.,1989.

13. *Стасюк А.И., Леонова И.Н., Пономарева М.Л. и др.* Фенотипическая изменчивость селекционных линий мягкой пшеницы (Triticum aestivum L.) по элементам структуры урожая в экологических условиях Западной Сибири и Татарстана // Сельскохозяйственная биология. - 2021. - Т. 56, №1. - С. 78-91. DOI: 10.15389/agrobiology.2021.1.78rus

14. *Щуклина О.А., Завгородний С.В., Соловьев А.А. и др.* Оценка влияния образцов коллекции ×*Tititrigia* как исходного материала на качество зерна в селекционном процессе зерновых культур // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. - 2023. - № 6. - С. 65-75. DOI 10.26897/0021-342X-2023-6-65-75.

15. *Shchuklina, O., Aniskina, T., Shirokova, A., Shchelkanov, D., & Baranova, E.* Assessment of Stability and Adaptability of Wheat–Wheatgrass Hybrids Using AMMI Models. *Agronomy*, *15*(12), 2025 2897. https://doi.org/10.3390/agronomy15122897

INFLUENCE OF GENOTYPE AND ENVIRONMENT ON YIELD AND YIELD STRUCTURE COMPONENTS OF WHEAT–WHEATGRASS HYBRIDS

T. S. Aniskina, D. A. Shchelkanov, V. E. Samokhina, A. D. Alenicheva, O. A. Shchuklina, PhD (Agric.), N.V. Tsitsin Main Botanical Garden, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 127276, tatianiskina@gmail.com

The aim of the study was to assess the contribution of genotype and environmental conditions to the variability of yield structure components in 13 spring wheat–wheatgrass hybrid (WWH) lines. The research was conducted in 2020–2022 in Moscow region on sod-podzolic soil. Zlata served as the standard check. Two-way analysis of variance showed that the proportion of year conditions affecting trait variability ranged from 51–79%, while genotype accounted for 3–33%. The greatest environmental influence was observed for plant height (79%) and yield (77%), and the smallest for 1000-grain weight (51%). Genotypic differences were most pronounced for 1000-grain weight (33%), indicating the effectiveness of selection for this trait. The results allow for the justified selection of genotypes for further breeding work. The AMMI analysis (PC1 — 76.2%, PC2 — 23.8%) allowed the genotypes to be divided into two breeding-relevant groups: stable (WWH 59, 81, 96, 107, 138, 146, 2430), which are weakly responsive to changing conditions, and intensive (WWH 12, 27, 127, 200, 220, 2714), characterized by an extreme response to the environment. WWH 107 is recommended for risky farming areas, while WWH 127 and 200 are recommended for favorable conditions or irrigation. The results enable a well-grounded selection of genotypes for further breeding work.

Keywords: breeding, wheat–wheatgrass hybrids, yield structure, yield, distant hybridization, AMMI analysis.