

Методика оценки агроэкологической адаптированности генотипов в условиях глобального потепления климата

А. И. Кинчаров, Е. А. Дёмина, М. Н. Кинчарова, Т. Ю. Таранова, О. С. Муллаянова, К. Ю. Чекмасова

*Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Поволжский научно-исследовательский институт селекции и семеноводства им. П.Н. Константинова –
филиал СамНЦ РАН, Самарская область, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Александр Иванович Кинчаров, kincharov_ai@mail.ru

Актуальность. Несмотря на достижения селекции в создании сортов с высокой потенциальной продуктивностью и устойчивостью к наиболее распространенным в регионах стрессовым факторам, предусмотреть и точно предсказать реакцию сортов в производственных условиях практически невозможно. К тому же в условиях глобального потепления климата все чаще будут проявляться экстремальные погодные явления, включая волны жары, засух и ливней. Для уменьшения риска существенного снижения валовых сборов зерна в засушливые годы и достижения высоких показателей в благоприятных условиях поставлена цель работы – разработать комплексный показатель оценки агроэкологической адаптированности генотипа к некоторым последствиям глобального потепления климата.

Материалы и методы. Используя результаты конкурсного испытания пяти сортов и девяти перспективных линий пшеницы яровой по урожайности за шесть контрастных по влагообеспеченности лет – методом расчета показателей отзывчивости на благоприятные условия, депрессии урожайности зерна в неблагоприятных условиях и относительного индекса урожайности – предложен комплексный показатель для оценки агроэкологической адаптированности генотипа к контрастным условиям среды.

Результаты. Предложенный метод позволяет получить комплексную оценку, учитывающую отзывчивость образца на улучшение агроклиматических условий и степень его реакции на неблагоприятные факторы среды с учетом индекса урожайности в изучаемом наборе. Метод рекомендуется для оценки исходного материала и выявления разнообразия откликов образцов на изменения агроклиматических условий и для этапа конкурсного сортоиспытания в селекции на адаптивность.

Ключевые слова: пшеница, сорт, селекция, методика, отзывчивость, засухоустойчивость, урожайность

Благодарности: научные исследования проводились в том числе в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № 0192-2019-0032 «На основании изучения генофонда и синтеза новых генисточников с комплексом ценных признаков усовершенствовать технологию селекционного процесса с целью создания адаптивных сортов яровой и озимой пшеницы, сочетающих высокую продуктивность и качество зерна с повышенной устойчивостью к биотическим и абиотическим стрессам Среднего Поволжья».

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Кинчаров А.И., Дёмина Е.А., Кинчарова М.Н., Таранова Т.Ю., Муллаянова О.С., Чекмасова К.Ю. Методика оценки агроэкологической адаптированности генотипов в условиях глобального потепления климата. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022;183(4):39-47. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-4-39-47

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2022-4-39-47

Methodology for assessing the agroecological adaptability of genotypes under global climate warming

Aleksandr I. Kincharov, Elena A. Demina, Marina N. Kincharova, Tatyana Yu. Taranova, Olga S. Mullayanova, Kristina Yu. Chekmasova

Samara Federal Research Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Volga Scientific Research Institute of Selection and Seed-Growing named after P.N. Konstantinov, Samara Province, Russia

Corresponding author: Aleksandr I. Kincharov, kincharov_ai@mail.ru

Background. The relevance of the research is due to the fact that, despite the breeding achievements in releasing cultivars with high potential yield and resistance to the most common stressors in the regions, it is almost impossible to foresee and accurately predict the reaction of cultivars under production conditions. Besides, extreme weather events, including heat waves, droughts and downpours, will increasingly manifest themselves under global climate warming. To reduce the risk of a significant decrease in gross grain harvests in dry years and achieve high results under favorable conditions, the goal was to develop a comprehensive indicator for assessing the agroecological adaptability of genotypes to some consequences of global climate warming.

Materials and methods. The results of a competitive test of 5 cultivars and 9 promising lines of spring wheat for their yield across six years contrasting in moisture availability by calculating the indicators of responsiveness to favorable conditions, grain yield depression under unfavorable conditions and the relative yield index were used to develop a complex indicator proposed to assess the agroecological adaptability of a genotype to contrasting environmental conditions.

Results. The proposed method makes it possible to perform a comprehensive assessment that takes into account the responsiveness of an accession to improved agroclimatic conditions and the degree of its reaction to adverse environmental factors, taking into account the yield index in the studied set. The method is recommended for evaluating the source material and identifying the diversity of its responses to changes in agroclimatic conditions as well as for the stage of competitive variety testing in plant breeding for adaptability.

Keywords: wheat, cultivar, breeding, methodology, responsiveness, drought resistance, yield

Acknowledgements: the research was carried out, *inter alia*, within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on Theme No. 0192-2019-0032 "On the basis of studying the gene pool and synthesizing new genetic sources with a set of valuable traits to improve the technology of the breeding process in order to develop adaptable cultivars of spring and winter wheat, combining high productivity and grain quality with increased resistance to biotic and abiotic stresses in the Middle Volga region".

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Kincharov A.I., Demina E.A., Kincharova M.N., Taranova T.Yu., Mullayanova O.S., Chekmasova K.Yu. Methodology for assessing the agroecological adaptability of genotypes under global climate warming. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(4):39-47. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-4-39-47

Введение

Сохраняющиеся тенденции существенного увеличения до 2050 г. численности населения земного шара (Vollset et al., 2020) и глобальное потепление климата, приводящее к увеличению частоты экстремальных погодных явлений, включая волны жары, засухи и ливни (Battisti, Naylor, 2009), ставят перед научным сообществом всех стран вопросы стабильного повышения производства сельскохозяйственной продукции. Как отмечают J. Hansen et al. (2012), частота проявлений чрезвычайно жаркой погоды по сравнению с десятилетиями до 1980 г. увеличилась приблизительно в 50 раз. Сорок лет назад чрезвычайная летняя жара, как правило, затрагивала 0,1–0,2% поверхности земного шара, сегодня – около 10% (Hansen et al., 2012). За последние 20 лет климатической изменчивостью объясняется 31–51% вариабельности урожайности пшеницы в Западной Европе, 23–66% – в Восточной Европе и бывших советских республиках, таких как Российская Федерация, Украина, Казахстан, тогда как в южной Европе климатическая изменчивость ответственна за 15–45% вариабельности урожайности в Италии и Греции, и более 75% – на юге Испании (Ray et al., 2015). Учитывая данные факты и то, что в мире и в России большая часть посевных площадей находится в зонах, неблагоприятных для возделывания той или иной культуры, в частности в зонах рискованного засушливого земледелия, зависимость отрасли от погодноклиматических условий останется очень высокой, и в последующие десятилетия эта зависимость, скорее всего, будет только возрастать и станет более непредсказуемой.

Задача мировой аграрной науки – максимально снизить зависимость отрасли от погодных флуктуаций, существенно выходящих за пределы среднесезонных наблюдений. Европейскими исследованиями отмечается, что тепловой стресс, а не чувствительность к засухе, является ограничивающим фактором для адаптации пшеницы к изменению климата в Европе (Semenov, Shewry, 2011). В условиях же части Восточной Европы и Азии, в частности различных регионов России, где в некоторые летние месяцы гидротермический коэффициент составляет менее 0,1, чувствительность к засухе и засухе является не менее важным фактором, чем чувствительность к тепловому стрессу (Kincharov et al., 2020). Поэтому одним из важнейших направлений в решении данной задачи, несомненно, является создание адаптированных к меняющимся факторам среды сортов культурных растений, для которых характерна агроэкологическая адаптированность, связанная с большей приспособленностью новых сортов и гибридов к местным условиям и технологиям возделывания (Rybas', 2016). При этом уже на этапе подбора родительских форм для скрещиваний надо учитывать, что не любое разнообразие сортов является эффективным, а лишь разнообразие в ответах на критические погодные явления может повысить устойчивость к изменению климата (Kahiluoto et al., 2014), и такое разнообразие в ответах дает практические средства для повышения устойчивости и адаптации к изменению климата не только сортов, но и сельскохозяйственных культур (Mäkinen et al., 2015).

Главная отличительная особенность адаптированных сортов – сочетание высокой потенциальной продуктивности с устойчивостью к наиболее распространенным в регионе абиотическим и биотическим стрессорам (Popolzhukhina et al., 2020), а также доминирование гено-

типа над нерегулируемыми факторами внешней среды (Zhuchenko, 2004). Однако, несмотря на достижения селекции, предусмотреть и точно предсказать реакцию нового сорта в производственных условиях на комплексное воздействие неблагоприятных факторов среды практически невозможно. Наука предлагает в помощь различные методы оценки сортов по экологической пластичности (Eberhart, Russell, 1966; Martynov, 1989; Valekzhnin, Korobeinikov, 2011), адаптивности и стабильности (Khangildin, Biryukov, 1984; Kilchevsky, Khotyleva, 1989; Zhivotkov et al., 1994; Zharkova, 2019). Большей частью методы схожи, так как основаны на одних принципах начальных расчетов, но в дальнейшем, конечно, имеют свои особенности и ряд специфически рассчитанных показателей, характеризующих ценность материала в различных аспектах. Также многие исследователи сходятся во мнении, что для получения более полной информации необходимо применять несколько методов и для сравнения пользоваться принципом ранжирования сортов (Malchikov, Vyushkov, 2003).

Цель данной работы – разработать комплексный показатель, характеризующий максимальную агроэкологическую адаптированность генотипов к меняющимся условиям. Это особо актуально сегодня для многих европейских и азиатских стран в свете участвующих в последние годы проявлениях засух и тренда по глобальному потеплению климата.

При создании новых сортов селекционеры стремятся к получению идеальных форм, которые в любых условиях давали бы максимальный урожай зерна. Однако на данном этапе селекции это неосуществимо, и можно только максимально стремиться к тому, чтобы высокопродуктивные формы имели минимальную реакцию на ухудшение агроклиматических условий и максимальную отзывчивость на улучшение агротехники и складывающиеся благоприятные погодные условия. Чтобы оценить исходный материал и создаваемые сорта по комплексу этих показателей, нужен определенный алгоритм, суммарно учитывающий многие положительные и отрицательные факторы. Такая разработка необходима селекционным центрам для объективной оценки генофонда культурных растений в конкретных условиях, подбора исходного материала по разнообразию откликов и отбора сортов в селекционном процессе на этапе конкурсного испытания.

Материалы и методы

Для разработки комплексного показателя использованы данные шести лет (2015–2020 гг.) конкурсного испытания сортов пшеницы мягкой яровой на полях Поволжского научно-исследовательского института селекции и семеноводства имени П.Н. Константинова (Поволжский НИИСС, Самарская область, Российская Федерация), которые закладывались по методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур (Methodology..., 1989). Набор изучаемого материала включает пять сортов, зарегистрированных в Государственном реестре, и девять перспективных для передачи в государственное испытание линий. Условия лет изучения образцов были крайне разнообразными и характеризовались следующим образом: 2015, 2016 и 2019 г. – неблагоприятные погодные условия для культуры с засушливыми и остро засушливыми проявлениями в течение вегетационного периода, 2017 г. – благоприятный (220 мм осадков за вегетацию

яровой пшеницы при среднемноголетнем значении – 163 мм), 2018 г. – средний, в котором засушливые явления проявились от посева до начала налива зерна на фоне средних и пониженных температур воздуха, и 2020 г. – засушливые условия и высокий температурный фон в фазу налива зерна. Природно-климатическое местоположение опытного участка характерно для земледельческой площади более пяти миллионов гектаров, охватывающее части Самарской, Оренбургской областей и Республики Татарстан, характеризуется как зона рискованного земледелия, где засушливые годы чередуются с остро засушливыми и умеренно влажными, и это оказывает существенное влияние на объемы валовых сборов зерна по годам.

В работе использованы методы определения следующих показателей: индекса сорта (генотипа), вычисляемого как разность средней урожайности сорта и средней урожайности по опыту (всех сортов во всех средах); отзывчивости сорта (генотипа) на благоприятные условия – разность между максимальной урожайностью сорта и его средним значением, а также депрессии урожайности сорта (генотипа) на неблагоприятные условия, рассчитанной как разность между минимальным и максимальным значением по сорту.

Результаты и обсуждение

В данной работе оценку агроэкологической адаптивности генотипов к условиям среды проводим по данным конкурсного испытания лаборатории селекции и семеноводства яровой пшеницы Поволжского НИИСС – филиала Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук (СамНИЦ РАН). Аналогичную оценку можно провести по результатам трехлетней оценки коллекционного материала или оценки в течение одного года в трех экологических точках.

Для исследований необходимо проанализировать показатели урожайности определенного набора генотипов (сортов, линий) в трех и более контрастных условиях (годах), проявляющихся в регионе. Достоверность экспериментальных данных в условиях каждого года (экологической точки) необходимо подтверждать статистической обработкой (Dospikhov, 1985), выполненной соответствующим программным обеспечением, в том числе это возможно и с использованием общедоступной программы «Анализ данных» в Microsoft Office Excel. Наиболее удобным вариантом при этом является инструмент анализа «Двухфакторный дисперсионный анализ без повторений», который позволяет получить статистические данные как по строке (сорта), так и по столбцам (повторности). В таблице статистических данных получаем фактические значения F фактическое и F критическое по источнику вариации строки (сорта) и столбца (повторности). В нашем случае по первому году испытаний получены следующие данные по источникам вариации: Строки (сорта) $F = 6,25$, а F критическое $= 1,98$; Столбцы (повторности) $F = 150,43$, а F критическое $= 2,85$. Если F фактическое больше F теоретического, нулевая гипотеза отвергается и можно рассчитать наименьшую существенную разницу (НСР) между сортами, а далее использовать данные по соответствующему году (экологической точке) для оценки агроэкологической адаптивности сортов. Если F фактическое меньше F теоретического ($F < F$ критическое), нулевая гипотеза принимается ($H_0 = 0$) и данные по экологической точке не могут быть использованы в дальнейших расчетах.

После этого необходимо подготовить сводную таблицу экспериментальных данных, где будут представлены показатели урожайности зерна по сортам и годам (экологическим точкам). В нашем случае это данные урожайности зерна пшеницы мягкой яровой конкурсного испытания пяти сортов и девяти перспективных линий за шесть лет (табл. 1).

По имеющимся данным рассчитываем среднюю урожайность каждого сорта за годы исследований (X_i). Определяется как отношение суммы урожайности за годы испытания к количеству лет испытания:

$$X_i = \frac{\sum X_{ij}}{m}, \quad (1)$$

где: X_i – средняя урожайность сорта за годы испытания; $\sum X_{ij}$ – сумма урожайности i -го сорта по годам; m – количество лет испытания.

В данном случае средняя урожайность сорта 'Кинельская 59' равна:

$$X_i = (1,76 + 1,99 + 3,03 + 2,27 + 1,78 + 3,28) / 6 = 2,35.$$

Аналогично рассчитываем среднюю урожайность по другим сортам.

Огромное значение для выполнения дальнейших аналитических расчетов имеет показатель средней урожайности по опыту (X), которая определяется как отношение суммы урожайности зерна всех сортов за все годы испытания к произведению количества сортов и лет испытания:

$$X = \frac{\sum_i \sum_j X_{ij}}{m * n}, \quad (2)$$

где: X – средняя урожайность сортов по опыту за годы испытания; $\sum_i \sum_j X_{ij}$ – сумма урожайности по сортам и по годам; m – количество лет испытания; n – количество сортов в испытании.

Средняя урожайность по опыту в нашем случае равна: $X = (1,76 + 1,99 + 3,03 + \dots + 3,10 + 2,25 + 3,40) / 6 * 14 = 147,69 / 84 = 2,75$.

Наиболее важным и ценным показателем для разработки метода оценки агроэкологической адаптивности генотипов является индекс урожайности сорта (I_i), рассчитываемый аналогично индексу условий среды по S. A. Eberhart, W. A. Russell (1966) или как общая адаптивная способность сорта (OAC_i) по А. В. Кильчевскому и Л. В. Хотылевой (Kilchevsky, Khotyleva, 1989), определяемая как разность средней урожайности по сорту и средней урожайности по опыту (выражено в тех же единицах, что и урожайность):

$$I_i = X_i - X, \quad (3)$$

где: I_i – индекс урожайности сорта; X_i – средняя урожайность i -го сорта; X – средняя урожайность по опыту.

В нашем случае индекс урожайности сорта 'Кинельская 59' в исследованиях будет равен: $I_i = 2,35 - 2,75 = -0,40$ т/га (показатель имеет как отрицательные, так и положительные значения). Для контроля суммарное значение индексов урожайности всех сортов по опыту должно равняться нулю. Аналогично определяется и индекс условий года (I_j) – разность средней урожайности сортов за год и средней урожайности по опыту. Данный показатель необходим для анализа условий года и оценки реакции сортов на них.

В работе предлагаем ввести понятие и рассчитать один из базовых для дальнейших расчетов показатель – относительное значение индекса урожайности сорта ($I_{i\%}$), определяемое как отношение разности средней уро-

Таблица 1. Урожайность зерна образцов конкурсного испытания пшеницы мягкой яровой за 2015–2020 гг.**Table 1. Grain yield of cultivars in the competitive testing of spring bread wheat across 2015–2020**

Сорт, линия / Cultivar, line	Урожайность зерна, т/га / Grain yield, t/ha							Индекс урожайности сорта / Cultivar's yield index (I _p), t/ha
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Средняя / Mean (X _p)	
Кинельская 59	1,76	1,99	3,03	2,27	1,78	3,28	2,35	–0,40
Кинельская отрада	1,99	1,87	3,13	2,48	1,82	3,39	2,44	–0,31
Кинельская нива	2,11	2,10	3,65	2,80	2,01	3,33	2,66	–0,09
Кинельская 2010	2,08	2,09	3,65	2,95	1,93	3,56	2,71	–0,04
Кинельская юбилейная	2,18	2,20	4,10	2,83	2,24	3,57	2,85	0,10
Erythrospermum 4144	2,12	2,08	4,01	2,91	2,05	3,51	2,78	0,03
Erythrospermum 4146	2,25	2,19	3,75	2,95	2,04	3,61	2,80	0,05
Lutescens 6102	2,30	2,39	4,08	3,22	2,31	3,43	2,95	0,20
Erythrospermum 6310	2,43	2,46	3,68	3,15	2,39	3,73	2,97	0,22
Erythrospermum 6381	2,27	2,34	3,60	2,84	2,10	3,33	2,74	–0,01
Erythrospermum 6517	2,18	2,41	3,82	2,96	2,24	3,59	2,86	0,11
Erythrospermum 6019	2,37	2,08	3,58	3,03	1,91	2,91	2,65	–0,10
Lutescens 6029	2,64	2,28	4,06	3,15	2,11	2,82	2,84	0,09
Lutescens 6045	2,34	2,25	4,07	3,10	2,25	3,40	2,90	0,15
Средняя / Mean (X _p)	2,21	2,19	3,73	2,90	2,08	3,39	2,75	0,00
HCP / LSD	0,08	0,11	0,18	0,12	0,09	0,16		
Индекс условий года / Index of year conditions (I _p), t/ha	–0,54	–0,56	0,98	0,15	–0,67	0,64	0,00	

жайности сорта и средней урожайности по опыту к средней урожайности по опыту, выраженное в процентах (полученные результаты имеют как положительное, так и отрицательное значение):

$$I_{p\%} = \frac{X_i - X}{X} * 100\%, \quad (4)$$

где: $I_{p\%}$ – относительное значение индекса урожайности сорта; X_i – средняя урожайность i -го сорта; X – средняя урожайность по опыту.

Относительное значение индекса урожайности сорта 'Кинельская 59' равно: $I_{p\%} = (2,35 - 2,75) / 2,75 * 100\% = -14,55\%$. Показатель свидетельствует о том, что сорт по продуктивности в анализируемых условиях на 14,55% уступает среднему значению опыта. Наиболее высокие относительные значения индекса урожайности показала селекционная линия Erythrospermum 6310, со значением 8,00%.

Важным показателем адаптивности и пластичности, хозяйственной ценности и приспособленности сорта к определенным агроэкологическим условиям среды является его отзывчивость на благоприятные условия. Степень отзывчивости сорта (R_i – variety responsiveness) на благоприятные условия среды в изучаемом наборе генотипов предлагаем определять как отношение разности урожайности в благоприятный год ($X_{i\max}$) и средней уро-

жайности по сорту (X_i) к средней урожайности по опыту (X), выраженное в процентах:

$$R_{i\%} = \frac{X_{i\max} - X_i}{X} * 100\%, \quad (5)$$

где: $R_{i\%}$ – степень отзывчивости сорта; $X_{i\max}$ – максимальная урожайность i -го сорта за годы испытания; X_i – средняя урожайность i -го сорта; X – средняя урожайность по опыту.

Относительное значение отзывчивости сорта 'Кинельская 59' в исследованиях составит: $R_i = (3,28 - 2,35) / 2,75 * 100\% = 33,82\%$. Данный показатель свидетельствует о том, что сорт 'Кинельская 59' при улучшении погодных и агротехнологических условий (в пределах изученных) способен увеличить продуктивность зерна на 33,82%, а сорт 'Кинельская юбилейная' – на 45,45% относительно средней продуктивности изучаемого набора сортов. Расчет показателя относительно средней урожайности по опыту сделан для того, чтобы несколько скорректировать отзывчивость сортов с низкой и высокой средней урожайностью, так как при делении на более высокие значения средней урожайности – при одинаковой фактической разности ($X_{i\max} - X_i$) – показатель будет снижаться, что не совсем корректно для предлагаемой методики.

Немаловажное значение в агроклиматических условиях зоны проведения исследований имеют показатели,

характеризующие устойчивость сорта к комплексу неблагоприятных факторов внешней среды, к которым в первую очередь относятся засушливые и остро засушливые явления, тепловой стресс и другие проявления абиотического и биотического характера. Одним из наиболее информативных показателей в данном случае является депрессия урожайности зерна на неблагоприятные факторы, как на отдельные из них, так и комплексное их воздействие. В работе предлагаем определить степень депрессии урожайности зерна сорта ($D_{i\%}$ – variety depression) как отношение разности урожайности сорта в неблагоприятный год ($X_{i\min}$) и урожайности в благоприятный ($X_{i\max}$) к урожайности в благоприятный год, выраженное в процентах:

$$D_{i\%} = \frac{X_{i\min} - X_{i\max}}{X_{i\max}} * 100\%, \quad (6)$$

где: $D_{i\%}$ – степень депрессии урожайности сорта; $X_{i\min}$ – минимальная урожайность i -го сорта за годы испытания; $X_{i\max}$ – максимальная урожайность i -го сорта за годы испытания.

Степень депрессии урожайности зерна сорта 'Кинельская 59' в опыте составляет: $D_{i\%} = (1,76 - 3,28) / 3,28 * 100\% = -46,34\%$. Минимальные значения отмечены у перспективной селекционной линии *Erythrospermum* 6310, а также экстенсивных сортов старой селекции, отличающиеся низкой средней урожайностью за годы исследований.

Следует отметить, что степень депрессии урожайности всегда имеет отрицательное значение и учитывает минимальные и максимальные значения продуктивности по сорту. При этом генотипы с более низким значением максимальной продуктивности (знаменатель) в опыте будут иметь относительно и более высокие (отрицательные) показатели степени депрессии, что вполне логично для разрабатываемой системы оценки генофонда.

В данной работе предлагаем ввести понятие агроэкологической адаптированности генотипа, которое сум-

марно будет учитывать следующие моменты: индекс урожайности сорта в определенном наборе испытываемых образцов, отзывчивость сорта на улучшение агроклиматических условий (погода, условия минерального питания растений и т. д.) и депрессию урожайности зерна на неблагоприятные факторы среды (засуха, жара, суховеи, эпифитотии болезней и вредителей или их комплексное воздействие).

Степень агроэкологической адаптированности сорта (DAA_i – The degree of agroecological adaptation of the variety) предлагаем рассчитать путем сложения трех показателей – относительного индекса урожайности зерна сорта ($I_{i\%}$), степени отзывчивости ($R_{i\%}$) на благоприятные условия и степени депрессии урожайности зерна сорта ($D_{i\%}$):

$$DAA_i = I_{i\%} + R_{i\%} + D_{i\%}, \quad (7)$$

где: DAA_i – степень агроэкологической адаптированности i -го сорта; $I_{i\%}$ – относительное значение индекса урожайности сорта; $R_{i\%}$ – степень отзывчивости сорта на благоприятные условия; $D_{i\%}$ – степень депрессии урожайности сорта, вызванная различными стрессовыми факторами.

Расчетные данные всех показателей по каждому сорту заносим в таблицу 2 и находим их суммарные значения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что значения агроэкологической адаптированности в исследованной группе генотипов находятся в интервале от плюс 4,73 до минус 27,07. По имеющемуся диапазону их можно ранжировать и/или распределить по трем или пяти группам агроэкологической адаптированности. Для этого находим рассчитать интервалы для групп методом сложения модулей минимального и максимального значения агроэкологической адаптированности генотипа (сорта) ($|-27,07| + 4,73 = 31,8$) и последующего деления полученного значения на количество групп: при делении на три группы получаем 10,6, а при делении на пять групп – 6,36.

Таблица 2. Агроэкологическая адаптированность сорта (DAA_i) и значения составляющих его показателей (%), ранг и степень адаптированности

Table 2. Agroecological adaptability of cultivars (DAA_i) and the values of their constituent indicators (%), rank and degree of adaptability

Сорт, линия / Cultivar, line	Составляющие показатели / Component indicators			DAA_i		Степень адаптированности / Degree of adaptability
	$I_{i\%}$	$R_{i\%}$	$D_{i\%}$	%	Ранг / Rank	
Кинельская 59	-14,55	33,82	-46,34	-27,07	14	низкая
Кинельская отрада	-11,27	34,85	-46,31	-23,04	13	низкая
Кинельская нива	-3,27	36,00	-44,93	-12,20	10	средняя
Кинельская 2010	-1,45	34,18	-47,12	-14,40	11	средняя
Кинельская юбилейная	3,64	45,45	-46,83	2,26	3	высокая
<i>Erythrospermum</i> 4144	1,09	44,73	-48,88	-3,06	6	высокая
<i>Erythrospermum</i> 4146	1,82	34,55	-45,60	-9,24	8	средняя
<i>Lutescens</i> 6102	7,27	41,09	-43,63	4,73	1	высокая

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Сорт, линия / Cultivar, line	Составляющие показатели / Component indicators			DAA _i		Степень адаптированности / Degree of adaptability
	I _{i%}	R _{i%}	D _{i%}	%	Ранг / Rank	
Erythrospermum 6310	8,00	27,64	-35,92	-0,29	4	высокая
Erythrospermum 6381	-0,36	31,27	-41,67	-10,76	9	средняя
Erythrospermum 6517	4,00	34,91	-42,93	-4,02	7	высокая
Erythrospermum 6019	-3,64	33,82	-46,65	-16,47	12	низкая
Lutescens 6029	3,27	44,36	-48,03	-0,39	5	высокая
Lutescens 6045	5,45	42,55	-44,72	3,28	2	высокая

Примечание: I_{i%} – относительный индекс урожайности сорта; R_{i%} – степень отзывчивости сорта; D_{i%} – степень депрессии урожайности сорта; DAA_i – степень агроэкологической адаптированности сорта

Note: I_{i%} – the cultivar's relative yield index; R_{i%} – the cultivar's responsiveness degree; D_{i%} – the cultivar's yield depression degree; DAA_i – the cultivar's agroecological adaptability degree

Для предварительной оценки генотипов при изучении коллекционного материала для селекционных целей достаточно распределения изучаемых форм на три группы: 1 – сорта с высокой степенью агроэкологической адаптированности к условиям среды, 2 – со средней степенью и 3 – с низкой степенью адаптированности. Интервал для первой группы всегда начинается с максимально полученного нами в исследованиях значения – плюс 4,73, следовательно, второй группы – с минус 5,87 (4,73–10,6) и третьей – с минус 16,47 (-5,87–10,6). Применяя такую градацию, получаем, что в первую группу с высокой степенью агроэкологической адаптированности входят семь образцов – перспективные линии Lutescens 6102, Lutescens 6045, Erythrospermum 6310, Lutescens 6029, Erythrospermum 4144, Erythrospermum 6517 и сорт 'Кинельская юбилейная'. Четыре образца попадают во вторую группу со средней степенью адаптированности – линии Erythrospermum 4146 и Erythrospermum 6381, сорта 'Кинельская нива' и 'Кинельская 2010'. Самую низкую степень агроэкологической адаптированности показали три образца – линия Erythrospermum 6019 и сорта более ранней селекции, включенные в Государственный реестр селекционных достижений с 1995 по 2009 г. – 'Кинельская отрада' и 'Кинельская 59'.

Более интересная картина в научном плане – плане оценки перспективного селекционного материала и оценки родительских форм – формируется при разделении образцов на пять групп. В первую группу (с интервалом +4,73...–1,62) при соответствующем разделении попадают пять образцов – линии Lutescens 6102, Lutescens 6045, Erythrospermum 6310, Lutescens 6029 и сорт 'Кинельская юбилейная'. Во вторую группу (-1,63...–7,98) два образца – линии Erythrospermum 4144 и Erythrospermum 6517. В третью группу (-7,99...–14,34) попадают две линии – Erythrospermum 4146, Erythrospermum 6381 – и сорт 'Кинельская нива'. В четвертую группу (-14,35...–20,70) – сорт 'Кинельская 2010' и линия Erythrospermum 6019. В пятую группу (-20,71...–27,07) – два сорта ранней селекции 'Кинельская отрада' и 'Кинельская 59'.

Заключение

Предложенная методика оценки агроэкологической адаптированности генотипов культурных растений позволяет объективно оценивать изучаемый коллекционный и селекционный материал по степени приспособленности к условиям исследований, то есть условиям лет испытания или агроэкологических точек. При этом значения агроэкологической адаптированности и составляющих его элементов дают комплексное представление о характеристиках изучаемых генотипов по наиболее важным показателям отзывчивости и стрессоустойчивости растений и объективное представление о разнообразии откликов генотипов на изменение условий среды.

References / Литература

- Battisti D.S., Naylor R.L. Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. *Science*. 2009;323(5911):240-244. DOI: 10.1126/science.1164363
- Dospekhov B.A. Methodology of field trial (Metodika polevogo opyta). Moscow: Agropromizdat; 1985. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. Москва: Агропромиздат; 1985).
- Eberhart S.A., Russell W.A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*. 1966;6(1):36-40. DOI: 10.2135/crops ci1966.0011183X000600010011x
- Hansen J., Sato M., Ruedy R. Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2012;109(37):2415-2423. DOI: 10.1073/pnas.1205276109
- Kahiluoto H., Kaseva J., Hakala K., Himanen S.J., Jauhiainen L., Rötter R.P. et al. Cultivating resilience by empirically revealing response diversity. *Global Environmental Change*. 2014;25:186-193. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2014.02.002
- Khangildin V.V., Biryukov S.V. The problem of homeostasis in genetic and breeding research (Problema gomeostaza v genetiko-selektionnykh issledovaniyakh). In: *Genetic and Cytological Aspects in Crop Breeding (Genetiko-tsi-*

- tologicheskiye aspekty v seleksii selskokhozyaystvennykh rasteniy*). Odessa: VSGI; 1984. p.67-76. [in Russian] (Хангильдин В.В., Бирюков С.В. Проблема гомеостаза в генетико-селекционных исследованиях. В кн.: *Генетико-цитологические аспекты в селекции сельскохозяйственных растений*. Одесса: ВСГИ; 1984. С.67-76).
- Kilchevsky A.V., Khotyleva L.V. Genotype and environment in plant breeding (Genotip i sreda v seleksii rasteniy). Minsk: Nauka i Tekhnika; 1989. [in Russian] (Кильчевский А.В., Хотылева Л.В. Генотип и среда в селекции растений. Минск: Наука и техника; 1989).
- Kincharov A.I., Taranova T.Yu., Dyomina E.A. Specific reaction of spring soft wheat varieties to weather conditions. *The Bulletin of KrasGAU*. 2020;9(162):61-68. [in Russian] (Кинчаров А.И., Таранова Т.Ю., Дёмина Е.А. Специфическая реакция сортов яровой мягкой пшеницы на погодные условия. *Вестник КрасГАУ*. 2020;9(162):61-68). DOI 10.36718/1819-4036-2020-9-61-68
- Mäkinen H., Kaseva J., Virkajärvi P., Kahiluoto H. Managing resilience of forage crops to climate change through response diversity. *Field Crops Research*. 2015;183:23-30. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.07.006
- Malchikov P.N., Vyushkov A.A. Durum wheat breeding for yield (Seleksiya tverdogo pshenitsy na urozhaynost). In: *Genetics, Breeding and Seed Production of Crops (to the 100th anniversary of Samara Scientific Research Institute of Agricultural Sciences) (Genetika, seleksiya i semenovodstvo selskokhozyaystvennykh kultur [k 100-letiyu Samarskogo NIISKh])*. Samara; 2003. p.89-118. [in Russian] (Мальчиков П.Н., Вьюшков А.А. Селекция твердой пшеницы на урожайность. В кн.: *Генетика, селекция и семеноводство сельскохозяйственных культур (к 100-летию Самарского НИИСХ)*. Самара; 2003. С.89-118).
- Martynov S.P. Assessment of the environmental plasticity in crop cultivars (Otsenka ekologicheskoy plastichnosti sortov selskokhozyaystvennykh kultur). *Agricultural Biology*. 1989;(3):124-128. [in Russian] (Мартинов С.П. Оценка экологической пластичности сортов сельскохозяйственных культур. *Сельскохозяйственная биология*. 1989;(3):124-128).
- Methodology of state crop variety trials. Second issue. Cereals, groats, legumes, maize, and fodder crops (Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya selskokhozyaystvennykh kultur. Vypusk vtoroy. Zernovye, krupyanye, zernobobovye, kukuruza i kormovye kultury). Moscow: Gosagroprom SSSR; 1989. [in Russian] (Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Выпуск второй. Зерновые, крупяные, зернобобовые, кукуруза и кормовые культуры. Москва: Госагропром СССР; 1989).
- Popolzukhina N.A., Popolzukhin P.V., Gaidar A.A., Parshutkin Yu.Yu., Yakunina N.A. Development of the adaptive spring bread wheat cultivar 'Omskaya Yubileynaya' under the conditions of the Siberian region. *Proceeding on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020;181(4):120-126. [in Russian] (Поползухина Н.А., Поползухин П.В., Гайдар А.А., Паршуткин Ю.Ю., Якунина Н.А. 'Омская юбилейная' – адаптивный сорт яровой мягкой пшеницы для Сибирского региона. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020;181(4):120-126). DOI 10.30901/2227-8834-2020-4-120-126
- Ray D.K., Gerber J.S., MacDonald G.K., West P.C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications*. 2015;6:5989. DOI: 10.1038/ncomms6989
- Rybas' I.A. Breeding grain crops to increase adaptability (review). *Agricultural Biology*. 2016;51(5):617-626. [in Russian] (Рыбась И.А. Повышение адаптивности в селекции зерновых культур (обзор). *Сельскохозяйственная биология*. 2016;51(5):617-626). DOI 10.15389/agrobiology.2016.5.617rus
- Semenov M.A., Shewry P.R. Modelling predicts that heat stress, not drought, will increase vulnerability of wheat in Europe. *Scientific Reports*. 2011;1:66. DOI: 10.1038/srep00066
- Valekzhanin V.S., Korobeinikov N.I. Ecological plasticity of genetically polymorphic samples of spring bread wheat. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2011;(12):25-27. [in Russian] (Валекжанин В.С., Коробейников Н.И. Экологическая пластичность генетически полиморфных образцов яровой мягкой пшеницы. *Достижения науки и техники АПК*. 2011;(12):25-27).
- Vollset S.E., Goren E., Yuan C.W., Cao J., Smith A.E., Hsiao T. et al. Fertility, mortality, migration, and population scenarios for 195 countries and territories from 2017 to 2100: a forecasting analysis for the Global Burden of Disease Study. *Lancet*. 2020;396(10258):1285-1306. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30677-2
- Zharkova S.V. Assessment of environmental adaptability parameters in a limited number of test points. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2019;10-1(37):138-141. [in Russian] (Жаркова С.В. Оценка параметров адаптивности среды в ограниченном количестве пунктов испытания. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2019;10-1(37):138-141).
- Zhivotkov L.A., Morozova Z.A., Sekatueva L.I. Methods of detecting potential productivity and adaptability in cultivars and breeding forms of winter wheat according to their 'yield' indicator (Metodika vyyavleniya potentsialnoy produktivnosti i adaptivnosti sortov i selektsionnykh form ozimoy pshenitsy po pokazatelyu "urozhaynosti"). *Seleksiya i semenovodstvo = Plant Breeding and Seed Production*. 1994;(2):3-6. [in Russian] (Животков Л.А., Морозова З.А., Секатуева Л.И. Методика выявления потенциальной продуктивности и адаптивности сортов и селекционных форм озимой пшеницы по показателю «урожайности». *Селекция и семеноводство*. 1994;(2):3-6).
- Zhuchenko A.A. Opportunities for releasing plant cultivars and hybrids taking into account the climate change (Vozmozhnosti sozdaniya sortov i gibridov rasteniy s uchetom izmeneniya klimata). In: *A strategy for Adaptive Breeding of Field Crops in Connection with Global Climate Change (Strategiya adaptivnoy seleksii polevykh kultur v svyazi s globalnym izmeneniyem klimata)*. Saratov; 2004. p.10-16. [in Russian] (Жученко А.А. Возможности создания сортов и гибридов растений с учетом изменения климата. В кн.: *Стратегия адаптивной селекции полевых культур в связи с глобальным изменением климата*. Саратов; 2004. С.10-16).

Информация об авторах

Александр Иванович Кинчаров, кандидат сельскохозяйственных наук, директор, Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Поволжский научно-исследовательский институт селекции и семеноводства им. П.Н. Константинова – филиал СамНЦ РАН, 446442 Россия, Самарская обл., пгт. Усть-Кинельский, ул. Шоссейная, 76, kincharov_ai@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5492-8582>

Елена Анатольевна Дёмина, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией, Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Поволжский научно-исследовательский институт селекции и семеноводства им. П.Н. Константинова – филиал СамНЦ РАН, 446442 Россия, Самарская обл., пгт. Усть-Кинельский, ул. Шоссейная, 76, elena_pniiss@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4470-8022>

Марина Николаевна Кинчарова, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Поволжский научно-исследовательский институт селекции и семеноводства им. П.Н. Константинова – филиал СамНЦ РАН, 446442 Россия, Самарская обл., пгт. Усть-Кинельский, ул. Шоссейная, 76, potatolab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1987-8708>

Татьяна Юрьевна Таранова, младший научный сотрудник, Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Поволжский научно-исследовательский институт селекции и семеноводства им. П.Н. Константинова – филиал СамНЦ РАН, 446442 Россия, Самарская обл., пгт. Усть-Кинельский, ул. Шоссейная, 76, tatyana_0710.88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3090-8549>

Ольга Сергеевна Муллаянова, младший научный сотрудник, Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Поволжский научно-исследовательский институт селекции и семеноводства им. П.Н. Константинова – филиал СамНЦ РАН, 446442 Россия, Самарская обл., пгт. Усть-Кинельский, ул. Шоссейная, 76, brezneva_os88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0163-4481>

Кристина Юрьевна Чекмасова, младший научный сотрудник, Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Поволжский научно-исследовательский институт селекции и семеноводства им. П.Н. Константинова – филиал СамНЦ РАН, 446442 Россия, Самарская обл., пгт. Усть-Кинельский, ул. Шоссейная, 76, kristina.chekmasova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2156-2075>

Information about the authors

Aleksandr I. Kincharov, Cand. Sci. (Agriculture), Director, Samara Federal Research Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Volga Scientific Research Institute of Selection and Seed-Growing named after P.N. Konstantinov, 76 Shosseynaya St., Ust-Kinelsky Town., Samara Province 446442, Russia, kincharov_ai@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5492-8582>

Elena A. Demina, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Samara Federal Research Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Volga Scientific Research Institute of Selection and Seed-Growing named after P.N. Konstantinov, 76 Shosseynaya St., Ust-Kinelsky Town., Samara Province 446442, Russia, elena_pniiss@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4470-8022>

Marina N. Kincharova, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Samara Federal Research Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Volga Scientific Research Institute of Selection and Seed-Growing named after P.N. Konstantinov, 76 Shosseynaya St., Ust-Kinelsky Town., Samara Province 446442, Russia, potatolab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1987-8708>

Tatyana Yu. Taranova, Associate Researcher, Samara Federal Research Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Volga Scientific Research Institute of Selection and Seed-Growing named after P.N. Konstantinov, 76 Shosseynaya St., Ust-Kinelsky Town., Samara Province 446442, Russia, tatyana_0710.88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3090-8549>

Olga S. Mullayanova, Associate Researcher, Samara Federal Research Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Volga Scientific Research Institute of Selection and Seed-Growing named after P.N. Konstantinov, 76 Shosseynaya St., Ust-Kinelsky Town., Samara Province 446442, Russia, brezneva_os88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0163-4481>

Kristina Yu. Chekmasova, Associate Researcher, Samara Federal Research Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Volga Scientific Research Institute of Selection and Seed-Growing named after P.N. Konstantinov, 76 Shosseynaya St., Ust-Kinelsky Town., Samara Province 446442, Russia, kristina.chekmasova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2156-2075>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.06.2021; одобрена после рецензирования 08.06.2022; принята к публикации 01.12.2022. The article was submitted on 30.06.2021; approved after reviewing on 08.06.2022; accepted for publication on 01.12.2022.