

Анализ взаимодействия «генотип × среда» и оценка адаптивного потенциала ячменя в условиях Северного Зауралья

DOI: 10.30901/2227-8834-2021-3-63-73

УДК 633.16:631.527

Поступление/Received: 27.04.2021

Принято/Accepted: 02.09.2021



Analysis of the genotype × environment interactions and assessment of the adaptability potential in barley under the conditions of the Northern Trans-Urals

Н. В. ТЕТЯНИКОВ^{1*}, Н. А. БОМЕ²N. V. TETYANNIKOV^{1*}, N. A. BOME²

¹ Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства, 115598 Россия, г. Москва, ул. Загорьевская, 4
* [✉ tetyannikovnv@ya.ru](mailto:tetyannikovnv@ya.ru)

¹ Federal Horticultural Research Center for Breeding, Agrotechnology and Nursery, 4 Zagoryevskaya St., Moscow 115598, Russia
* [✉ tetyannikovnv@ya.ru](mailto:tetyannikovnv@ya.ru)

² Тюменский государственный университет, 625003 Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
[✉ bomena@mail.ru](mailto:bomena@mail.ru)

² University of Tyumen, 6 Volodarskogo St., Tyumen 625003, Russia
[✉ bomena@mail.ru](mailto:bomena@mail.ru)

Актуальность. Урожайность является сложным, комплексным признаком. Эффективность реализации высокой и стабильной урожайности определяется генотипом, влиянием окружающей среды и взаимодействием данных факторов. Комплексная оценка по показателям адаптации, пластичности и стабильности сортов позволяет выделить среди изучаемого сортимента наиболее перспективные, потенциально высокоурожайные и экологически пластичные формы растений, адаптированные к широкому диапазону условий окружающей среды.

Материалы и методы. Оценка 146 образцов двурядного (subsp. *distichon* L.) и многорядного (subsp. *vulgare*) ячменя (*Hordeum vulgare* L.) проведена в 2015–2017 гг. по показателям адаптивности, пластичности, стабильности и гомеостатичности урожайности ячменя. Статистическая обработка экспериментальных данных выполнена методами двухфакторного дисперсионного и корреляционного анализа.

Результаты и заключение. Установлено, что формирование урожайности ячменя практически в равной степени определяется генотипическими особенностями (34,3%), условиями окружающей среды (31,9%), а также взаимодействием факторов «генотип × среда» (33,7%), что указывает на относительно хорошую адаптивную способность ячменя к климатическим изменениям в условиях Северного Зауралья. Урожайность ячменя в большей степени сопряжена с массой зерна с растения ($r = 0,72$), количеством продуктивных стеблей на единицу площади ($r = 0,63$), в меньшей – с полевой всхожестью семян ($r = 0,39$) и массой 1000 зерен ($r = 0,37$). Выявлены сильные корреляции урожайности с коэффициентом адаптивности ($r = 0,94$), индексом экологической пластичности ($r = 1,00$), компенсаторной способностью ($r = 0,96$). Комплексом адаптивных и продуктивных свойств характеризовались образцы 'Abyssinian 14' (к-23504, var. *pallidum*) и 'Харьковский 70' (к-23683, var. *nutans*).

Ключевые слова: урожайность, стабильность, пластичность, гомеостатичность.

Background. Crop yield is a compound and complex character in breeding programs. A stable high yield is determined by the genotype, environmental impacts, and their interaction. A comprehensive assessment of cultivars based on their adaptability, plasticity and stability makes it possible to select among the studied assortment the most promising, potentially high-yielding and environmentally flexible plant forms adaptable to a wide range of environmental conditions.

Materials and methods. Evaluation of 146 accessions representing two-row (subsp. *distichon* L.) and six-row (subsp. *vulgare*) barleys (*Hordeum vulgare* L.) was performed in 2015–2017 to measure the adaptability, stability, plasticity and homeostasis of barley yield. Experimental data were statistically processed using the methods of the two-way ANOVA and correlation analysis.

Results and conclusion. It was established that barley yield formation was almost equally determined by the genotype (34.3%), environmental conditions (31.9%), and genotype × environment interactions (33.7%), showing that the tested barleys were relatively well adaptable to climate changes in the Northern Trans-Urals. Barley yield was more closely associated with grain weight per plant ($r = 0.72$) and the number of productive stems per area unit ($r = 0.63$), and to a lesser extent with seed germination rate in the field ($r = 0.39$) and 1000 grain weight ($r = 0.37$). Strong correlations were observed for the yield with the adaptability coefficient ($r = 0.94$), environmental plasticity index ($r = 1.00$), and compensatory capacity ($r = 0.96$). Cvs. 'Abyssinian 14' (k-23504, var. *pallidum*) and 'Kharkovsky 70' (k-23683, var. *nutans*) exhibited a set of adaptive and productive properties.

Key words: yield, stability, plasticity, homeostasis.

Введение

Стрессовое воздействие климатических факторов оказывает существенное влияние на рост и развитие растений, вызывая снижение урожайности сельскохозяйственных культур (Kendal, 2021). Агроэкологические зоны Тюменской области (таежная, подтаежная, северная лесостепь, южная лесостепь) отличаются резко континентальным климатом и контрастностью погодно-климатических условий, существенно варьируя по сумме активных температур и сумме осадков вегетационных периодов от таежной к южной лесостепной зоне (Ivanenko, Kulyasova, 2008).

Одними из лимитирующих факторов, определяющих урожайность сельскохозяйственных культур, являются недостаточная или избыточная тепло- и влагообеспеченность, проявляющиеся в отдельные годы (Yakubushina, 2018). Значительный размах между максимальной и минимальной урожайностью связывают с внедрением в производство новых сортов интенсивного типа, а также с недостаточной адаптивностью растений к жестким условиям окружающей среды, что в свою очередь отражается в общей вариабельности урожайности зерновых культур в Северном Зауралье (Sapega, Tursumbekova, 2018).

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) остается важной и значимой культурой во всем мире, применяемой в разных отраслях производства (Miralles et al., 2021). В Северном Зауралье он традиционно является основной фуражной культурой (Loginov et al., 2014). Основной упор при создании и внедрении в производство новых сортов делается на высокую и стабильную урожайность в сочетании с хорошими технологическими качествами зерна (Yakubushina, 2020).

Урожайность представляет собой сложный, комплексный признак, определяющийся генотипом, окружающей средой и эффектами их взаимодействия (Vaezi et al., 2019). Причинно-следственные связи в системе «генотип × среда» рассматриваются как важные для понимания и организации эффективной селекционной работы (Komaroff, 2012).

Для характеристики взаимодействия и интерпретации результатов полевых испытаний используются различные статистические методы оценки адаптации, пластичности и стабильности сортов, что является удобным инструментом для выделения перспективных, потенциально высокоурожайных и экологически пластичных форм растений в контрастных климатических условиях окружающей среды конкретного региона (Gudzenko, 2019).

Как правило, нестабильные и невысокие значения урожая происходят из-за совместного воздействия ряда стрессовых факторов, при которых эффект взаимодействия «генотип × среда» достаточно высок (Zenkina, Aseeva, 2019). Данное взаимодействие определяет фенотипическую изменчивость хозяйственно ценных признаков, а также способность реализовывать высокую и стабильную урожайность сельскохозяйственных культур (Kang, 2004). В связи с чем эффективное повышение стабильности урожая и его структуры должно достигаться за счет использования селекционного материала, адаптированного к широкому диапазону условий окружающей среды.

Целью исследования являлась оценка адаптивного потенциала ячменя на основе показателей адаптивности, стабильности, пластичности и их взаимосвязи с урожайностью в контрастных условиях окружающей среды.

Материал и методы исследования

Исследования проводились в 2015–2017 гг. в подтаежной зоне Нижнетавдинского района Тюменской области. Почва экспериментального участка окультуренная, дерново-подзолистая, супесчаная. Кислотность в солевой вытяжке почвы составила 6,6 (близкая к нейтральной). Объектом исследования служили 146 образцов дурядного (subsp. *distichon* L.) и многорядного (subsp. *vulgare*) ячменя различного эколого-географического происхождения. В качестве стандарта использовался рекомендованный к возделыванию по Западно-Сибирскому региону сорт 'Ача' (var. *nutans*). Полевые испытания проведены в соответствии с методикой полевого опыта (Dospikhov, 2014) и методическими указаниями по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса (Loskutov et al., 2012). Площадь учетных делянок – 1 м², междурядье – 15 см, глубина заделки семян – 5–6 см, норма высева – 500 шт./м².

Для оценки влияния изучаемых факторов на результирующий признак и выявления наиболее значимых среди них использовали статистический метод дисперсионного анализа. Обработка зависимости показателей выполнена методом корреляционного анализа (Dospikhov, 2014).

Коэффициент адаптивности (КА) рассчитан по методике Л. А. Животкова (Zhivotkov et al., 1994), индекс стабильности (ИС) – по Р. А. Удачину, А. П. Головченко (Udachin, Golovchenko, 1990). Оценку семенной продуктивности по показателю уровня стабильности сорта (ПУСС) проводили согласно Э. Д. Неттевичу и др. в изложении Ю. В. Горбуновой, Е. В. Власовой (Gorbunova, Vlasova, 2019). Показатель гомеостатичности (Hom) вычисляли по В. В. Хангильдину (Hangildin, Viryukov, 1984), индекс экологической пластичности (ИЭП) – по А. А. Грязнову (Gryaznov, 1996). Коэффициент индекса условий среды (Ij), пластичности (b_j) и стабильности (S²_j) определяли в соответствии с методикой S. A. Eberhart, W. A. Russell в изложении В. З. Пакудина и Л. М. Лопатиной (Pakudin, Lopatina, 1984). Стрессоустойчивость и компенсаторную способность вычисляли согласно методике А. А. Россиелле, J. Hemblin в изложении А. А. Гончаренко (Goncharenko, 2005).

Статистический анализ выполнен с использованием программного обеспечения Statistica 7.0. Достоверность различий определена по t-критерию Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Многолетнее полевое испытание позволяет более объективно оценить реакцию растений на климатические изменения окружающей среды. В наших исследованиях (2015–2017 гг.) рост и развитие ячменя проходили в контрастные по тепло- и влагообеспеченности вегетационные периоды (табл. 1).

Условия увлажнения носили неоднозначный характер, о чем свидетельствуют значения гидротермического коэффициента (ГТК). Вегетационные периоды 2015 и 2017 г. были влажные (ГТК = 1,5 и 1,6 соответственно), условия 2016 г. – засушливые (ГТК = 0,7). Индекс условий среды (I_j) позволяет сравнить условия возделывания исследуемых культур в конкретный год с усредненным результатом за весь период испытания (Yusova, 2018). При расчете было установлено, что вегетационный период 2016 г., несмотря на дефицит влаги в период прорастания семян и созревания зерна, был благоприятным

Таблица 1. Погодные условия в годы исследования
(2015–2017 гг., Тюмень)**Table 1. Weather conditions in the years of research**
(2015–2017, Tyumen)

Месяц	Среднесуточная температура воздуха, °С				Сумма осадков, мм			
	год			средняя многолетняя	год			средняя многолетняя
	2015	2016	2017		2015	2016	2017	
Май	13,4	12,2	10,2	11,3	49,3	5,8	65,2	45,0
Июнь	20,0	17,2	16,9	17,1	85,8	57,7	107,0	55,0
Июль	16,4	19,8	17,7	18,8	81,1	72,5	64,4	89,0
Август	13,1	21,2	17,0	15,8	65,6	13,8	45,0	60,0
ГТК	1,5	0,7	1,6		281,8	149,8	281,2	

($I_1 - 5,24$) за счет достаточного увлажнения в июне – июле, способствовавшего увеличению относительной скорости формирования биомассы. Оптимальные значения наблюдались в 2017 г. (3,89). Отрицательные значения индекса условий в 2015 г. (-9,13) свидетельствуют о неблагоприятно складывавшихся условиях вегетационного периода.

Оценку значимости и доли вклада генотипических и средообразующих факторов, а также генотип-средового взаимодействия в формирование хозяйственно ценных признаков ячменя определяли с помощью двухфакторного дисперсионного анализа. В наших расчетах фактор «генотип» обозначает генетические особенности

каждого из изученных коллекционных образцов ячменя. Фактор «окружающая среда» отражает метеорологические особенности (среднесуточная температура воздуха, количество выпавших осадков) исследуемых вегетационных периодов.

Контрастный климатический фон в годы исследования позволил установить статистически значимый вклад факторов внешней среды в общее фенотипическое варьирование ряда хозяйственно ценных признаков ячменя при 5-процентном уровне значимости ($P < 0,05$). Так, наибольший вклад условия года вносят в формирование изменчивости высоты и массы зерна с растения – 51,6 и 41,6% соответственно (табл. 2).

Таблица 2. Вклад факторов и их взаимодействия в формирование хозяйственно ценных признаков ячменя
(2015-2017 гг., Тюмень)**Table 2. Contribution of the factors and their interaction to the formation of useful agronomic traits in barley**
(2015–2017, Tyumen)

Источник варьирования	df	mS	F _{факт.}	Доля вклада фактора, %
Результаты дисперсионного анализа полевой всхожести семян				
Фактор А (генотип)	145	831,08	897,79*	33,1
Фактор В (окружающая среда)	2	45712,40	49381,41*	25,1
Взаимодействие А × В	290	523,57	565,60*	41,6
Неучтенный фактор	876	0,92	–	0,2
Результаты дисперсионного анализа высоты растений				
А (генотип)	145	669,45	1634,05*	29,5
В (окружающая среда)	2	24936,40	207319,77*	51,6
А × В	290	212,49	518,68*	18,7
Неучтенный фактор	876	0,41	–	0,2

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Источник варьирования	df	mS	F _{факт.}	Доля вклада фактора, %
Результаты дисперсионного анализа массы зерна с растения				
А (генотип)	145	0,81	1185,33*	25,0
В (окружающая среда)	2	97,53	142977,54*	41,6
А × В	290	0,53	789,09*	33,3
Неучтенный фактор	876	0,00	–	0,1
Результаты дисперсионного анализа массы 1000 зерен				
А (генотип)	145	212,64	426,34*	68,1
В (окружающая среда)	2	752,79	1509,36*	3,3
А × В	290	43,12	84,46*	27,6
Неучтенный фактор	876	0,49	–	1,0
Результаты дисперсионного анализа урожайности				
А (генотип)	145	39638,6	8197,95*	34,3
В (окружающая среда)	2	2678313,1	553920,75*	31,9
А × В	290	19428,1	4018,07*	33,7
Неучтенный фактор	876	4,8	–	0,1

Примечание: df – степень свободы; mS – средний квадрат; * P < 0,05
Note: df. – degrees of freedom, mS – mean squares, * P < 0.05

Изменчивость массы 1000 зерен в большей степени была обусловлена генотипическими особенностями (68,1%), превалирующими над влиянием среды и генотип-средовым взаимодействием. В формировании полевой всхожести семян наибольший эффект отмечен от влияния факторов «генотип × среда» (41,6%). Влияние климатических условий и генотипических особенностей ячменя, а также их совместного взаимодействия отражается в фенотипическом проявлении хозяйственно ценных признаков. Наличие достоверных эффектов генотип-средового взаимодействия подтверждается статистически достоверной значимостью данных факторов ($F_{\text{факт.}} > F_{\text{теор.}}$).

Неустойчивость гидротермического режима в период активного роста и развития растений может являться ключевым звеном, вносящим существенный вклад фактора среды в общую дисперсию урожайности (Dogan et al., 2016). В конкретной популяции варьирование урожайности также может быть вызвано фенологическими различиями генотипов и их реакцией на стрессовые условия (Van Oosterom et al., 1993). В рамках взаимодей-

ствия адаптация растений к стрессовым условиям может иметь ключевое значение для повышения стабильности и урожайности ячменя (Ceccarelli et al., 1994). В нашем исследовании доля влияния факторов на формирование урожайности практически в равной степени определялась генотипическими особенностями (34,3%), условиями внешней среды (31,9%), а также взаимодействием данных факторов (33,7%), что указывает на относительно хорошие адаптивные свойства ячменя к меняющимся факторам среды.

Корреляционный анализ позволяет установить степень сопряженности урожайности с основными показателями на фоне действия лимитирующих факторов, предоставляя возможность определения диагностических признаков оценки и отбора генотипов на ранних этапах селекционной работы (Volkova, 2016). Поскольку улучшение сортов по комплексу признаков является трудоемким процессом, понимание силы связи между конкретными признаками может помочь селекционеру в определении направления дальнейшей работы (Karahana, Akgun, 2019).

В ходе полевых исследований нами проводилась комплексная оценка по ряду хозяйственно ценных признаков. На основании корреляционного анализа установлено, что урожайность ячменя в большей степени была сопряжена с массой зерна с растения ($r = 0,72$), числом продуктивных стеблей на единицу площади ($r = 0,63$), в меньшей – с полевой всхожестью семян ($r = 0,39$) и массой 1000 зерен ($r = 0,37$) (рисунок).

Статистически значимая корреляция урожайности была менее выражена: с содержанием хлорофилла в листьях по показателям оптического счетчика SPAD 502, Minolta Co. Ltd., Tokyo, Japan ($r = 0,30$), высотой растений ($r = 0,28$), длиной колоса ($r = 0,19$). Взаимосвязь урожайности с устойчивостью растений к полеганию не установлена ($r = -0,06$).

Наряду с дисперсионным анализом, учитывающим взаимодействие «генотип × среда», разработаны методы оценки селекционного материала по свойствам адаптивности, пластичности и стабильности к изменяющимся внешним условиям среды, дополняющие информацию об общей приспособленности изучаемой культуры в конкретном регионе, а также позволяющие выделить лучшие генотипы по исследуемым параметрам.

Методика S. A. Eberhart, W. A. Russell (1966) является общепринятой для определения экологической стабиль-

ности и пластичности сорта. Сущность данного метода заключается в расчете коэффициента линейной регрессии (b_1) и дисперсии отклонений от линии регрессии (S^2_d) для каждого сорта. Зависимость роста пластичности сорта зачастую способствует снижению его стабильности. (Pakudin, Lopatina, 1984). В связи с этим для селекционной практики более ценными являются генотипы с высокой пластичностью ($b_1 > 1$) и низким индексом стабильности (S^2_d). В нашем опыте исследуемый материал обладал широким пределом изменчивости коэффициента регрессии – от $-0,95$ до $2,90$. Образцы с пластичностью ниже 1 ($b_1 < 1$) относятся к экстенсивному типу сортов с низкой отзывчивостью на улучшение условий выращивания. Высокой отзывчивостью ($b_1 > 1$) на улучшение условий характеризовался 71 образец, что характерно для сортов интенсивного типа. Наибольшее значение отмечено у многорядного образца 'Mansholts Fletument D' (к-24799, Нидерланды, var. *pallidum*) – 2,90, и двурядного 'Днепровский 427' (к-24741, Украина, var. *nutans*) – 2,72. Однако они имели высокие показатели стабильности ($S^2_d = 344,11$ и $504,26$ соответственно) и коэффициента вариации ($CV = 78,10\%$ и $89,61\%$), что говорит о значительной изменчивости их продуктивности при высокой отзывчивости на условия возделывания. Среди высокоурожайных образцов наибольшая пластичность, при

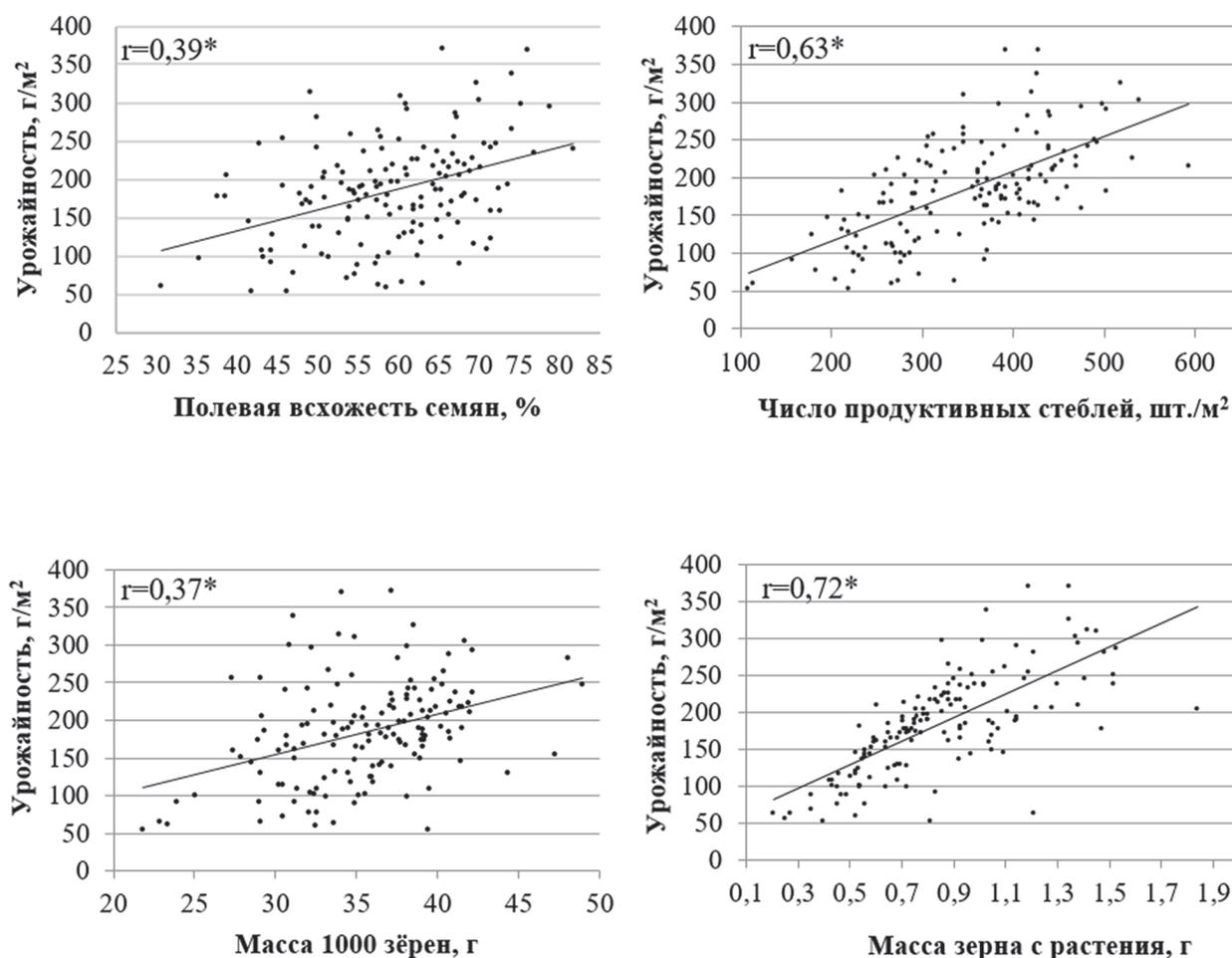


Рисунок. Корреляция урожайности с биологическими признаками ячменя

* – достоверно при 0,05 уровне значимости

Figure. Correlations of barley yield with biological characters

* – significant at the 0.05 level

относительно низкой фенотипической стабильности ($S^2_d = 3,9-45,2$), отмечена у 'Dz02-163' (к-22942, Эфиопия, var. *pallidum*) – 2,76; 'Abyssinian 14' (к-23504, Нидерланды, var. *pallidum*) – 2,18; Местный (26620, Эфиопия, var. *steudelii*) – 1,63, при среднем значении стандарта 'Ача': $b_1 = 1,31$ и $S^2_d = 74,9$.

Расчет коэффициента адаптивности позволяет оценить продуктивный и адаптивный потенциал сортов по изменчивости их урожайности относительно общей видовой адаптивной реакции растений на факторы внешней среды в различные вегетационные периоды (Zhivotkov et al., 1994). К потенциально высокопродуктивным генотипам нами было отнесено 73 образца с высоким коэффициентом адаптивности (КА = 1,01–1,99); у стандарта данное значение составило 1,50. Среди двурядного ячменя наибольшие значения наблюдались у образцов: 'L-2048/63/2 Lageiewnik' (к-22176, Польша) – 1,83; 'Galina' (к-22728, Германия) – 1,79; 'Wirkungerf' (к-25737, Германия) – 1,68; 'Харьковский 70' (к-23683, Украина) – 1,64; 'Cosmos' (к-21967, Франция), 'Haager Isdania' (к-25746, Германия) – 1,57; 'M-702/70' (к-22199, Чехословакия) – 1,52, относящихся к разновидности *nutans*, а также у образца Местный – 1,52. Высокие значения коэффициента адаптивности многорядного ячменя отмечены у образцов Ботаническая форма (к-24820, Германия, var. *harlani*) – 1,99; 'Abyssinian 14' – 1,98; 'С.І. 11071' (к-30711, Перу, var. *parallelum*) – 1,84; 'Arni 7' (к-25783, Германия, var. *pallidum*) – 1,75; 'Knezsza 65' (к-22809, Венгрия, var. *pallidum*) – 1,62; 'С.І. 10995' (к-30630, Перу, var. *sinicum*) – 1,53.

Гомеостатичность является важным свойством саморегуляции живого организма с внешней средой (Hapildin, 1986). Проявление гомеостаза позволяет стабилизировать и поддерживать нормальные реакции развития растительного организма и противостоять стрессовым воздействиям (Volkova, Shchennikova, 2020). В связи с этим селекционную ценность приобретают сорта с высокими значениями гомеостатичности. Как правило, в благоприятных условиях для таких генотипов свойственно формирование потенциально высокой урожайности, в то время как воздействие неблагоприятных факторов приводит к незначительному снижению продуктивности. Показатель гомеостатичности (Ном) стандарта составил 5,91%, среди изученных образцов высокие показатели были отмечены у трех образцов: 'С.І. DO-1637' (к-25279, США, var. *nutans*) – 170,2%, 'Нур' (к-30820, Россия, var. *nutans*) – 167,2%, 'Gitte' (к-25170, Германия, var. *nutans*) – 112,8%, при этом урожайность данных образцов (99,8–190,2 г/м²) была ниже стандарта (268,8 г/м²) как в среднем, так и отдельно по годам. Среди высокоурожайных образцов наибольшее значение Ном имел образец 'Galina' – 36,3%.

Наряду с показателем гомеостатичности, используются и другие методы оценки гомеостаза. Индекс стабильности (ИС) характеризует сорта по способности приспособляться к определенным условиям и формировать стабильную по годам урожайность, тем самым отражая гомеостаз (Volkova, Gireva, 2017). Изучаемый коллекционный материал характеризовался высокой вариабельностью индекса стабильности – от 0,67 до 26,21. Значение стандартного сорта 'Ача' составило 5,97. На уровне стандарта и более высокие индексы стабильности (ИС = 5,98–26,21) отмечены у 28 образцов, из которых 15 отнесены к подвиду двурядного ячменя, 13 – к многорядному. Стоит отметить, что среди выделенных образцов с высокой стабильностью превышающая стандарт

урожайность отмечена только у семи образцов: 'Galina', 'С.І. 11071', 'Abyssinian 14', Ботаническая форма, Местный, 'Knezsza 65', 'Харьковский 70'. У остальных образцов урожайность была ниже или на уровне стандарта. Наибольшие индексы были отмечены у четырех образцов: 'Нур' – 26,21; 'Gitte' – 24,49; 'Galina' – 23,74; 'С.І. 11071' – 21,24, что характеризует их как более стабильные и приспособленные к данным условиям.

Особенностью показателя ПУСС является зависимость его величины от среднего значения урожайности и ее стандартного отклонения, что позволяет провести сравнительную оценку испытываемого сорта со стандартом, вне зависимости от количества и набора изучаемого материала в конкретных условиях (Gorbunova, Vlasova, 2019). Отмечается, что комплексность, учитывающая уровень и стабильность урожайности, позволяет использовать данный показатель в качестве оценки гомеостатичности (Levakova, Eroshenko, 2017). Дифференцирование изучаемого материала позволило отнести к группе с наиболее высокими значениями ПУСС (более 100%) 21 образец, при максимуме 424,9% у двурядного образца 'Galina' и 391,7% у образца 'С.І. 11071', относящегося к подвиду многорядного ячменя.

При оценке испытываемых сортов в различных условиях среды применение индекса экологической пластичности (ИЭП) дает возможность наблюдать за способностью сортов формировать высокую и стабильную урожайность (Nikolaev et al., 2018). Чем выше данный показатель, тем более ценен сорт. Варьирование индекса отмечено в широком диапазоне (ИЭП = 0,30–2,02). Наиболее пластичными генотипами с высоким индексом (более 1,50) были семь двурядных образцов: 'L-2048/63/2 Lageiewnik' – 1,78; 'Харьковский 70' – 1,69; 'Днепровский 427' – 1,63; 'Cosmos 34' – 1,59; 'Galina' – 1,56; Местный – 1,54; 'M-702/70' – 1,53, а также семь многорядных: 'Abyssinian 14' – 2,02; Ботаническая форма – 2,02; 'Mansholts Fletument D' – 1,85; 'Montcalm T30-10' (к-24662, США, var. *rikotense*) – 1,71; 'Knezsza 65' – 1,66; 'Dz02-163' – 1,63; 'С.І. 11071' – 1,61.

Еще одним подходом дополнительной оценки адаптивности сортов к стрессовым условиям возделывания могут являться показатели стрессоустойчивости и компенсаторной способности (Nikolaev et al., 2018). Уровень устойчивости к стрессу ($Y_{min} - Y_{max}$) определяется разностью между максимальной и минимальной урожайностью сорта (Goncharenko, 2005). О высоких свойствах стрессоустойчивости свидетельствует наименьшее значение величины данного признака. Условное распределение образцов на группы показало, что высокая стрессоустойчивость (от –17,5 до –97,5) наблюдалась у группы, состоящей из 30 образцов двурядного и многорядного ячменя, при средней урожайности 54,6–296,0 г/м². Самая высокая устойчивость к стрессу отмечена у образца из США 'Comfort f8' (к-24678, США, var. *breviaristatum*), урожайность которого в среднем по годам составила 101,4 г/м². Сочетанием высокой стрессоустойчивости и урожайности характеризовались 'С.І. 11071' и 'Galina'.

Показатель компенсаторной способности ($Y_{min} + Y_{max}$)/2 служит дополнением оценки стрессоустойчивости и позволяет судить о генетической гибкости сорта и его степени соответствия факторам среды (Nikolaev et al., 2019). Высокой компенсаторной способностью отличались многорядные образцы 'Abyssinian 14', Ботаническая форма, 'Mansholts Fletument D', 'Knezsza 65', 'Cosmos 32'. Среди образцов двурядного ячменя выделились 'L-2048/63/2 Lageiewnik' и 'Днепровский 427'.

Большое количество методик в оценке адаптивности, устойчивости, пластичности и стабильности сортов дают возможность объективного целенаправленного отбора перспективного селекционного материала, в связи с чем важно понимание наиболее информативных показателей, сопряженных с изучаемым признаком.

На основе проведенного корреляционного анализа установлена зависимость формирования продуктивности ячменя от влияния экологических факторов внешней среды. Наибольшая достоверная сопряженность урожайности наблюдается с коэффициентом адаптивности ($r = 0,94$), индексом экологической пластичности ($r = 1,00$), компенсаторной способностью ($r = 0,96$). Также значимая связь урожайности отмечена со стрессоустойчивостью ($r = -0,67$), показателем уровня и стабильности сорта ($r = 0,58$), коэффициентом пластичности ($r = 0,53$) и стабильности ($r = 0,45$), что выделяет эти показатели как наиболее информативные при оценке адаптивных и продуктивных свойств ячменя в условиях Тюменской области. Другие высокозначимые корреляции (при $P < 0,05\%$) отмечены между показателями CV и ИС, b_i , $Y_{\min} - Y_{\max}$; КА и ПУСС, ИЭП, КС; ИС и ПУСС; ПУСС и ИЭП, КС; ИЭП и $Y_{\min} - Y_{\max}$; КС; b_i и $Y_{\min} - Y_{\max}$; S^2_d и $Y_{\min} - Y_{\max}$; КС; $Y_{\min} - Y_{\max}$ и КС (табл. 3).

Неблагоприятные условия возделывания ограничивают потенциал урожайности растений и получаемого урожая. Обширный и разносторонний изучаемый

ассортимент позволяет более объективно оценить продуктивный и адаптивный потенциал культуры в испытываемых условиях и выделить перспективный селекционный материал для создания новых сортов.

Как отмечалось ранее, создание новых сортов происходит с упором на высокую и стабильную урожайность, однако такой односторонний селекционный подход не в силах реализовать продуктивность растений в полной мере. В связи с этим в работах многих селекционеров акцентируется важность повышения адаптивности растений к контрастным погодным условиям конкретного региона возделывания для создания экологически устойчивых и высокопродуктивных сортов (Goncharenko, 2016; Surin et al., 2017).

Среди изученного материала особый интерес представляют образцы с потенциально высокой урожайностью. В качестве контроля использовали стандартный сорт 'Ача' со средней урожайностью 268,8 г/м². По усредненным данным (2015–2017 гг.), урожайность большей части исследуемых образцов (91,1%) была ниже стандарта. Относительно высокой урожайностью характеризовались 13 образцов, среди которых шесть относятся к подвиду многозерного ячменя, семь – к подвиду двурядного; превышение над стандартом составило 4,8–21,6% и 11,3–38,1%, соответственно. О широкой изменчивости признака свидетельствует коэффициент вариации (CV), который у выделенных генотипов варьировал от 12,10 до 89,61% (табл. 4).

Таблица 3. Коэффициенты парных корреляций между урожайностью и показателями адаптивности, пластичности и стабильности

Table 3. Pairwise correlation coefficients between the yield and the indicators of adaptability, plasticity and stability

Показатели	КА	ИС	ПУСС	Ном	ИЭП	b_i	S^2_d	$Y_{\min} - Y_{\max}$	КС	УР
CV	-0,32*	-0,68*	-0,55*	-0,23*	-0,06	0,62*	0,38*	-0,65*	-0,10	-0,06
КА		0,54*	0,70*	0,06	0,94*	0,23*	0,38*	-0,43*	0,95*	0,94*
ИС			0,94*	0,45*	0,38*	-0,27*	-0,11	0,26*	0,39*	0,38*
ПУСС				0,37*	0,58*	-0,10	0,02	0,06	0,58*	0,58*
Ном					0,02	-0,10	-0,11	0,17*	0,03	0,02
ИЭП						0,53*	0,45*	-0,67*	0,96*	1,00*
b_i							0,34*	-0,87*	0,42*	0,53*
S^2_d								-0,66*	0,58*	0,45*
$Y_{\min} - Y_{\max}$									-0,62*	-0,67*
КС										0,96*

Примечание: * $P < 0,05$; УР – урожайность; CV – коэффициент вариации (Dospikhov, 2014); КА – коэффициент адаптивности (Zhivotkov et al., 1994); ИС – индекс стабильности (Udachin, Golovchenko, 1990); ПУСС – показатель уровня и стабильности урожайности сорта (Gorbunova, Vlasova, 2019); Ном – гомеостатичность (Hangildin, 1986); ИЭП – индекс экологической пластичности (Gruazlov, 1996); b_i – коэффициент пластичности, S^2_d – стабильность (Pakudin, Lopatina, 1984); $Y_{\min} - Y_{\max}$ – стрессоустойчивость, КС – компенсаторная способность (Goncharenko, 2005)

Notice: * $P < 0.05$; УР – grain yield; CV – coefficient of variation; КА – coefficient of adaptability; ИС – stability index; ПУСС – index of the yield level and stability of a cultivar; Ном – homeostasis; ИЭП – environmental plasticity index; b_i – coefficient of plasticity; S^2_d – stability; $Y_{\min} - Y_{\max}$ – stress tolerance; КС – compensatory ability (Goncharenko, 2005)

Таблица 4. Показатели адаптивности, пластичности и стабильности высокоурожайных образцов ячменя (2015–2017 гг., Тюмень)
 Table 4. Adaptability, plasticity and stability indicators in high-yielding barley accessions (2015–2017, Tyumen)

№ по каталогу ВИР	Образец, разновидность	Урожайность, г/м ²		CV, %	% к стандарту	КА, %	b _i	S ² _d	ИС	ПУСС	Ном	ИЭП	Y _{min} -Y _{max}	КС
		min	max											
<i>Hordeum vulgare</i> L. subsp. <i>vulgare</i> – многоурядный														
23504	Abyssinian 14, <i>pallidum</i>	167,9	504,1	371,3	48,16	38,1	1,98	42,5	7,71	178,4	2,29	2,02	-336,2	336,00
24820	Ботаническая форма, <i>harlani</i>	171,2	587,1	370,7	56,24	37,9	1,99	343,7	6,59	152,2	1,58	2,02	-415,9	379,15
24799	Mansholts Fletument D, <i>pallidum</i>	61,4	589,3	339,3	78,10	26,2	1,62	344,1	4,34	91,8	0,82	1,85	-527,9	325,35
22809	Kneza 65, <i>pallidum</i>	161,7	466,4	305,0	50,21	13,5	1,69	200,3	6,07	115,4	1,99	1,66	-304,7	314,05
30711	C. I. 11071, <i>parallelum</i>	254,0	336,5	296,0	13,93	10,1	1,84	10,2	21,24	391,7	25,75	1,61	-82,5	295,25
22942	Dz02-163, <i>pallidum</i>	42,9	451,2	299,2	74,61	11,3	1,40	36,6	4,01	74,8	0,98	1,63	-408,3	247,05
<i>Hordeum vulgare</i> L. subsp. <i>distichon</i> L. – двуурядный														
22176	L-2048/63/2 Lagevnik, <i>nutans</i>	180,7	554,6	326,8	61,15	21,6	1,83	544,1	5,34	108,8	1,43	1,78	-373,9	367,65
23683	Харьковский 70, <i>nutans</i>	131,8	444,7	310,3	51,88	15,4	1,64	67,6	5,98	115,6	1,91	1,69	-312,9	288,25
24741	Днепроvский 427, <i>nutans</i>	35,1	570,3	298,7	89,61	11,1	1,39	504,3	3,33	62,0	0,62	1,63	-535,2	302,70
25977	Cosmos 34, <i>nutans</i>	92,7	511,1	292,9	71,64	9,0	1,79	351,4	4,09	74,6	0,98	1,59	-418,4	301,90
22728	Galina, <i>nutans</i>	247,9	313,3	287,4	12,10	6,9	1,15	1,6	23,74	425,0	36,28	1,56	-65,4	280,60
26620	Местный, <i>steudelii</i>	135,2	380,9	282,4	45,98	5,0	1,52	3,9	6,14	108,1	3,14	1,54	-195,7	233,05
22199	M-702/70, <i>nutans</i>	137,2	421,1	281,7	50,40	4,8	1,52	63,2	5,59	98,1	3,74	1,53	-283,9	279,15
St	Ача, <i>nutans</i>	154,8	395,6	268,8	45,00	-	1,00	74,9	5,97	100,0	5,91	1,46	-240,8	275,20

Примечание: расшифровка обозначений приведена в таблице 3
 Note: see the note to Table 3 for the list of abbreviations

Заключение

Изучение реакции образцов ячменя на факторы окружающей среды показало, что в формировании урожайности практически равнозначное значение имеют генотип (34,3%), среда (31,9%) и взаимодействие генотипа и среды (33,7%).

Выявлены различия по доли влияния каждого фактора на проявление отдельных признаков, определяющих зерновую продуктивность ячменя. Наибольшее действие фактора «генотип» обнаружено на признак массы 1000 зерен (68,1%), фактора «среда» – на высоту растений (51,6%) и массу зерна с растения (41,6%), взаимодействия факторов «генотип × среда» – на полевую всхожесть семян (41,6%).

Среди изученных хозяйственно ценных признаков тесная зависимость урожайности ячменя отмечена с массой зерна с растения ($r = 0,72$), количеством продуктивных стеблей на единицу площади ($r = 0,63$), полевой всхожестью семян ($r = 0,39$) и массой 1000 зерен ($r = 0,37$).

Анализ десяти показателей адаптивности и стабильности позволил выявить тесную корреляцию между ИЭП и КС ($r = 0,96$), КА и КС ($r = 0,95$), ИС и ПУСС ($r = 0,94$), КА и ИЭП ($r = 0,94$), b_i и $Y_{\min} - Y_{\max}$ ($r = -0,87$). Отмечены сильные корреляции урожайности с коэффициентом адаптивно-

сти ($r = 0,94$), индексом экологической пластичности ($r = 1,00$), компенсаторной способностью ($r = 0,96$), что позволяет рекомендовать эти показатели как наиболее информативные при отборе ценных форм ячменя для селекционных программ в условиях Северного Зауралья. Показатели уровня и стабильности урожайности сорта, стрессоустойчивости, коэффициент пластичности и коэффициент стабильности могут быть использованы для дополнительной информации о связи адаптивных и продуктивных свойств с урожайностью растений.

По результатам комплексной оценки и анализа полученных данных, наблюдаются различия в реализации высокой и стабильной зерновой продуктивности растений ячменя. У большинства генотипов формирование высокой урожайности сопровождается нестабильностью экологической устойчивости и пластичности. Среди выделенных образцов установлена широкая норма реакции на факторы окружающей среды. Наиболее стабильными образцами в условиях Северного Зауралья являются образец двурядного ячменя 'Galina' (к-22728, Германия, var. *nutans*) и многорядного – 'С.І. 11071' (к-30711, Перу, var. *parallelum*), относящиеся к экстенсивному типу. Комплексом адаптивных и продуктивных свойств характеризовались 'Abyssinian 14' (к-23504, var. *pallidum*) и 'Харьковский 70' (к-23683, Украина, var. *nutans*).

Работа выполнена в соответствии с темой НИОКТР «Изучение генетических ресурсов культурных растений и формирование коллекционного фонда для условий Северного Зауралья». Номер государственной регистрации 115050610202.

The work was carried out in accordance with the R&D theme "Study of genetic resources of cultivated plants and the formation of a collection fund for the conditions of the Northern Trans-Urals". State number registration 115050610202.

References / Литература

- Seccarelli S., Erskine W., Hamblin J., Grando S. Genotype by environment interaction and international breeding programmes. *Experimental Agriculture*. 1994;30(2):177-187. DOI: 10.1017/S0014479700024121
- Dogan Y., Kendal E., Oral R. Identifying of relationship between traits and grain yield in spring barley by GGE biplot analysis. *Agriculture and Forestry*. 2016;62(4):239-252. DOI: 10.17707/AgricultForest.62.4.25
- Dospikhov B.A. Methodology of field trial (with fundamentals of statistical processing of research results) (Metodika polevogo opyta [s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy]). 5th ed. Moscow: Alyans; 2014. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд. Москва: Альянс; 2014).
- Eberhart S.A., Russel W.A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*. 1966;6(1):36-40. DOI: 10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x
- Goncharenko A.A. Ecological stability of grain crop varieties and tasks of breeding. *Grain Economy of Russia*. 2016;(3):31-37. [in Russian] (Гончаренко А.А. Экологическая устойчивость сортов зерновых культур и задачи селекции. *Зерновое хозяйство России*. 2016;(3):31-37).
- Goncharenko A.A. On adaptivity and ecological resistance of grain crop varieties. *Vestnik of the Russian Academy of Agricultural Sciences*. 2005;(6):49-53. [in Russian] (Гончаренко А.А. Об адаптивности и экологической устойчивости сортов зерновых культур. *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2005;(6):49-53).
- Gorbunova Yu.V., Vlasova E.V. Applying the cultivar stability level index to assess seed productivity in new common vetch accessions (Primeneniye pokazatelya PUSS dlya otsenki semennoy produktivnosti novykh obraztsov viki posevnoy). In: *Methods and Technologies in Plant Breeding and Crop Production (Metody i tekhnologii v selektsii rasteniy i rasteniyevodstve): Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*. Kirov: FASC of the North-East; 2019. p.213-219. [in Russian] (Горбунова Ю.В., Власова Е.В. Применение показателя ПУСС для оценки семенной продуктивности новых образцов вики посевной. В кн.: *Материалы V Международной научно-практической конференции «Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве»*. Киров: ФАНЦ Северо-Востока; 2019. С.213-216).
- Gryaznov A.A. Karabalyk barley (Karabalykский ячмень). Kstanay; 1996. [in Russian] (Грязнов А.А. Карабалыкский ячмень. Кустанай; 1996).
- Gudzenko V.N. Statistical and graphical (GGE biplot) evaluation of the adaptive ability and stability of winter barley breeding lines. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(1):110-118. [in Russian] (Гудзенко В.Н. Статистическая и графическая (GGE biplot) оценка адаптивной способности и стабильности селекционных линий ячменя озимого. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;23(1):110-118). DOI: 10.18699/VJ19.469
- Hangildin V.V. Parameters for evaluating the homeostasis of varieties and breeding lines in the testing of ear crops

- (Parametry otsenki gomeostatichnosti sortov i selekcionnykh liniy v ispytanii kolosovykh kultur). *Nauchno-tekhnicheskiy byulleten VSIG = Scientific and Technical Bulletin of the All-Union Breeding and Genetics Institute*. 1986;2(60):36-41. [in Russian] (Хангильдин В.В. Параметры оценки гомеостатичности сортов и селекционных линий в испытании колосовых культур. *Научно-технический бюллетень ВСГИ*. 1986;2(60):36-41).
- Hangildin V.V., Biryukov S.V. The problem of homeostasis in genetic and breeding selection research (Problema gomeostaza v genetiko-selekcionnykh issledovaniyakh). In: L.K. Sechnyak (ed.). *Genetic and cytological aspects of agricultural plant breeding (Genetiko-tsitologicheskiye aspekty seleksii selskokhozyaystvennykh rasteniy)*. Odessa; 1984. p.67-76. [in Russian] (Хангильдин В.В., Бирюков С.В. Проблема гомеостазы в генетико-селекционных исследованиях. В кн.: *Генетико-цитологические аспекты селекции сельскохозяйственных растений* / под ред. Л.К. Сечняка. Одесса; 1984. С.67-76).
- Ivanenko A.S., Kulyasova O.A. Agroclimatic conditions of Tyumen Province (Agroklimaticheskiye usloviya Tyumenskoj oblasti). Tyumen; 2008. [in Russian] (Иваненко А.С., Кулясова О.А. Агроклиматические условия Тюменской области. Тюмень; 2008).
- Kang M.S. Breeding: Genotype-by-environment interaction. In: R.M. Goodman (ed.). *Encyclopedia of Plant and Crop Science*. New York, NY: Marcel-Dekker; 2004. p.218-221.
- Karahan T., Akgun I. Selection of barley (*Hordeum vulgare*) genotypes by GYT (genotype × yield × trait) bipot technique and its comparison with GT (genotype × trait). *Applied Ecology and Environmental Research*. 2019;18(1):1347-1359. DOI: 10.15666/aeer/1801_13471359
- Kendal E. Effects of ecological factors on spring barley genotypes. In: N. Eslem (ed.). *Hordeum vulgare: Production, Cultivation and Uses*. New-York, NY: Nova Science Publishers; 2021. p.87-114.
- Komaroff N.M. Some aspects of the problem the interaction genotype-environment. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2012;(7):39-41. [in Russian] (Комаров Н.М. Некоторые аспекты проблемы взаимодействия «генотип-среда». *Достижения науки и техники АПК*. 2012;(7):39-41).
- Levakova O.V., Eroshenko L.M. Results of study of ecological adaptability and stability of new varieties and lines of spring barley in the conditions of Ryazan area. *Agroindustrial Complex of Upper Volga Region Herald*. 2017;1(37):18-22. [in Russian] (Левакова О.В., Ерошенко Л.М. Результаты изучения экологической адаптивности и стабильности новых сортов и линий ярового ячменя в условиях Рязанской области. *Вестник АПК Верхневолжья*. 2017;1(37):18-22).
- Loginov Yu.P., Surin N.A., Yakubshina L.I. Stability of the formation of agronomic traits in barley breeding lines in the northern forest-steppe of Tyumen Province (Stabilnost formirovaniya khozyaystvennykh priznakov u selekcionnykh liniy yachmenya v severnoy lesostepi Tyumenskoj oblasti). *Agro-Food Policy in Russia*. 2014;10(34):41-45. [in Russian] (Логинов Ю.П., Сурин Н.А., Якубышина Л.И. Стабильность формирования хозяйственных признаков у селекционных линий ячменя в северной лесостепи Тюменской области. *Агропродовольственная политика России*. 2014;10(34):41-45).
- Loskutov I.G., Kovaleva O.N., Blinova E.V. Guidelines for the study and preservation of the world collection of barley and oats (Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu i sokhraneniyu mirovoy kollektsii yachmenya i ovsa). St. Petersburg: VIR; 2012. [in Russian] (Лоскутов И.Г., Ковалева О.Н., Блинова Е.В. Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса. Санкт-Петербург: ВИР; 2012).
- Miralles D.J., Abeledo G.L., Prado S.A., Chenu K., Serrago R.A., Savin R. Barley. In: V.O. Sadras, D.F. Calderini (eds). *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*. Cambridge, MA: Academic Press; 2021. p.164-195. DOI: 10.1016/B978-0-12-819194-1.00004-9
- Nikolaev P.N., Aniskov N.I., Yusova O.A., Safonova I.V. Adaptability of spring oat yield in the environments of the Near-Irtysh area in Omsk Province. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2018;179(4):28-38. [in Russian] (Николаев П.Н., Аниськов Н.И., Юсова О.А., Сафонова И.В. Адаптивность урожайности ярового овса в условиях Омского Прииртышья. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2018;179(4):28-38). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-28-38
- Nikolaev P.N., Yusova O.A., Vasyukevich S.V., Aniskov N.I., Safonova I.V. Adaptive potential of spring oats varieties by "mass of 1000 grains" in the conditions of Omsk Priirtyshye. *Agrophysica*. 2019;(2):38-44. [in Russian] (Николаев П.Н., Юсова О.А., Васюкевич С.В., Аниськов Н.И., Сафонова И.В. Адаптивный потенциал сортов ярового овса по признаку «масса 1000 зерен» в условиях Омского Прииртышья. *Агрофизика*. 2019;(2):38-44). DOI: 10.25695/AGRPH.2019.02.06
- Pakudin V.Z., Lopatina L.M. Rating of crop varieties for ecological plasticity and stability. *Agricultural Biology*. 1984;19(4):109-113. [in Russian] (Пакудин В.З., Лопатина Л.М. Оценка экологической пластичности и стабильности сортов сельскохозяйственных культур. *Сельскохозяйственная биология*. 1984;19(4):109-113).
- Sapega V.A., Tursumbekova G.Sh. Temporary dynamics of change of area sown and productivity of grain crops in the Tyumen Oblast'. *Agrarian Russia*. 2018;(11):13-17. [in Russian] (Сапега В.А. Турсумбекова Г.Ш. Временная динамика изменения площади посева и урожайности зерновых культур в Тюменской области. *Аграрная Россия*. 2018;(11):13-17). DOI: 10.30906/1999-5636-2018-11-13-17
- Surin N.A., Lyakhova N.E., Gerasimov S.A., Lipshin A.G. Adaptive potential of barley of East Siberian breeding. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2017;31(5):28-31. [in Russian] (Сурин Н.А. Ляхова Н.Е., Герасимов С.А., Липшин А.Г. Адаптивный потенциал ячменя Восточно-Сибирской селекции. *Достижения науки и техники АПК*. 2017;31(5):28-31).
- Udachin R.A., Golovchenko A.P. Method for assessing the ecological plasticity of wheat varieties (Metodika otsenki ekologicheskoy plastichnosti sortov pshenitsy). *Seleksiya i semenovodstvo = Plant Breeding and Seed Production*. 1990;(5):2-6. [in Russian] (Удачин Р.А., Головченко А.П. Методика оценки экологической пластичности сортов пшеницы. *Селекция и семеноводство*. 1990;(5):2-6).
- Vaezi B., Pour-Aboughadareh A., Mohammadi R., Mehraban A., Hossein-Pour T., Koohkan. E. et al. Integrating different stability models to investigate genotype × environment interactions and identify stable and high-yielding barley genotypes. *Euphytica*. 2019;215(4):63. DOI: 10.1007/s10681-019-2386-5

- Van Oosterom E.J., Kleijn D., Ceccarelli S., Nachit M.M. Genotype-by-environment interactions of barley in the Mediterranean region. *Crop Science*. 1993;33(4):669-674. DOI: 10.2135/cropsci1993.0011183X003300040004x
- Volkova L.V. Productivity of spring wheat and its relation to elements of yield structure in years differ by meteorological conditions. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2016;6(55):9-15. [in Russian] (Волкова Л.В. Урожайность яровой мягкой пшеницы и ее связь с элементами продуктивности в разные по метеорологическим условиям годы. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2016;6(55):9-15).
- Volkova L.V., Gireva V.M. Estimation of spring soft wheat varieties by yield and adaptive properties. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2017;4(59):19-23. [in Russian] (Волкова Л.В., Гирева В.М. Оценка сортов яровой мягкой пшеницы по урожайности и адаптивным свойствам. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2017;4(59):19-23).
- Volkova L.V., Shchennikova I.N. Comparative evaluation of methods for calculating adaptive responses of cereals. *Theoretical and Applied Ecology*. 2020;(3):140-146. [in Russian] (Волкова Л.В., Щенникова И.Н. Сравнительная оценка методов расчета адаптивных реакций зерновых культур. *Теоретическая и прикладная экология*. 2020;(3):140-146). DOI: 10.25750/1995-4301-2020-3-140-146
- Yakubyshina L.I., Plasticity and stability of barley breeding lines in the Tyumen region. *IZVESTIA Orenburg State Agrarian University*. 2020;6(86):54-57. [in Russian] (Якубышина Л.И. Пластичность и стабильность селекционных линий ячменя в условиях Тюменской области. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2020;6(86):54-57).
- Yakubyshina L.I., Yield and plasticity of breeding lines for spring barley in the northern forest-steppe of the Tyumen region. *Vestnik of Kursk State Agricultural Academy*. 2018;(8):97-99. [in Russian] (Якубышина Л.И. Урожайность и пластичность селекционных линий ярового ячменя в северной лесостепи Тюменской области. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018;(8):97-99).
- Yusova O.A. New sources of higher green matter quality for perennial grasses in the southern forest-steppe environments of West Siberia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2018;179(4):39-49. [in Russian] (Юсова О.А. Новые источники повышенного качества зеленой массы многолетних трав в условиях южной лесостепи Западной Сибири. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2018;179(4):39-49). DOI: 10.30901/2227-8834-2018-4-39-49
- Zenkina K.V., Aseeva T.A. Effects of the spring triticale genotypes interaction with environmental factors. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2019;(4):18-22. [in Russian] (Зенкина К.В., Асеева Т.А. Эффекты взаимодействия генотипов ярового тритикале с факторами окружающей среды. *Вестник Российской сельскохозяйственной науки*. 2019;(4):18-22). DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/18-22
- 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"). *Selektsiya 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).

Прозрачность финансовой деятельности / The transparency of financial activities

Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

The authors declare the absence of any financial interest in the materials or methods presented.

Для цитирования / How to cite this article

Тетяников Н.В., Боме Н.А. Анализ взаимодействия «генотип × среда» и оценка адаптивного потенциала ячменя в условиях Северного Зауралья. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(3):63-73. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-3-63-73

Tetyannikov N.V., Bome N.A. Analysis of the genotype × environment interactions and assessment of the adaptability potential in barley under the conditions of the Northern Trans-Urals. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(3):63-73. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-3-63-73

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы / The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work

Дополнительная информация / Additional information

Полные данные этой статьи доступны / Extended data is available for this paper at <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-3-63-73>

Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы / The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors, and their employer

Авторы одобрили рукопись / The authors approved the manuscript

Конфликт интересов отсутствует / No conflict of interest

ORCID

Tetyannikov N.V. 0000-0002-8496-5365

Bome N.A. 0000-0002-5467-6538