

Сравнительная оценка методов расчёта адаптивных реакций зерновых культур

© 2020. Л. В. Волкова, к. б. н., зав. лабораторией,
И. Н. Щенникова, д. с.-х. н., член-корр. РАН, зав. лабораторией,
Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока
имени Н. В. Рудницкого,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166 а,
e-mail: volkovkirov@mail.ru

Возделывание адаптивных сортов зерновых культур является основным принципом экологически чистого земледелия, позволяя снизить воздействие негативных антропогенных факторов на окружающую среду и обеспечить население экологически безопасной продукцией. В результате многолетнего изучения сортов яровой пшеницы и ячменя в условиях Волго-Вятского региона выявлена степень модификационной (39,2–55,1%) и генотипической (16,4–18,0%) изменчивости урожайности. Сорта ячменя характеризовались более высокой средней урожайностью (3,60–5,50 т/га) и реакцией на условия года (коэффициент вариации 25,2%), чем сорта пшеницы (2,62–3,71 т/га; 19,7%). В целях разработки региональной стратегии селекции на экологическую устойчивость проведена сравнительная оценка нескольких методов расчёта адаптивных реакций. В результате наиболее информативными оказались «показатель уровня и стабильности сорта» (ПУСС), «коэффициент вариации генотипа на среду» (V , %), «пластичность» (b_1), «фенотипическая стабильность» (S , %). Урожайность ячменя достоверно положительно коррелировала с критериями гомеостатичности, у пшеницы – с показателями пластичности. Системный подход к анализу адаптивных реакций позволил выделить высокоурожайные и экологически устойчивые сорта пшеницы (У-80, Т-79, П-57, Награда) и ячменя (Белгородский 100, 346-09, 52-12).

Ключевые слова: яровая пшеница, ячмень, сорт, урожайность, адаптивность, метод оценки.

Comparative evaluation of methods for calculating adaptive responses of cereals

© 2020. L. V. Volkova ^{ORCID: 0000-0002-0837-8425*}
I. N. Shchennikova ^{ORCID: 0000-0002-5143-9246*}
Federal Agricultural Research Center of North-East named N. V. Rudnitsky,
166 a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,
e-mail: volkovkirov@mail.ru

The cultivation of adaptive varieties of grain crops is the main principle of organic agriculture, allowing to reduce the impact of negative anthropogenic factors on the environment and provide the population with environmentally friendly products. As a result of many years of study of spring wheat and barley varieties in the Volga-Vyatka region, the degree of modification (39.2–55.1%) and genotypic (16.4–18.0%) yield variability was revealed. Barley varieties were characterized by a higher average yields (3.60–5.50 ton/ha) and a reaction to the conditions of the year (coefficient of variation 25.2%) than wheat cultivars (2.62–3.71 ton/ha; 19.7%). In order to develop a regional strategy of breeding for environmental sustainability, a comparative assessment of several methods of calculating adaptive reactions was carried out. As a result, the most informative were the “indicator of cultivar level and stability” (PUSS), as well as the widely used “genotype variation coefficient on medium” (V , %), “plasticity” (b_1), and “phenotypic stability” (S , %). Barley yield capacity was significantly positively correlated with homeostasis; high productivity in wheat was associated with increased plasticity. A systematic approach to the analysis of adaptive reactions has highlighted high-yield and environmentally sustainable cultivars of wheat (U-80, T-79, P-57, Nagrada) and barley (Belgorodsky 100, 346-09, 52-12).

Keywords: spring wheat, barley, cultivar, yield capacity, adaptability, evaluation method.

Имеющиеся прогнозы изменения климата представляют собой противоречивую картину. Почти полное согласие достигнуто только в вопросе глобального потепления, но сценарии будущего состояния климата и возможной реакции агроэкосистем весьма неопределённые [1, 2]. В этой связи одной из важнейших задач селекции является создание адаптивных, т. е. способных обеспечивать высокую и устойчивую продуктивность в различных условиях среды, сортов [3–6]. Внедрение их в сельскохозяйственное производство позволит стабилизировать урожайность при изменении тепловых, световых, водных ресурсов и плодородия почвы, а также при возможной изменчивости состава вредителей, болезней, сорных растений [7, 8].

Следует различать адаптацию географическую, которая предполагает приспособленность к большему разнообразию эдафических условий, но урожайность при этом лимитирована средними значениями, и сезонную, при которой эдафическая устойчивость может быть достаточно специфичной, но сорта и гибриды, приспособленные к конкретным условиям, могут обеспечивать максимальную потенциальную урожайность [9, 10]. Считают, что особый приоритет должна получить селекция на устойчивость к контрастным погодным условиям с учётом специфической приспособленности сортов к доминирующим стрессовым факторам конкретного региона. Всё это предопределяет особую актуальность разработки региональных селекционных программ экологической направленности [11].

Настоящее исследование ориентировано на изучение сезонной адаптации сортов яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и ячменя (*Hordeum vulgare* L.) в Волго-Вятском регионе в контрастные по гидротермическим условиям годы. Оценка адаптивного потенциала сортов была сделана на основе многолетних данных урожайности по ряду показателей, характеризующих пластичность, стабильность и гомеостатичность. Использование нескольких методов оценки позволило всесторонне изучить сорта и выделить наиболее информативные параметры для использования в рамках экологической селекции зерновых культур в условиях Волго-Вятского региона.

Цель исследований – определить степень изменчивости урожайности районированных и перспективных сортов яровой пшеницы и ячменя, выделить экологически устойчивые сорта, на основе сравнительной оценки методов расчёта адаптивных реакций дать

рекомендации к использованию наиболее объективных параметров.

Объекты и методы

Исследования проводились в 2017–2019 гг. в ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока (г. Киров) в рамках конкурсного сортоиспытания. В качестве материала для изучения использовали сорта и перспективные номера селекции ФАНЦ Северо-Востока яровой мягкой пшеницы (13 генотипов) и ярового ячменя (17 генотипов). Почва опытного участка типичная для региона (дерново-подзолистая среднесуглинистая), рН = 4,8–5,2 ед.; содержание гумуса – 2,0%, фосфора – 190 мг/кг почвы, калия – 130 мг/кг, азота – 110 мг/кг. Погодные условия в годы проведения исследований существенно различались по температурному режиму и количеству осадков. Вегетационный период 2017 г. характеризовался избыточным увлажнением, 2018 г. – благоприятным сочетанием тепла и влаги, 2019 г. – недостатком эффективных температур и избытком осадков.

Статистическую обработку данных проводили с использованием корреляционного и двухфакторного дисперсионного анализов [12]. Вклад факторов в формирование урожайности определяли по [13]. Отзывчивость сортов на изменение внешних условий среды (коэффициент регрессии – b_i) определяли по [14]. Гомеостатичность оценивали по параметрам «гомеостаз» (НОМ), «селекционная ценность сорта» (S_c) [15], индекс стабильности (ИС) [16]. Комплексный показатель уровня стабильности сорта (ПУСС) определяли согласно [17]. Фенотипическую стабильность сортов определяли по коэффициенту вариации эквивалентов (W_i) [18] и отклонению от линии регрессии ($S\%$) [14]. Коэффициент мультипликативности (КМ) вычисляли по [19].

Результаты и обсуждение

Количественная оценка многих характеристик адаптивности базируется на статистическом анализе фенотипической изменчивости урожайности и является правомерной только в том случае, когда доказаны значимость влияния экологических условий на проявление признака. Влияние на урожайность факторов «год», «генотип», а также их взаимодействие было достоверным для обеих культур, причём большую часть изменчивости (39,2–55,1%) обуславливали метеорологические условия

вегетационного периода, меньшую – вклад генотипа (16,4–18,0%). Средняя урожайность изучаемого набора сортов пшеницы в разрезе «годы» варьировала в пределах от 2,42 до 3,45 т/га, ячменя – от 3,86 до 5,76 т/га, что характеризует ячмень как культуру, потенциально более урожайную и менее требовательную к условиям произрастания.

Наиболее простым и доступным показателем, позволяющим судить о потенциале онтогенетической адаптации (норме реакции), и при этом обеспечивающим сравнимость результатов у разных видов растений, является коэффициент вариации. Коэффициенты вариации урожайности (V), вычисленные для каждого сорта по данным за три года, указывают на фенотипическую изменчивость признака, обусловленную экологическими факторами. Как один из методов оценки адаптивных реакций, коэффициент вариации обладает как положительными (независимая оценка каждого генотипа), так и отрицательными (не обеспечивает информацией о характере ответа на среду) сторонами. В целом изучаемые номера ячменя характеризовались более выраженной реакцией на условия года, чем пшеницы. Согласно шкалы [12], сорта разделены на группы со средней ($V = 10–20\%$) и значительной ($V > 20\%$) изменчивостью, выделены сорта с наименьшей вариабельностью урожаев (табл.).

Коэффициент вариации использовали также для определения межсортовой вариабельности (V_c) изучаемых параметров адаптивности яровой пшеницы и ячменя. Чем шире размах значений в данном наборе сортов, тем выше дифференцирующая способность метода и тем точнее отбор нужных генотипов.

У яровой пшеницы показатель V_c урожайности в анализируемые годы находился в пределах 8,2–16,3%, при этом наблюдалась тенденция его увеличения с возрастанием общего уровня урожайности (коэффициент детерминации $r^2 = 0,79$), т. е. генотипические различия сильнее проявлялись в лучших условиях выращивания. У ячменя значение V_c изменялось от 10,5 до 19,1%, но связи со средним уровнем урожайности не выявлено ($r^2 = 0,18$). Максимальную среднюю урожайность за 2017–2019 гг. с достоверным превышением над стандартом формировали селекционные номера пшеницы У-80, ячменя – 346-09. В наших исследованиях отмечена достаточно сильная амплитуда изменчивости коэффициента вариации урожайности, следовательно, его высокая информативность.

Уровень изменчивости или модифицируемости признака, позволяющий генотипу приспособляться к разным условиям среды, принято называть пластичностью. При оценке пластичности широкое распространение получил метод [14], разделяющий взаимодействие «генотип–среда» на две части: линейную реакцию сорта на среду (b_i) и нелинейные отклонения от линии регрессии ($S\%$). К пластичным ($b_i > 1$) относят сорта интенсивного типа, хорошо реагирующие на высокий агрофон. Слабые и сильные отклонения от линии регрессии, выраженные через параметр $S\%$, соответствуют высокой и низкой фенотипической стабильности сортов. К достоинствам данного метода можно отнести универсальность его применения и возможность оценивать достоверность различий генотипов по значимости отклонения от общей линии регрессии. Недостатками являются трудоёмкость, длительность исследований и необходимость иметь большой набор сортов для изучения. Кроме того, коэффициент регрессии отражает отзывчивость на среду конкретного набора генотипов, что обуславливает слабую сопоставимость результатов с данными других авторов и невозможность прогнозировать уровень пластичности на ранних стадиях селекции [8, 20]. Существенным недостатком данного метода является и его зависимость от среднего значения признака [21], т. е. более урожайные сорта имеют и больший коэффициент регрессии («эффект шкалы»).

В наших исследованиях, согласно методике [14], к экстенсивным генотипам, обладающим достоверно низкой пластичностью ($b_i < 1$), можно отнести пшеницу Награда, П-57 и Т-79. Сорта с показателем b_i , значимо превышающим единицу, не выявлено. Относительно высокой отзывчивостью на условия среды среди сортов пшеницы характеризовались стандарт Маргарита, У-80, Т-66 ($b_i = 1,26–1,80$). Достоверно высокой пластичностью отличались генотипы ячменя Эколог, Форвард и селекционный номер 168-12 ($b_i = 1,03–1,40$).

В качестве меры пластичности сорта, кроме коэффициента регрессии признака (b_i), предлагается использовать коэффициент мультипликативности (КМ) [19], показывающий, во сколько раз в данном интервале экологического ряда возрос уровень признака. Однако, по [22, 23], КМ от сорта к сорту изменяется слабо, что затрудняет оценку адаптивных реакций. Наши результаты подтвердили справедливость данного утверждения: КМ

Таблица / Table

Параметры экологической устойчивости сортов зерновых культур, 2017–2019 г.
Environmental sustainability parameters for cereal varieties, 2017–2019

Показатель Sign	Культура Crop	Диапазон значений Range of values	V_c	r	Экологически устойчивые сорта / Environmentally sustainable varieties
Урожайность (т/га) Yield capacity (ton/ha)	пшеница wheat	2,62–3,71	10,8	–	У-80, Т-66, Т-79
	ячмень barley	3,60–5,50	10,6	–	346-09, 52-12, Белгородский 100 Belgorodskiy 100
Коэффициент вариации Coefficient of variation (V , %)	пшеница wheat	11,2–29,6	29,2	0,63*	П-57, Клара, Награда Klara, Nagrada
	ячмень barley	16,0–35,7	20,3	-0,57*	346-09, 52-12, Белгородский 100 Belgorodskiy 100
Пластичность Plasticity (b_i)	пшеница wheat	0,43–1,80	39,1	0,82*	У-80, Т-66, Маргарита / Margarita
	ячмень barley	0,13–1,42	30,8	0,06	168-12, Эколог, Форвард Ecolog, Forward
Коэффициент мультипликативности (КМ) Coefficient of multiplicativity (CM)	пшеница wheat	1,57–2,50	15,3	0,67*	У-80, Т-66, Маргарита / Margarita
	ячмень barley	1,15–2,52	16,5	-0,21	45-13, 168-12, Форсаж / Forsazh
Фенотипическая стабильность Phenotypic stability ($S\%$)	пшеница wheat	0,15–17,27	71,2	-0,03	Т-79, П-57, Награда / Nagrada
	ячмень barley	0,02–24,91	103,2	-0,02	288-12, 52-12, Форвард / Forward
Экваленты по Wricke Wricke's ecovalents (W_i)	пшеница wheat	0,71–17,28	50,6	-0,01	Т-79, У-28, Баженка / Bazhenka
	ячмень barley	0,65–34,36	97,8	-0,14	Форвард / Forward, 52-12, 29-11
Гомеостатичность Homeostaticity (НОМ)	пшеница wheat	12,5–25,6	27,7	-0,29	П-57, Т-79, Клара / Klara
	ячмень barley	11,9–34,4	31,3	0,81*	346-09, 52-12, Белгородский 100 Belgorodskiy 100
Селекционная ценность сорта Cultivar breeding value (S_c)	пшеница wheat	1,78–2,61	10,4	0,31	Т-79, П-57, Награда / Nagrada
	ячмень barley	2,3–4,0	17,0	0,91*	346-09, 52-12, Белгородский 100 Belgorodskiy 100
Уровень стабильности урожайности (ПУСС) Level of stability in yield capacity (PUSS)	пшеница wheat	80–174	26,4	0,09	Т-79, П-57, Награда / Nagrada
	ячмень barley	33–127	41,6	0,86*	346-09, 52-12, Белгородский 100 Belgorodskiy 100
Индекс стабильности (ИС) Stability index (IS)	пшеница wheat	12,5–25,6	27,7	-0,29	П-57, Т-79, Клара / Klara
	ячмень barley	11,9–34,4	31,3	0,81*	346-09, 52-12, Белгородский 100 Belgorodskiy 100

Примечание: V_c – межсортовая вариабельность средних трёхлетних значений (число наблюдений для яровой пшеницы $n = 13$, ячменя $n = 17$); r – коэффициенты парной корреляции между критериями адаптивности и урожайностью; * – достоверно при $P \geq 0,95$.

Note: V_c – inter-cultivar variability of average three-year values (number of observations for spring wheat $n = 13$, barley $n = 17$); r – coefficients of paired correlation between adaptive criteria and yield capacity; * – significantly at $P \geq 0.95$.

у сортов варьировал в небольших пределах в сравнении с показателем b_i .

На яровой пшенице был отмечен «эффект шкалы» для всех характеристик пластичности, о чём свидетельствует достоверность парных корреляций (r) между средним уровнем урожайности и показателями V , b_i и КМ (табл.). Необходимо отметить и очень высокую сходимость критериев пластичности между собой как у пшеницы, так и у ячменя ($r = 0,62-0,97$; достоверно при $P \geq 0,95$), из которых, по нашим расчётам, наилучшей информативностью обладает показатель b_i , поскольку имеет наибольшую межсортовую вариабельность и возможность оценивать достоверность различий генотипов.

Достаточно ценную информацию несёт показатель фенотипической стабильности сорта ($S\%$), который, во-первых, не зависел от урожайности у обеих культур, во-вторых, имел очень высокую дифференцирующую способность. По [20], данный показатель может служить для оценки предсказуемости ответа генотипа на среду. Можно предполагать, что для сортов с низким $S\%$ прогноз урожайности при изменении метеоусловий или разработке агротехнических мероприятий будет более точным, что особенно актуально при переходе на современные цифровые технологии в сельском хозяйстве.

Термин «экологическая валентность» (W_i) означает способность в разных экологических условиях сохранять определённый уровень продуктивности [18]. Чем выше показатель W_i (доля дисперсии, которая приходится на сорт, в общей дисперсии взаимодействия «генотип–среда»), тем меньше экологическая стабильность сорта. Значения W_i , рассчитанные для определённого набора сортов в конкретных условиях, служат скорее для их сравнительной характеристики, чем для объективной оценки, поскольку могут быть не сопоставимы с данными, полученными в других условиях. В наших исследованиях обнаружена очень высокая согласованность оценок $S\%$ и W_i ($r = 0,82-0,97$, достоверно при $P \geq 0,95$). Исходя из анализа, выделены номера с высокой экологической стабильностью ($W_i < 2,5$; очень слабые отклонения от регрессии): Т-79 (пшеница); Форвард, 52-12, 29-11 (ячмень).

Большой интерес представляют методы оценки гомеостаза как способности организма стабилизировать реакции и противостоять стрессам. Согласно [15], генотипы с высоким гомеостазом (НОМ) и высоким показателем селекционной ценности (S_c) слабо реагируют

на ухудшение условий и хорошо отзываются на их улучшение. Индекс стабильности (ИС), полностью идентичен НОМ, и тесно связан с S_c ($r = 0,78-0,95$, достоверно при $P \geq 0,95$).

Показатель уровня стабильности сорта (ПУСС) [17], характеризует одновременно уровень и стабильность урожайности по отношению к стандарту, что, на наш взгляд, также является мерой оценки гомеостаза. Все выше-названные критерии (НОМ, S_c , ПУСС) тесно коррелируют между собой ($r = 0,92-0,99$), но более удобен в использовании показатель ПУСС, так как он предполагает сравнение со стандартом и обладает более высокой информативностью.

Для ведения целенаправленной селекции важно знать согласованность между уровнем урожайности и критериями адаптивности. По нашим данным, высокоурожайные сорта ячменя могли быть как высоко, так и низко пластичными, но характеризовались высокими показателями гомеостаза. Сортам пшеницы, формирующим высокую урожайность, соответствовал более высокий уровень реакции на среду.

Заключение

За 2017–2019 гг. исследований в условиях Волго-Вятского региона урожайность яровой пшеницы и ячменя на 16,4–18,0% была обусловлена генотипом, и на 39,2–55,1% – метеорологическими условиями вегетационного периода, что подчёркивает важность исследований на экологическую устойчивость новых сортов. Для сортов ячменя была характерна более высокая средняя урожайность (3,60–5,50 т/га) и более выраженная реакция на условия года (коэффициент вариации 25,2%), чем для сортов пшеницы (соответственно 2,62–3,71 т/га; 19,7%). Для выявления агрономически ценных генотипов из многих методов оценки адаптивных реакций наиболее информативными оказались ПУСС, коэффициент вариации генотипа на среду (V), показатели пластичности и стабильности (b_i и $S\%$). Урожайность ячменя была достоверно положительно связана с критериями гомеостаза, в отличие от пшеницы, у которой высокая продуктивность была связана с повышенной пластичностью. Высоко отзывчивые генотипы ячменя, как правило, имели пониженную фенотипическую стабильность. Системный подход к анализу адаптивного потенциала позволил выделить генотипы пшеницы: Т-79 (высокоурожайный сорт с вы-

сокой фенотипической стабильностью); У-80 (высокоурожайный интенсивный сорт с низкой фенотипической стабильностью); П-57, Награда (экстенсивные сорта с минимальным откликом на среду). Среди генотипов ячменя следует выделить Белгородский 100, 346-09, 52-12, сочетающие высокую урожайность и высокие показатели гомеостаза.

Литература

1. Образцов А.С. Потенциальная продуктивность культурных растений. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2001. 504 с.
2. Зеленская Н.Н. Отклик целостной экосистемы на потепление климата // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 44–49.
3. Куркова И.В., Кузнецова А.С., Терехин М.В. Параметры экологической пластичности сортов сортообразцов ярового ячменя Амурской селекции // Вестник Новосибирского аграрного университета. 2015. № 3 (36). С. 19–24.
4. Лисицын Е.М., Шихова Л.Н., Овсянкина А.В. Эдафические стрессовые факторы северо-востока европейской России и проблемы селекции растений // Сельскохозяйственная биология. 2004. № 3. С. 42–60.
5. Des Marais D.L., Hernandez K.M., Juenger T.E. Genotype-by-environment interaction and plasticity: Exploring genomic responses of plants to the abiotic environment // Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. 2013. V. 44. P. 5–29.
6. Dockter C., Hansson M. Improving barley culm robustness for secured crop yield in a changing climate // Journal of Experimental Botany. 2015. V. 66. No. 12. P. 3499–3509.
7. Потанин В.Г., Алейников А.Ф., Стёпочкин П.И. Новый подход к оценке экологической пластичности сортов растений // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2014. Т. 18. № 3. С. 548–552.
8. Бочарникова О.Г., Шишляников Я.И., Шевченко В.Е. Биоклиматическая адаптация сортов озимой тритикале в каменной степи // Вестник Мичуринского ГАУ. 2019. № 1. С. 64–67.
9. Жученко А.А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы). Теория и практика. В трёх томах. М.: Агрорус, 2008. Т. 1. 814 с.
10. Thakur P., Prasad L.C., Prasad R., Omprakash, Chandra K., Rashmi K. Stability analysis for yield and related traits over four environments in wheat (*Triticum aestivum* L.) // Plant Archives. 2019. V. 19. No. 2. P. 3541–3545.
11. Гончаренко А.А. Экологическая устойчивость сортов зерновых культур и задачи селекции // Зерновое хозяйство России. 2016. № 3. С. 31–37.
12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 416 с.

13. Плохинский Н.А. Руководство по биометрии для зоотехников. М.: Колос, 1969. 256 с.
14. Eberhart S.A., Russel W.A. Stability parameters for comparing varieties // Crop. Sci. 1966. V. 6. No 1. P. 36–40.
15. Хангильдин В.В. Параметры оценки гомеостатичности сортов и селекционных линий в испытаниях колосовых культур // Научно-технический бюллетень Всесоюзного селекционно-генетического института. Одесса. 1986. № 2 (60). С. 36–41.
16. Удачин Р.А., Головченко А.П. Методика оценки экологической пластичности сортов пшеницы // Селекция и семеноводство. 1990. № 5. С. 2–6.
17. Неттевич Э.Д., Моргунов А.И., Максименко М.И. Повышение эффективности отбора яровой пшеницы на стабильность урожайности и качества зерна // Вестник сельскохозяйственной науки. 1985. № 1. С. 66–73.
18. Wrike G.Z. Pflanzenzüchtung. 1962. V. 47. No. 1. P. 92–96.
19. Кильчевский А.В., Хотылева Л.В. Экологическая селекция растений. Мн.: Тэналогия, 1997. 372 с.
20. Кильчевский А.В. Экологическая организация селекционного процесса // Экологическая генетика культурных растений: Материалы школы молодых ученых. Краснодар: РАСХН, Всесоюзный научно-исследовательский институт риса, 2005. С. 40–55.
21. Balcha A. Genotype by environment interaction for grain yield and association among stability parameters in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) // American Journal of Plant Sciences. 2020. V. 11. No. 1. P. 1–10.
22. Бебякин В.М., Кедрова Л.И., Кериватова Т.Б. Адаптивность: методические подходы, методы и критерии её оценки // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2005. № 7. С. 4–9.
23. Бебякин В.М., Кулеватова Т.Б., Старичкова Н.И. Методические подходы, методы и критерии оценки адаптивности растений // Известия Саратовского университета. 2005. Т. 5. Сер. Химия. Биология. Экология. Вып. 2. С. 69–71.

References

1. Obratsov A.S. Potential productivity of crop plants. Moskva: Rosinformagrotekh, 2001. 504 p. (in Russian).
2. Zelenskaya N.N. The response of a holistic ecosystem to climate warming // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 2. P. 44–49 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-2-044-049
3. Kurkova I.V., Kuznetsova A.S., Terekhin M.V. Parameters of ecological plasticity of cultivars and cultivar samples of spring barley of the Amur breeding // Vestnik Novosibirskogo agrarnogo universiteta. 2015. No. 3 (36). P. 19–24 (in Russian).
4. Lisitsyn E.M., Shikhova L.N., Ovsyankina A.V. Edaphic stressful factors of north-east european part of russia and the problems of plant // Selskokhozyaystvennaya biologiya. 2004. No. 3. P. 42–60 (in Russian).

5. Des Marais D.L., Hernandez K.M., Juenger T.E. Genotype-by-environment interaction and plasticity: Exploring genomic responses of plants to the abiotic environment // *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2013. V. 44. P. 5–29. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-110512-1358067
6. Dockter C., Hansson M. Improving barley culm robustness for secured crop yield in a changing climate // *Journal of Experimental Botany*. 2015. V. 66. No. 12. P. 3499–3509. doi: 10.1093/jxb/eru521
7. Potanin V.G., Aleynikov A.F., Stepochkin P.I. A new approach to estimation of the ecological plasticity of plant varieties. 2014. V. 18. No. 3. P. 548–552 (in Russian).
8. Bocharnikova O.G., Shishlyannikov Ya.I., Shevchenko V.E. Bioclimatic adaptation of winter triticale cultivars in Stone Steppe // *Vestnik Michurinskogo GAU*. 2019. No. 1. P. 64–67 (in Russian).
9. Zhuchenko A.A. Adaptive crop production (ecological-genetic foundations). Theory and practice. In three volumes. Moskva: Agrorus, 2008. V. 1. 814 p. (in Russian).
10. Thakur P., Prasad L.C., Prasad R., Omprakash, Chandra K., Rashmi K. Stability analysis for yield and related traits over four environments in wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Plant Archives*. 2019. V. 19. No. 2. P. 3544–3545.
11. Goncharenko A.A. Ecological stability of grain crop varieties and tasks of breeding // *Zernovoe khozyaystvo Rossii*. 2016. No. 3. P. 31–37 (in Russian).
12. Dospekhov B.A. Method of field experiment. Moskva: Kolos, 1981. 336 p. (in Russian).
13. Plokhinskiy N.A. Manual on biometrics for zootechnics. Moskva: Kolos, 1969. 256 p. (in Russian).
14. Eberhart S.A., Russel W.A. Stability parameters for comparing varieties // *Crop. Sci.* 1966. V. 6. No. 1. P. 36–40.
15. Khangildin V.V. Parameters of assessment of homeostateness of cultivars and selection lines in tests of cereal crops // *Nauchno-tehnicheskiy byulleten Vsesoyuznogo selektsionno-geneticheskogo goinstituta*. 1986. No. 2 (60). P. 36–41 (in Russian).
16. Udachin R.A., Golovchenko A.P. Methodology of assessment of ecological plasticity of wheat cultivars // *Seleksiya i semenovodstvo*. 1990. No. 5. P. 2–6 (in Russian).
17. Nettevich E.D., Morgunov A.I., Maksimenko M.I. Increasing the efficiency of selection of spring wheat for stability of yield and grain quality // *Vestnik selskokhozyaystvennoy nauki*. 1985. No. 1. P. 66–73 (in Russian).
18. Wrike G.Z. *Pflanzenzüchtung*. 1962. V. 47. No. 1. P. 92–96 (in Deutsch).
19. Kilchevskiy A.V., Khotyleva L.V. Ecological plant breeding. Minsk: Тэхналогія, 1997. 372 p. (in Russian).
20. Kilchevsky A.V. Ecological organization of breeding process // *Ecological genetics of cultural plants: Materialy shkoly molodykh uchenykh*. Krasnodar: RASKHN, All-Union Rice Research Institute, 2005. P. 40–55 (in Russian).
21. Balcha A. Genotype by environment interaction for grain yield and association among stability parameters in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) // *American Journal of Plant Sciences*. 2020. V. 11. No. 1. P. 1–10. doi: 10.4236/ajps.2020.111001
22. Bebyakin V.M., Kedrova L.I., Kerivatova T.B. Adaptability: methodological approaches, methods and criteria of its assessment // *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2005. No. 7. P. 4–9 (in Russian).
23. Bebyakin V.M., Kulevatova T.B., Starichkova N.I. Methodological approaches, methods and criteria for assessing plant adaptability // *Izvestiya Saratovskogo universiteta*. 2005. V. 5. Seriya Chemistry. Biology. Ecology. No. 2. P. 69–71 (in Russian).