



Урожайность, пластичность, стабильность и гомеостатичность сортов ярового ячменя в условиях Нечерноземной зоны

Л. М. Ерошенко, М. М. Ромахин, Н. А. Ерошенко, И. А. Дедушев, В. В. Ромахина, М. А. Болдырев

Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», Московская область, Россия

Автор, ответственный за переписку: Любовь Михайловна Ерошенко, eroshenko.lm@yandex.ru

Актуальность. Расширение агрометеорологических факторов, негативно влияющих на продуктивность ярового ячменя, сориентировала селекционную работу на создание адаптивных форм, способных реализовать свой генетический потенциал продуктивности при негативных условиях произрастания. Объективной оценке при дифференциации селекционного материала по признакам адаптивности способствует применение нескольких методов статистического анализа данных. Цель исследований – определение адаптивных свойств сортов ярового ячменя по урожайности, параметрам пластичности, стабильности и гомеостатичности.

Материал и методы. Объектом исследований явились 10 сортов ярового ячменя селекции ФИЦ «Немчиновка». Адаптивные особенности генотипов оценены по данным экологического испытания.

Результаты. Выявлен высокий потенциал урожайности ячменя, который у сортов 'Яромир', 'Нур', 'Надежный', 'Сударь', 'Златояр' и 'Знатный' превышал 8,5 т/га. Наибольшая приспособленность к худшим условиям при урожае 4,65–5,04 т/га, а также высокая адаптивная и компенсаторная способность проявились у сортов 'Любаяр', 'Надежный' и 'Рафаэль'. По показателям экологической пластичности выделились сорта 'Сударь', 'Нур' и 'Златояр' ($Cv_i = 24,1-25,9\%$; $b_i = 1,02-1,16$; $\sigma = 1,52-1,59$), по параметрам стабильности – 'Любаяр', 'Знатный' и 'Владимир' ($S^2 d_i = 0,05-0,19$; $\sigma^2_{САСi} = 1,60-1,78$; $\sigma^2_{(G \times E)_{ij}} = 0,05-0,15$). У сортов 'Рафаэль' и 'Любаяр' зафиксированы самые высокие значения гомеостатичности ($СЦГ_i = 3,45-3,53$; $ПУСС_i = 138,7-139,4$; $Ном_i = 9,02-9,85$). Расчет рейтинга по основным параметрам продуктивности на первое место поставил сорт 'Надежный', по пластичности – сорт 'Златояр'. По признакам стабильности и гомеостатичности отличились сорта 'Рафаэль' и 'Любаяр'.

Заключение. На основе комплексной оценки по урожайности и параметрам адаптивности лучшими в условиях Нечерноземной зоны признаны сорта 'Любаяр', 'Надежный', 'Златояр' и 'Рафаэль'.

Ключевые слова: показатели адаптивности, генотип, среда, экологическое испытание, рейтинг

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану по проекту № 0608-2019-0011 «Создать линии яровых зерновых культур для селекции сортов устойчивых к биотическим и абиотическим стрессам с высоким потенциалом продуктивности».

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

Для цитирования: Ерошенко Л.М., Ромахин М.М., Ерошенко Н.А., Дедушев И.А., Ромахина В.В., Болдырев М.А. Урожайность, пластичность, стабильность и гомеостатичность сортов ярового ячменя в условиях Нечерноземной зоны. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022;183(1):38-47. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-1-38-47

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2022-1-38-47

Yield, plasticity, stability and homeostasis of spring barley cultivars in the Non-Black Earth Region

Lyubov M. Eroshenko, Maksim M. Romakhin, Nikolai A. Eroshenko, Ivan A. Dedushev, Viktoria V. Romakhina, Mikhail A. Boldyrev

Nemchinovka Federal Research Center, Moscow Province, Russia

Corresponding author: Lyubov M. Eroshenko, eroshenko.lm@yandex.ru

Background. The expansion of agrometeorological factors negatively affecting the productivity of spring barley has oriented plant breeders towards developing adaptable forms capable of realizing their genetic potential for higher yield under unfavorable conditions. Applying several methods of statistical data analysis helps to perform a more accurate assessment of the material differentiated according to its adaptability indicators. The objective of this study was to assess the adaptability of spring barley cultivars on the basis of their yield, plasticity, stability and homeostasis.

Materials and methods. The resulting data were obtained for ten spring barley cultivars developed at Nemchinovka FRC.

Results. High yield potential of more than 8.5 t/ha was disclosed in barley cultivars 'Yaromir', 'Nur', 'Nadezhny', 'Sudar', 'Zlatoyar' and 'Znatny'. Cvs. 'Luboyar', 'Nadezhny' and 'Rafael' showed the highest adaptability to the worst growing conditions (4.65–5.04 t/ha) as well as high adaptive and compensatory ability. Cvs. 'Sudar', 'Nur' and 'Zlatoyar' were identified for high environmental plasticity ($Cv_i = 24.1\text{--}25.9\%$; $b_i = 1.02\text{--}1.16$; $\sigma = 1.52\text{--}1.59$), while 'Lyuboyar', 'Znatny' and 'Vladimir' for their stability parameters ($S^2d_i = 0.05\text{--}0.19$; $\sigma^2_{CAC_i} = 1.60\text{--}1.78$; $\sigma^2_{(G \times E)_{E_i}} = 0.05\text{--}0.15$). The highest values of homeostasis ($BVG_i = 3.45\text{--}3.53$; $CSL_i = 138.7\text{--}139.4$; $Hom_i = 9.02\text{--}9.85$) were registered for cvs. 'Rafael' and 'Lyuboyar'. The calculated rating of the tested cultivars identified 'Nadezhny' as the best in productivity, while 'Zlatoyar' was the best in environmental plasticity. The highest levels of stability and homeostasis were recorded for cvs. 'Rafael' and 'Lyuboyar'.

Conclusion. Comprehensive assessment of productivity and adaptability indicators in the tested spring barley cultivars showed that 'Lyuboyar', 'Nadezhny', 'Zlatoyar' and 'Rafael' were the best under the conditions of the Non-Black Earth Region.

Keywords: adaptability indicators, genotype, environment, environmental test, rating

Acknowledgements: the research was performed within the framework of the State Task according to the theme plan under Project № 0608-2019-0011 "To develop new spring cereal crop lines for breeding cultivars resistant to biotic and abiotic stresses with high productivity potential".

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

For citation: Eroshenko L.M., Romakhin M.M., Eroshenko N.A., Dedushev I.A., Romakhina V.V., Boldyrev M.A. Yield, plasticity, stability and homeostasis of spring barley cultivars in the Non-Black Earth Region. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(1):38-47. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-1-38-47

Введение

Усиление влияния глобальных изменений климатических условий на формирование урожайности сельскохозяйственных культур – одна из серьезнейших проблем XXI века. Учитывая расширение факторов, негативно влияющих на растения, на фоне ресурсосбережения, снижения уровня техногенного и антропогенного загрязнения окружающей среды и производимой продукции, приоритетным направлением современного растениеводства является повышение темпов производства зерна в регионах (Alabushev, Anipenko, 2008; Zotikov, 2017). Необходимым условием стабильного роста зернового производства ячменя является расширение посевов наиболее адаптированных к условиям регионов сортов, способных обеспечить высокий и стабильный уровень урожайности в изменяющихся условиях среды, а также внедрение адаптивных технологий их возделывания (Crossa et al., 2014; Eliseev, 2016). Значимая роль агроэкологически специализированных сортов в уменьшении зависимости агросистем ячменя от варьирующих почвенно-климатических условий и повышении урожайности отмечена в отечественных и зарубежных публикациях (Creissen et al., 2016; Kuznetsova et al., 2016; Bisharev et al., 2018).

Между тем сорт как основа технологии возделывания любой культуры является результатом сложного взаимодействия генотипа с условиями среды (Solonechnyi, 2017), и в процессе его воспроизводства уровень реальной урожайности ограничен комплексом нерегулируемых экзогенных факторов, наиболее характерных и сильнодействующих в конкретном регионе.

В условиях погодных трансформаций и их негативного влияния на урожайность сельскохозяйственных культур современные сорта должны не только быть приспособлены к широкому диапазону средовых факторов, но и обеспечивать преимущество перед другими сортами в зонах выращивания (Zhuchenko, 1988; Kudryashov et al., 2016; Yusova, 2020). Поэтому в новом тысячелетии селекционный процесс не может не носить экологический характер и предполагает использование различных методов адаптивной селекции. Важнейшими условиями экологизации селекции являются получение на каждом этапе селекционного процесса эколого-генетической информации и применение математических методов оценки адаптивных свойств испытываемого селекционного материала (Kilchevsky, 2005).

Реакцию генотипов на изменение условий среды характеризуют показатели адаптивных особенностей сортов. Параметры пластичности, стабильности и гомеостатичности определяют уровень адаптации сорта к происходящим климатическим изменениям, показывают преимущества и недостатки сорта, его поведение в различных условиях выращивания (Kurkova, Fokin, 2018). Отсутствие достоверных связей между урожайностью и этими показателями дает основание, при условии сохранения достигнутого уровня урожайного потенциала, предположить возможность сочетания их в одном генотипе (Rubas', 2016; Volkova, Gireva, 2017). По мнению исследователей (Nikolaev et al., 2018; Cheshkova et al., 2020), информативность статистического анализа повышается при использовании нескольких методов оценки признаков адаптивности.

Для более полной и объективной оценки новых сортов по уровню адаптивности необходим градиент экологических сред, обеспечивающий сортоспецифичность

реакции на изменение почвенно-климатических условий (Syukov et al., 2017). Повышению эффективности селекционной работы по созданию высокоадаптивных форм, способных наиболее эффективно использовать биоклиматический потенциал региона, способствует широкое экологическое сортоиспытание (Solonechnyi et al., 2014).

Внедрение в производство агроэкологически адресных сортов позволит не только уменьшить неблагоприятное воздействие на окружающую среду, но и поднять рентабельность производства культуры (Alabushev, Anipenko, 2008).

Цель исследования – определение адаптивных свойств сортов ярового ячменя по урожайности, параметрам пластичности, стабильности и гомеостатичности.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили 10 сортов ярового ячменя селекции Федерального исследовательского центра (ФИЦ) «Немчиновка». Для определения параметров адаптивных свойств сортов ярового ячменя по признаку урожайности в 2016–2020 гг. проведено экологическое испытание в двух пунктах, находящихся в различных почвенно-климатических условиях: ФИЦ «Немчиновка» (Московская обл.) и Институт семеноводства и агротехнологий (ИСА) – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (Рязанская обл.). Для оценки метеорологических условий использовали гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова (Selyaninov, 1928). Согласно классификации ГТК как показателя, влияющего на продуктивность сельскохозяйственных культур (Radzka et al., 2015), вегетационный период 2016 г. в пунктах испытания характеризовался как относительно влажный (ГТК = 1,63–1,71). Агрометеорологические условия вегетационных периодов 2017 и 2020 г. были влажными (ГТК = 2,13–2,34), а 2018 и 2019 г. – относительно сухими (ГТК = 1,02–1,24). При обработке данных урожайности применяли методы вариационного, корреляционного и дисперсионного анализов (Dospikhov, 2011). Пластичность изучаемых сортов (b_j) и стабильность (Sd^2) оценивали по методике S. A. Eberhart, W. A. Russel в изложении В. А. Зыкина (Zykin et al., 1984). Коэффициент адаптивности (К.А.) и показатель уровня и стабильности сорта (ПУСС_с) рассчитывали по методикам, соответственно предложенным А. В. Животковым (Zhivotkov et al., 1994) и Э. Д. Неттевичем (Nettevich et al., 1985) с соавторами. Гомеостатичность (Ном) определяли по В. В. Хангильдину (Hangildin, 1986), компенсаторную способность $(Y_2 \min + Y_1 \max)/2$ – по А. А. Россиелле, J. Hemblin в изложении А. А. Гончаренко (Goncharenko, 2005). Для определения эффектов общей адаптивной способности (v_j), дисперсии специфической адаптивной способности σ_{CAC}^2 , дисперсии взаимодействия генотипа и среды ($\sigma_{(G \times E)_{Gj}}^2$), селекционной ценности генотипа (СЦГ) использовали методики А. В. Кильчевского и Л. В. Хотылевой (Kilchevsky, Khotyleva, 1997).

Результаты и их обсуждение

Для оценки адаптивности сортов ячменя предложен наиболее эффективный подход анализа данных экологического сортоиспытания по комплексному рейтингу, сочетающему показатели адаптивной способности, пластичности, стабильности и гомеостатичности, расчи-

таные разными методами. Дисперсионный анализ продуктивности сортов ярового ячменя (табл. 1) выявил достоверность различий между эффектами генотипов, сред и их взаимодействия. Превалирующий вклад (83,5%) в общую дисперсию урожайности вносил фактор «среда». Роль сорта невелика и составляла 3,2%. В то же время изменчивость урожайности на 12,9% достоверно обусловлена взаимодействием факторов «сорт × среда», что свидетельствует о возможности дальнейшего роста урожайности за счет повышения адаптивного потенциала сортов.

Урожайность сортов ярового ячменя в экологическом испытании в среднем по опыту за 2016–2020 гг. составила 6,21 т/га. В наиболее благоприятных условиях выявлен высокий потенциал урожайности, который у сортов 'Яромир', 'Нур', 'Надежный', 'Сударь' 'Златояр' и 'Знатный' превышал 8,5 т/га. На фоне недостаточного увлажнения наименьшая урожайность (табл. 2) отмечена у сортов 'Московский 86' (3,67 т/га) и 'Владимир' (3,70 т/га), снизивших урожайность в условиях стресса по отношению к стандарту на 0,10 и 0,13 т/га соответственно. Лучшими по уровню лимитированной урожай-

Таблица 1. Результаты дисперсионного анализа сортов ярового ячменя в экологическом испытании
(ФИЦ «Немчиновка», Рязанская обл., 2016–2020 гг.)

Table 1. ANOVA results for spring barley cultivars in the environmental test
(Nemchinovka Federal Research Center, Ryazan Province, 2016–2020)

Источник варьирования / Source of variation	SS	DF	MS	F	Доля фактора, % / Factor effect size, %
Общее / Total	388,76	199	1,95		
Фактор А (сорт) / Factor A (cultivar)	12,31	9	1,37	2,20*	3,2
Фактор Б (среда) / Factor B / (environment)	324,71	9	36,08	58,16*	83,5
Взаимодействие А × Б / A × B interaction	50,24	81	0,62	42,21*	12,9
Ошибка / Error	1,45	99	0,05		0,4

Примечание: SS – сумма квадратов; DF – степень свободы; MS – средний квадрат; F – критерий Фишера
*статистически значим при уровне вероятности $P \geq 0,95$

Note: SS is the sum of squares; DF is the degree of freedom; MS is the mean square; F is the Fisher criterion
* statistically significant at $P \geq 0.95$

Таблица 2. Урожайность и показатели адаптивности сортов ярового ячменя в экологическом сортоиспытании
(ФИЦ «Немчиновка», Рязанская обл., 2016–2020 гг.)

Table 2. Yield and adaptability indicators of spring barley cultivars in the environmental test
(Nemchinovka Federal Research Center, Ryazan Province, 2016–2020)

Сорта / Cultivars	Урожайность, т/га / Yield, t/ha		Показатели адаптивности / Adaptability indicators			
	$Y_2 \text{ min}$	$Y_1 \text{ max}$	$(Y_2 \text{ min} + Y_1 \text{ max})/2$	К.А., %	OAC_i ($u+v_i$)	v_i
Яромир, стандарт / Yaromir, reference	3,80	8,61	6,20	97,0	6,01	-0,20
Владимир / Vladimir	3,70	7,63	5,66	93,9	5,81	-0,40
Нур / Nur	4,16	8,68	6,42	95,4	5,93	-0,28
Московский 86 / Moskovsky 86	3,67	8,17	5,92	99,5	6,12	-0,09
Надежный / Nadezhny	4,78	9,19	6,98	104,9	6,48	0,27
Сударь / Sudar	4,19	8,64	6,42	101,9	6,31	0,11
Златояр / Zlatoyar	4,43	8,69	6,56	101,2	6,30	0,09

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Сорта / Cultivars	Урожайность, т/га / Yield, t/ha		Показатели адаптивности / Adaptability indicators			
	$Y_2 \text{ min}$	$Y_1 \text{ max}$	$(Y_2 \text{ min} + Y_1 \text{ max})/2$	К.А., %	OAC_i ($u+v_i$)	v_i
Знатный / Znatny	4,10	8,59	6,34	100,0	6,19	0,01
Рафаэль / Rafael	5,04	8,47	6,76	104,4	6,42	0,21
Любояр / Lyuboyar	4,65	8,34	6,50	105,6	6,50	0,29
\bar{x}	4,25	8,50	6,38	100,4	6,21	-
$S\bar{x}$	0,15	0,13	0,38	1,27	0,08	-

Примечание: $Y_1 \text{ max}$ – максимальное значение; $Y_2 \text{ min}$ – минимальное значение; $(Y_2 \text{ min} + Y_1 \text{ max})/2$ – генетическая гибкость; К.А. – коэффициент адаптивности; OAC_i – общая адаптивная способность; \bar{x} – среднее; $S\bar{x}$ – относительная ошибка среднего

Note: $Y_1 \text{ max}$ is the maximum value; $Y_2 \text{ min}$ is the minimum value; $(Y_2 \text{ min} + Y_1 \text{ max})/2$ is the genetic flexibility; К.А. is the adaptability coefficient; OAC_i is total adaptability; \bar{x} is the mean; $S\bar{x}$ is the relative error of the mean

ности ($Y_2 \text{ min}$) и по показателю генетической гибкости сортов $(Y_2 \text{ min} + Y_1 \text{ max})/2$, характеризующему средн-арифметическую урожайность в годы с минимальным и максимальным проявлением признака, были сорта 'Златояр', 'Любояр', 'Рафаэль' и 'Надежный' (4,43–5,04 т/га и 6,50–6,98 т/га соответственно).

На основании показателей общей адаптивной способности ($OAC_i = u + v_i$), эффектов OAC_i (v_i) и коэффициентов адаптивности (К.А., %), которые оценивали среднюю величину признака в различных условиях среды, можно утверждать, что наибольшей способностью обеспечивать максимальный средний урожай во всей совокупности сред характеризовались сорта 'Рафаэль', 'Любояр' и 'Надежный' ($OAC_i = 6,42$ – $6,50$ т/га; $v_i = 0,21$ – $0,29$; К.А. = 104,4–105,6%).

Статистические методы анализа взаимодействия генотипа и среды, применяемые при оценке адаптив-

ных особенностей изучаемых сортов, можно разделить на три группы, каждая из которых оценивает одинаковые свойства организма: показатели пластичности, стабильности и гомеостатичности. При анализе данных пластичность, как величину и направленность реакции генотипа на колебания условий среды, в наших исследованиях характеризовали коэффициенты вариации (Cv_i), линейной регрессии (b_i) и среднее квадратичное отклонение (σ).

На основании полученных данных (табл. 3) определена более сильная отзывчивость на изменение условий выращивания у сортов 'Сударь', 'Нур' и 'Златояр' ($Cv_i = 24,1$ – $25,9\%$; $b_i = 1,02$ – $1,16$; $\sigma = 1,52$ – $1,59$). Напротив, более низкая способность отзываться на улучшение условий выращивания повышением продуктивности обнаружена у сортов 'Рафаэль', 'Любояр', 'Владимир' и 'Московский 86' ($Cv_i = 19,1$ – $23,3\%$; $b_i = 0,88$ – $0,99$; $\sigma = 1,22$ – $1,38$).

Таблица 3. Экологическая стабильность, пластичность и гомеостатичность сортов ячменя в экологическом сортоиспытании

(ФИЦ «Немчиновка», Рязанская обл., 2016–2020 гг.)

Table 3. Environmental stability, plasticity and homeostasis of barley cultivars in the environmental test (Nemchinovka Federal Research Center, Ryazan Province, 2016–2020)

Сорта / Cultivars	Показатели пластичности, стабильности и гомеостатичности / Plasticity, stability and homeostasis indicators								
	Cv_i	b_i	σ	Sd_i^2	$\sigma^2_{(CACi)}$	$\sigma^2_{(G \times E)gi}$	СЦГ _i / BVG _i	ПУСС _i / CSL _i	Hom _i
Яромир / Yaromir	23,3	0,98	1,40	0,24	1,96	0,23	2,79	100,0	5,37
Владимир / Vladimir	22,3	0,88	1,30	0,19	1,60	0,15	2,94	97,4	6,61
Нур / Nur	25,9	1,10	1,54	0,19	2,34	0,23	2,41	87,1	5,05
Московский 86 / Moskovsky 86	23,3	0,85	1,38	0,76	1,93	0,73	2,99	103,9	6,03

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Сорта / Cultivars	Показатели пластичности, стабильности и гомеостатичности / Plasticity, stability and homeostasis indicators								
	Cv_i	b_i	σ	Sd_i^2	$\sigma^2_{(CACi)}$	$\sigma^2_{(G \times E)gi}$	СЦГ _i / BVG _i	ПУСС _i / CSL _i	Ном _i
Надежный / Nadezhny	23,0	1,05	1,49	0,24	1,84	0,19	3,35	96,1	6,39
Сударь / Sudar	24,1	1,02	1,52	0,46	2,09	0,48	3,00	106,4	5,87
Златояр / Zlatoyar	25,2	1,16	1,59	0,06	2,16	0,11	3,15	101,3	5,86
Знатный / Znatny	22,6	1,00	1,40	0,13	1,78	0,10	3,43	90,3	6,01
Рафаэль / Rafael	19,1	0,90	1,22	0,31	1,66	0,14	3,45	139,4	9,85
Любойар / Lyuboyar	19,6	0,93	1,27	0,05	1,65	0,05	3,53	138,7	9,02
\bar{x}	22,8	0,99	1,42	0,26	1,90	0,24	3,10	97,1	6,61
$S\bar{x}$	0,68	0,03	0,04	0,07	0,08	0,06	0,07	5,80	0,48

Примечание: Cv_i – коэффициент вариации; b_i – коэффициент регрессии; σ – среднее квадратичное отклонение; Sd_i^2 – среднее квадратичное отклонение от линии регрессии; σ^2_{CACi} – дисперсия специфической адаптивной способности; $\sigma^2_{(G \times E)gi}$ – дисперсия общей адаптивной способности; СЦГ_i – селекционная ценность генотипа; Ном_i – показатель гомеостатичности; ПУСС_i – показатель уровня стабильности сорта

Note: Cv_i is the coefficient of variation; b_i is the regression coefficient; σ is the standard deviation; Sd_i^2 is the standard deviation from the regression line; σ^2_{CACi} is the variance of specific adaptability; $\sigma^2_{(G \times E)gi}$ is the variance of general adaptability; BVG is the breeding value of a genotype; Ном_i is the indicator of homeostasis; CSL_i is the indicator of the cultivar's stability level

Устойчивость проявления признака в различных условиях выращивания выявлена по показателям стабильности: дисперсии взаимодействия генотипа и среды ($\sigma^2_{(G \times E)gi}$), среднеквадратичном отклонении от линии регрессии (Sd_i^2) и дисперсии специфической адаптивной способности (σ^2_{CACi}).

Считается, что показатель способности *i*-го генотипа вступать во взаимодействие со средами ($\sigma^2_{(G \times E)gi}$) дает практически одинаковую информацию о стабильности генотипа, как и параметр Sd_i^2 , позволяющий оценить степень предсказуемости ответа генотипа на среду (Kilchevsky, Khotyleva, 1997). В нашем исследовании теснота связи между ними характеризовалась высоким значением коэффициента корреляции ($r = 0,963$). При оценке стабильности по дисперсии САС_i учитывалась биологическая сущность взаимодействия генотипа и среды, которая состояла в усилении или ослаблении эффектов сред. Существенной зависимости между σ^2_{CACi} , $\sigma^2_{(G \times E)gi}$ и показателем Sd_i^2 не обнаружено ($r = 0,104-0,314$). Наименьшие значения всех параметров стабильности, указывающих на высокий уровень устойчивости к лимитирующим факторам среды, определены у сортов 'Любойар', 'Знатный' и 'Владимир' ($Sd_i^2 = 0,05-0,19$; $\sigma^2_{CACi} = 1,60-1,78$; $\sigma^2_{(G \times E)gi} = 0,05-0,15$).

Мерой гомеостаза сорта, или его способности к меньшему снижению урожая при ухудшении условий возделывания, послужили показатели селекционной ценности генотипа (СЦГ_i), уровня и стабильности сорта (ПУСС_i) и гомеостатичности (Ном_i). Показатели являются комплексными, поскольку позволяют одновременно учитывать уровень и стабильность урожайности.

По степени гомеостатичности, превысив среднесортные значения указанных параметров соответственно на 11,3–13,8%; 42,8–43,6% и 48,5–68,3%, лидировали новые сорта 'Рафаэль' и 'Любойар' (СЦГ_i = 3,45–3,53; ПУСС_i = 138,7–139,4; Ном_i = 9,02–9,85).

Критерием репрезентативности и конкурентного преимущества сортов в государственном сортоиспытании и в производстве может служить величина рейтинга, учитывающая комплекс параметров адаптивности и урожайности, полученных на основе экологического испытания (Sarega, 2016). Для объединения нескольких показателей, не всегда формализуемых в один, числовые данные статистического анализа были преобразованы в ранговый формат (табл. 4). Первое место по комплексной оценке средней урожайности и способности поддерживать потенциал продуктивности в различных условиях выращивания занял сорт 'Надежный', который был лучшим по максимальной продуктивности ($Y_1 \max = 9,19$ т/га) и показателю компенсаторной способности $((Y_2 \min + Y_1 \max)/2 = 6,98)$, указывающему на соответствие между генотипом сорта и факторами окружающей среды.

Наименьшую сумму рангов (\sum рангов 4 ÷ 5) по показателям пластичности набрали сорта 'Златояр' и 'Нур', занявшие первое и второе место в рейтинговой шкале по отзывчивости на комплекс благоприятных погодных условий. Самыми высокими рейтинговыми оценками по признакам стабильности характеризовались сорта 'Любойар' и 'Знатный', по показателям гомеостатичности – сорта 'Рафаэль' и 'Любойар'.

Таблица 4. Рейтинг сортов ярового ячменя по урожайности и показателям адаптивных особенностей, оцененным разными методами**Table 4. Rating of spring barley cultivars according to their yield and adaptability indicators assessed by different methods**

Сорта / Cultivars	Рейтинг сортов по сумме рангов, характеризующих показатели / Rating of cultivars according to the sum of ranks characterizing the indicators of				Общая сумма рангов / Total sum of ranks	Комплексный рейтинг / Complex rating
	урожайности / yield	пластичности / plasticity	стабильности / stability	гомеостатичности / homeostasis		
Яромир / Yaromir	8	5	8	10	106	9
Владимир / Vladimir	10	9	3	8	114	10
Нур / Nur	7	2	7	9	87	7
Московский 86 / Moskovsky 86	9	7	9	7	113	8
Надежный / Nadezhny	1	4	6	3	56	2
Сударь / Sudar	5	3	10	6	79	5
Златояр / Zlatoyar	4	1	5	4	59	3
Знатный / Znatny	6	6	2	5	82	6
Рафаэль / Rafael	3	10	4	1	66	4
Любойар / Lyuboyar	2	8	1	2	52	1

Для выявления форм с широким адаптивным потенциалом наибольшую ценность представляет комплексный рейтинг сортов ячменя по совокупности количественных и качественных характеристик адаптивности. На основе интегрированной оценки, учитывающей показатели урожайности, пластичности, стабильности и гомеостатичности, лучшими в условиях Нечерноземной зоны признаны сорта 'Любойар', 'Надежный', 'Златояр' и 'Рафаэль'.

Выводы

Результаты дисперсионного анализа позволили установить значительное влияние почвенно-климатических условий Нечерноземной зоны на урожайность ярового ячменя. Значимость взаимодействия факторов «сорт × среда» свидетельствует о возможности дальнейшего роста урожайности за счет повышения адаптивного потенциала сортов.

Экологическое испытание сортов в контрастных почвенно-климатических условиях дало возможность выделить сорта 'Надежный', 'Златояр', 'Рафаэль' и 'Любойар' по высоким оценкам основных параметров продуктивности. Анализ данных выявил повышенную способность сортов 'Сударь', 'Нур' и 'Златояр' отзываться на улучшение условий выращивания и более высокую стабильность урожайности у сортов 'Любойар', 'Знатный' и 'Владимир'. Наиболее оптимальное сочетание продуктивности и стабильности зафиксировано у сортов 'Рафаэль' и 'Любойар'.

Сочетание различных статистических показателей, рассматривающих адаптивность сорта с позиции адаптивной способности, пластичности, стабильности и гомеостатичности, определило высокий рейтинг сортов 'Любойар', 'Надежный', 'Златояр' и 'Рафаэль' как способных более эффективно использовать биоклиматический потенциал региона.

References / Литература

- Alabushev A.V., Anipenko L.N. Scientific provision of productivity, sustainability and profitability of the grain industry of Russia (Nauchnoye obespecheniye produktivnosti, ustoychivosti i rentabelnosti zernovoy otrasli Rossii). *Vestnik OrelGAU = Bulletin of Orel State Agrarian University*. 2008;1(10):2-10. [in Russian] (Алабушев А.В., Анипенко Л.В. Научное обеспечение продуктивности, устойчивости и рентабельности в зерновой отрасли России. *Вестник ОрелГАУ*. 2008;1(10):2-10).
- Bisharev A.A., Shevchenko S.N., Madyakin E.V., Kalykulina I.A., Duldina M.A., Dvortsova T.V. The influence of agrometeorological conditions on grain yield of spring barley in the conditions of Middle Volga Region. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018;20(2-4):667-670. [in Russian] (Бишарев А.А., Шевченко Е.Н., Мадякин Е.В., Калякулина И.А., Дюльдина М.А., Дворцова Т.В. Влияние агрометеорологических условий на урожай ячменя в условиях Среднего Поволжья. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2018;20(2-4):667-670).
- Cheshkova A.F., Stepanchik P.I., Aleynikov A.F., Grebennikova I.G., Ponomarenko V.I. A comparison of statistical methods for assessing winter wheat grain yield stability. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(3):267-275. DOI: 10.18699/VJ20.619
- Creissen H.E., Jorgensen T.H., Brown J.K.M. Increased yield stability of field-grown winter barley (*Hordeum vulgare* L.) varietal mixtures through ecological processes. *Crop Protection*. 2016;85:1-8. DOI: 10.1016/j.cropro.2016.03.001
- Crossa J., Pérez P., Hickey J., Burgueño J., Ornella L., Cerón-Rojas J. et al. Genomic prediction in CIMMYT maize and wheat breeding program. *Heredity*. 2014;112(1):48-60. DOI: 10.1038/hdy.2013.16
- Dospikhov B.A. Methodology of field trial (Metodika polevogo opyta). 6th ed. Moscow: Alyans; 2011. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. 6-е изд. Москва: Альянс; 2011).
- Eliseev S.L. Increase of crop production sustainability. *Perm Agrarian Journal*. 2016;4(16):15-20. [in Russian] (Елисеев С.Л. Повышение устойчивости производства зерна. *Пермский аграрный вестник*. 2016;4(16):15-20).
- Goncharenko A.A. On adaptivity and ecological resistance of grain crop varieties. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 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).
- Hangildin V.V. Parameters for evaluating the homeostasis of varieties and breeding lines in the testing of cereal crops (Parametry otsenki gomeostatichnosti sortov i selektsionnykh liniy v ispytanii kolosovykh kultur). *Nauchno-tekhnicheskii byulleten VSGI = 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).
- Kilchevsky A.V. Genetic and ecological bases of plant breeding. *The Herald of Vavilov Society for Geneticists and Breeding Scientists*. 2005;9(4):518-526. [in Russian] (Кильчевский А.В. Генетико-экологические основы селекции растений. *Информационный вестник ВОГиС*. 2005;9(4):518-526).
- Kilchevsky A.V., Khotyleva L.V. Ecological plant breeding (Ekologicheskaya selektsiya rasteniy). Minsk: Technalohija; 1997. [in Russian] (Кильчевский А.В., Хотылева Л.В. Экологическая селекция растений. Минск: Тэхналогія; 1997).
- Kudryashov I.N., Bessalova L.A., Ponomarev D.A. Relevance of varietal structures in winter wheat production in present conditions. *Grain Economy of Russia*. 2016;(1):9-13. [in Russian] (Кудряшов И.Н., Беспалова Л.А., Пономарев Д.А. Актуальность сортовых структур при производстве озимой пшеницы в современных условиях. *Зерновое хозяйство России*. 2016;(1):9-13).
- Kurkova I.V., Fokin S.A. The assessment of adaptive capacity and ecological plasticity of varieties and samples of varieties of spring barley of Amur selection. *The Bulletin of KrasGAU*. 2018;2(137):16-21. [in Russian] (Куркова И.В., Фокин С.А. Оценка адаптивной способности и экологической пластичности сортов и сортообразцов ярового ячменя амурской селекции. *Вестник КрасГАУ*. 2018;2(137):16-21).
- Kuznetsova T.E., Levshantov S.A., Serkin N.V., Nesterenko V.V., Veretelnikova N.A., Ostanina T.V. Methods and results of spring barley breeding in Krasnodar region. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2015;29(12):20-22. [in Russian] (Кузнецова Т.Е., Левштанов С.А., Серкин Н.В., Нестеренко В.В., Веретельникова Н.А., Останина Т.В. Методы и результаты селекции ярового ячменя на Кубани. *Достижения науки и техники АПК*. 2015;29(12):20-22).
- Nettevich E.D., Morgounov A.I., Maksimenko M.I. Improving the efficiency of spring wheat selection for stability, yield and quality of grain (Povysheniye effektivnosti otbora yarovoy pshenitsy na stabilnost, urozhaynost i kachestvo zerna). *Vestnik selskokhozyaystvennoy nauki = Bulletin of Agricultural Science*. 1985;(1):66-73. [in Russian] (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):66-73).
- 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. *Proceeding on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2018;179(4):28-38. [in Russian] (Николаев П.Н., Анисков 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):28-39). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-28-38
- Radzka E., Rymuza K., Lenartowicz T. Analysis of hydrothermal conditions and their impact on early potato yields. *Journal of Ecological Engineering*. 2015;16(2):120-124. DOI: 10.12911/22998993/1866
- 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
- Sapega V.A. Representativeness problem in the state varieties testing system, productivity and parameters of ecological plasticity and stability of oats varieties. *The Bulletin of KrasGAU*. 2016;10(121):163-170. [in Russian] (Сапега В.А. Проблема репрезентативности в системе

- госсортоиспытания, урожайность и параметры экологической пластичности и стабильности сортов овса. *Вестник КрасГАУ*. 2016;10(121):163-170.
- Selyaninov G.T. On agricultural estimation of climate. *Contributions to Agricultural Meteorology*. 1928;20:165-177. [in Russian] (Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата. *Труды по сельскохозяйственной метеорологии*. 1928;20:165-177).
- Solonechnyi P.N. AMMI and GGE biplot analyses of genotype-environment interaction in spring barley lines. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2017;21(6):657-662. [in Russian] (Солонечный П.Н. AMMI и GGE biplot анализ взаимодействия генотип-среда линий ячменя ярового. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2017;21(6):657-662). DOI: 10.18699/VJ17.283
- Solonechnyi P.N., Kozachenko M.R., Vasko N.I., Naumov A.G., Vazhenina O.E., Solonechnaya O.V. Productivity in spring barley varieties under ecological testing. *Legumes and Groat Crops*. 2014;4(12):96-99. [in Russian] (Солонечный П.Н., Козаченко М.Р., Васько Н.И., Наумов А.Г., Важенина О.Е., Солнечная О.В. Продуктивность сортов ячменя ярового в экологическом сортоиспытании. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2014;4(12):96-99).
- Syukov V.V., Zakharov V.G., Menibaev A.I. Ecological plant breeding: types and practice. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2017;21(5):534-536. [in Russian] (Сюков В.В., Захаров В.Г., Менибаев А.И. Экологическая селекция растений: типы и практика. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2017;21(5):534-536). DOI: 10.18699/VJ17.270
- Varga B., Vida G., Varga-László E., Bencze S., Veisz O. Effect of simulating drought in various phenophases on the water use efficiency of winter wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2015;201(1):1-9. DOI: 10.1111/jac.12087
- 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).
- Yusova O.A., Nikolaev P.N., Bendina Y.B., Safonova I.V., Aniskov N.I. Stress resistance in barley cultivars of various agroecological origin under extreme continental climate conditions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020;181(4):44-55. [in Russian] (Юсова О.А., Николаев П.Н., Бендина Я.Б., Сафонова И.В., Анисков Н.И. Стрессоустойчивость сортов ячменя различного агроэкологического происхождения для условий резко континентального климата. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020;181(4):44-55). DOI: 10.30901/2227-8834-2020-4-44-55
- 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).
- Zhuchenko A.A. Adaptive potential of cultivated plants (ecogenetic fundamentals) (Adaptivnyy potentsial kulturnykh rasteniy [ekologo-geneticheskiye osnovy]). Chisinau: Știință; 1988. [in Russian] (Жученко А.А. Адаптивный потенциал культурных растений (эколого-генетические основы). Кишинев: Штиинца; 1988).
- Zotikov V.I. The role of genetic resources in improving the productivity and environmental sustainability of crop production. *Legumes and Groat Crops*. 2017;2(22):4-8. [in Russian] (Зотиков В.И. Роль генетических ресурсов в повышении продуктивности и экологической устойчивости растениеводства. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2017;2(22):4-8).
- Zykin V.A., Meshkov V.V., Sapega V.A. Parameters of environmental plasticity in crop plants, their calculation and analysis: guidelines (Parametry ekologicheskoy plastichnosti selskhozaystvennykh rasteniy, ikh raschet i analiz: metodicheskiye rekomendatsii). Novosibirsk: Siberian Branch of VASKhNIL; 1984. [in Russian] (Зыкин В.А., Мешков В.В., Сапега В.В. Параметры экологической пластичности сельскохозяйственных растений, их расчет и анализ: методические рекомендации. Новосибирск: Сибирское отделение ВАСХНИЛ; 1984).

Информация об авторах

Любовь Михайловна Ерошенко, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», 143026, Россия, Московская обл., Одинцово, рп. Новоивановское, ул. Агрохимиков, 6, eroshenko.lm@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8513-6665>

Максим Михайлович Ромахин, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», 143026, Россия, Московская обл., Одинцово, рп. Новоивановское, ул. Агрохимиков, 6, rmax1@ya.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5691-1020>

Николай Анатольевич Ерошенко, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», 143026, Россия, Московская обл., Одинцово, рп. Новоивановское, ул. Агрохимиков, 6, eroshenko.lm@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6971-957X>

Иван Александрович Дедушев, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», 143026, Россия, Московская обл., Одинцово, рп. Новоивановское, ул. Агрохимиков, 6, ivan.dedushev@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5059-9299>

Виктория Валерьевна Ромахина, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», 143026, Россия, Московская обл., Одинцово, рп. Новоивановское, ул. Агрохимиков, 6, 79206175784@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9996-4998>

Михаил Александрович Болдырев, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», 143026, Россия, Московская обл., Одинцово, рп. Новоивановское, ул. Агрохимиков, 6, mbold1911@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7421-0321>

Information about the authors

Lyubov M. Eroshenko, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Nemchinovka Federal Research Center, 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye, Odintsovsky District, Moscow Province 143026, Russia, eroshenko.lm@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8513-6665>

Maksim M. Romakhin, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Nemchinovka Federal Research Center, 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye, Odintsovsky District, Moscow Province 143026, Russia, rmax1@ya.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5691-1020>

Nikolai A. Eroshenko, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Nemchinovka Federal Research Center, 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye, Odintsovsky District, Moscow Province 143026, Russia, eroshenko.lm@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6971-957X>

Ivan A. Dedushev, Researcher, Nemchinovka Federal Research Center, 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye, Odintsovsky District, Moscow Province 143026, Russia, ivan.dedushev@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5059-9299>

Viktoriya V. Romakhina, Associate Researcher, Nemchinovka Federal Research Center, 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye, Odintsovsky District, Moscow Province 143026, Russia, 79206175784@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9996-4998>

Mikhail A. Boldyrev, Associate Researcher, Nemchinovka Federal Research Center, 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye, Odintsovsky District, Moscow Province 143026, Russia, mbold1911@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7421-0321>

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 25.05.2021; одобрена после рецензирования 14.12.2021; принята к публикации 28.02.2022.

The article was submitted on 25.05.2021; approved after reviewing on 14.12.2021; accepted for publication on 28.02.2022.