

## Статистическая и графическая (GGE biplot) оценка адаптивной способности и стабильности селекционных линий ячменя озимого

В.Н. Гудзенко

Мироновский институт пшеницы имени В.Н. Ремесло Национальной академии аграрных наук Украины, Киевская область, с. Центральное, Украина  
✉ e-mail: barleys@mail.ru

В связи с глобальными климатическими изменениями последних лет остро стоит вопрос повышения адаптивно-го потенциала сельскохозяйственных культур. Необходимо создание сортов озимых зерновых как с экологической адаптивностью, так и способностью формировать стабильный уровень урожайности в разные по гидротермическим условиям года. С целью выведения сортов ячменя озимого с сочетанием урожайности и стабильности в Мироновском институте пшеницы имени В.Н. Ремесло Национальной академии аграрных наук Украины в 2012/2013–2014/2015 гг. испытывали 14 перспективных селекционных линий ячменя озимого, используя четыре различных срока сева. С помощью дисперсионного анализа выявлены достоверные вклады в вариацию урожайности: условий среды – 64.59 %, взаимодействия генотип–среда – 16.84 % и генотипа – 15.57 %. Сроки сева существенно влияли на увеличение варьирования урожайности линий. Разница между средними значениями урожайности по срокам сева в пределах года составляла: 2012/2013 г. – 1.05 т/га, 2013/2014 г. – 0.90 т/га, 2014/2015 г. – 1.25 т/га. Для характеристики взаимодействия генотип–среда и ранжирования линий по урожайности применяли несколько наиболее распространенных статистических параметров адаптивности, стабильности, пластичности и GGE biplot. Использование различных сроков сева на завершающем этапе селекционного процесса ячменя озимого – простой, но эффективный подход, позволяющий более детально оценить адаптивность селекционных линий в меняющихся условиях вегетации. По сравнению с статистическими показателями GGE biplot имеет ряд преимуществ для характеристики взаимодействия генотип–среда. Эта графическая модель позволяет визуализировать ранжирование сред по дифференцирующей способности и репрезентативности, а также выделять генотипы как специфически адаптированные, так и с оптимальным сочетанием потенциала урожайности и стабильности в совокупности сред (мегасред). Выделены селекционная линия с оптимальным сочетанием урожайности и стабильности Pallidum 4816, а также высокопродуктивные линии Pallidum 4857 и Pallidum 4659, которые переданы на государственное сортоиспытание Украины как новые сорта ячменя озимого: МИП Ясон, МИП Оскар и МИП Гладиатор.

Ключевые слова: озимый ячмень; селекционные линии; срок сева; урожайность; взаимодействие генотип–среда; параметры адаптивности, пластичности, стабильности; GGE biplot.

**Для цитирования:** 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

## Statistical and graphical (GGE biplot) evaluation of the adaptive ability and stability of winter barley breeding lines

V.N. Gudzenko

The V.N. Remeslo Mironovka Institute of Wheat of NAAS of Ukraine, Kiev region, Tcentralnoe village, Ukraine  
✉ e-mail: barleys@mail.ru

Due to current global climate changes, the issue of improving adaptive capacity of crops is of high importance. It is important to create winter crop varieties with both ecological adaptability and yield stability in years with different hydrothermal conditions. In order to develop winter barley varieties with a combination of yield and stability, 14 promising breeding lines have been evaluated in the conditions of the V.M. Remeslo Myronovka Institute of Wheat of NAAS of Ukraine in 2012/2013–2014/2015 using four different sowing dates. The ANOVA revealed a reliable part in yield variation: 64.59 % for environment, 16.84 % for genotype–environment interaction, and 15.57 % for genotype. The sowing dates significantly increased the yield variation of the breeding lines. The differences between the average yields of the lines depending on sowing date within the year were 1.05 t/ha in 2012/2013, 0.90 t/ha in 2013/2014, and 1.25 t/ha in 2014/2015. For genotype–environment interaction interpretation and ranking lines by yield a number of the most known statistical parameters of adaptability, stability, and plasticity and GGE biplot were applied. The use of different sowing dates at the final stage of the winter barley breeding process is a simple but effective approach that allows a more detailed assessment of the adaptive potential of breeding lines in various growing conditions. As compared to statistical parameters, GGE biplot has some advantages for interpretation of genotype–environment interaction. This

graphic model allows ranking environments to be visualized for their discriminating ability and representativeness, as well as both specifically adapted genotypes and the ones with the optimal combination of yield potential and stability to be identified in a set of environments (mega-environment). The breeding line Pallidum 4816 with the optimal combination of yield and stability, as well as the high-yielding breeding lines Pallidum 4857 and Pallidum 4659 were identified and submitted to the State Variety Testing of Ukraine as the new winter barley varieties MIP Yason, MIP Oskar and MIP Hladiator.

Key words: winter barley; breeding lines; sowing date; yield; genotype–environment interaction; parameters of adaptability, plasticity, stability; GGE biplot.

**For citation:** Gudzenko V.N. Statistical and graphical (GGE biplot) evaluation of the adaptive ability and stability of winter barley breeding lines. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2019;23(1):110–118. DOI 10.18699/VJ19.469 (in Russian)

## Введение

В связи с глобальными климатическими изменениями последних лет остро стоит вопрос повышения адаптивного потенциала сельскохозяйственных культур как в экологическом градиенте, так и способности формировать стабильный уровень урожайности в разные по гидротермическим условиям годы (Nicotra et al., 2010; Dimova et al., 2012; Gebremedhin et al., 2014; Mirosavljevic et al., 2014; Ingvordsen et al., 2015; Macholdt, Honermeier, 2016). Сорты озимых культур должны характеризоваться стабильной урожайностью для разного времени всходов, которые могут сильно варьировать в производственных условиях в зависимости от сроков сева, температурного режима почвы и воздуха, влагообеспеченности почвы, срока уборки предшественников и других факторов. Следует отметить, что в производственных условиях лесостепи Украины сроки сева ячменя озимого варьируют в пределах конец сентября–конец октября. При различных сроках появления всходов растения в зимний период и в течение весенне-летней вегетации подвергаются воздействию абиотических и биотических стрессов на разных этапах органогенеза, что может существенно влиять на их рост, развитие и в итоге – на уровень урожайности. Поздние сроки сева (вторая половина октября) в ряде лет существенно снижают урожайность ячменя в результате повреждения при перезимовке, а также неполной компенсации растениями весной недостаточного осеннего кущения. Исследование селекционных линий озимых зерновых культур с использованием различных сроков сева на уровне конкурсного сортоиспытания может позволить целенаправленно отбирать адаптивные генотипы для передачи в систему государственного сортоиспытания.

Для интерпретации результатов многосредовых или многолетних испытаний и выделения перспективных генотипов в разные годы предложен ряд известных математически-статистических методик оценки адаптивной способности, пластичности и стабильности (Wricke, 1962; Finlay, Wilkinson, 1963; Eberhart, Russel, 1966; Tai, 1971; Shukla, 1972; Кильчевский, Хотылева, 1985; Lin, Binns, 1988; Huehn, 1990). В последнее время широкое распространение для характеристики взаимодействия генотип–среда имеют подходы, позволяющие визуализировать распределение генотипов и сред испытания в пространстве главных компонент, в частности GGE biplot модель (Jalata, 2011; Ahmadi et al., 2012; Farshadfar et al., 2012; Mortazavian et al., 2014; Sarkar et al., 2014; Mohammadi et al., 2015; Solonechnyi et al., 2015; Dimitrova-Doneva et al., 2016; Гудзенко и др., 2017). Преимущества и особенности

данного подхода подробно освещены в оригинальных сообщениях (Yan et al., 2000; Yan, Tinker, 2006).

С целью выделения селекционных линий ячменя озимого, которые сочетают потенциал продуктивности и стабильность в контрастные по погодным условиям года, использовали различные сроки сева с последующей интерпретацией экспериментальных данных наиболее распространенными статистическими подходами и GGE biplot.

## Материалы и методы

Исследования проводили в Мироновском институте пшеницы имени В.Н. Ремесло Национальной академии аграрных наук Украины в 2012/2013–2014/2015 гг. Стандарт – сорт ячменя озимого Жерар и 14 перспективных селекционных линий ежегодно сеяли в четыре срока: 27 сентября, 4 октября, 11 октября и 18 октября. Таким образом, за три года получены урожайные данные испытаний линий в 12 средах.

Для ранжирования и оценки селекционных линий по сочетанию урожайности и адаптивности использовали статистические показатели: общая адаптивная способность –  $GAA_i$ , дисперсия специфической адаптивной способности –  $\sigma^2 SAA_i$ , относительная стабильность генотипа –  $Sg_i$ , селекционная ценность генотипа –  $SVG_i$  (Кильчевский, Хотылева, 1985), коэффициент регрессии –  $b_i$  и среднее квадратическое отклонение –  $S^2 d_i$  (Eberhart, Russel, 1966), экваленса –  $W_i$  (Wricke, 1962), показатель преимущества сорта –  $P_i$  (Lin, Binns, 1988), непараметрические показатели стабильности –  $S_i^{(1)}$  и  $S_i^{(2)}$  (Huehn, 1990). Для удобства сравнения линиям по каждому параметру присваивали соответствующий ранг (R). Лучшему значению параметра соответствует единица.

Согласно методике А.В. Кильчевского и Л.В. Хотылевой (1985), характеризовали дифференцирующую способность сред с помощью параметров: продуктивность среды –  $d_k$ , дисперсия взаимодействия генотип–среда –  $\sigma^2(GxE)_{ek}$ , дисперсия дифференцирующей способности среды –  $\sigma^2 DAE_k$ , коэффициент нелинейности ответа генотипов на среду –  $L_{ek}$ , относительная дифференцирующая способность среды –  $S_{ek}$ , коэффициент компенсации среды –  $K_{ek}$ . Для графического анализа применяли пакет прикладных программ GGEbiplotGUI на основе R-программирования (Frutos et al., 2014).

## Результаты

Контрастные по гидротермическому режиму погодные условия лет исследований позволили всесторонне оце-

**Table 1.** Meteorological conditions during the winter barley growth season, 2012/13–2014/15

Month	Monthly precipitation, mm				Monthly average air temperature, °C			
	2012/2013	2013/2014	2014/2015	Long-term mean	2012/2013	2013/2014	2014/2015	Long-term mean
IX	60.0	134.4	23.0	50.6	16.7	12.7	14.7	14.5
X	45.0	7.6	35.0	37.9	10.6	9.6	7.1	8.1
XI	27.0	33.5	17.0	41.2	4.6	6.7	1.7	2.1
XII	98.0	8.1	30.0	41.9	-4.6	-0.5	-2.1	-2.1
I	66.0	33.8	33.0	34.2	-3.8	-4.3	-0.8	-4.3
II	67.0	5.6	21.0	31.0	-0.1	-0.8	-1.3	-3.3
III	89.0	14.2	60.0	33.5	-1.0	6.5	4.7	1.7
IV	35.0	60.7	34.0	42.6	10.5	10.1	9.3	9.2
V	61.0	158.3	55.0	52.8	19.0	17.3	16.3	15.4
VI	57.0	47.5	101.0	84.4	21.4	18.0	19.4	18.5

**Table 2.** Grain yield (metric t/ha) in winter barley breeding lines depending on sowing date in 2012/13

Code	Reference, breeding lines	Sowing date				Mean
		13-1*	13-2*	13-3*	13-4*	
G1	Zherar	4.46	4.32	3.93	3.68	4.10
G2	Pallidum 4857	5.40	5.33	4.75	4.47	4.99
G3	Pallidum 4816	5.21	5.18	4.68	4.41	4.87
G4	Parallelum 4418	4.91	4.72	4.12	3.97	4.43
G5	Pallidum 4483	5.30	5.16	4.45	4.06	4.74
G6	Pallidum 4836	5.41	4.98	4.43	4.02	4.71
G7	Pallidum 4659	5.22	5.19	4.78	4.56	4.94
G8	Pallidum 4031	5.44	4.88	4.37	4.22	4.73
G9	Pallidum 4810	5.49	4.97	4.47	4.09	4.76
G10	Pallidum 4792	4.89	4.75	4.12	4.01	4.44
G11	Pallidum 4860	5.24	5.05	4.48	4.22	4.75
G12	Pallidum 4879	4.97	4.85	4.09	4.01	4.48
G13	Pallidum 4723	5.35	5.17	4.41	4.02	4.74
G14	Pallidum 4654	5.32	5.07	4.35	4.03	4.69
G15	Pallidum 4606	5.12	5.09	4.16	4.12	4.62
Mean		5.18	4.98	4.37	4.13	4.67
LSD <sub>05</sub>		0.32	0.38	0.28	0.36	0.33

Here and below: \* year and sowing date.

нить селекционные линии (табл. 1). Следует отметить, что мягкие зимы 2012/2013–2014/2015 гг. не оказали существенного влияния на результаты испытаний (дифференциации по зимостойкости), а больший вклад в варьирование урожайности имели условия осенней и весенне-летней вегетации.

В 2012/2013 гг. отмечены позднее возобновление весенней вегетации и повышенные температуры воздуха в апреле–июне, что привело к сокращению периода ве-

гетации, практически отсутствию весеннего продуктивного кушения и последующего подгорания зерна. Максимальную среднюю урожайность по опыту линии сформировали в первом сроке сева – 5.18 т/га, несколько ниже во втором – 4.98 т/га (табл. 2). В третьем и четвертом сроках сева урожайность была существенно ниже – 4.37 т/га и 4.13 т/га соответственно. Это связано с тем, что менее развитые растения двух последних сроков сева были более подвержены действию неблагоприятных условий.

Общими особенностями двух последующих лет (2013/2014 и 2014/2015 гг.) были высокий уровень распространения возбудителей болезней (мучнистая роса (*Blumeria (Erysiphe) graminis* (DC.) Golovin ex Speer f. sp. *hordei* Em. Marchal), сетчатая (*Pyrenophora teres* Drechs.), темно-бурая (*Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem.) и полосатая (*Pyrenophora graminea* Ito & Kurib.) пятнистости, а также карликовая ржавчина (*Puccinia hordei* Otth.)).

Существенное превышение количества осадков над многолетней нормой в мае 2014 г. спровоцировало сильное полегание растений, особенно в первых двух сроках сева. Следует отметить, что интенсивному развитию растений в этих сроки сева способствовали и обильные осадки в сентябре 2013 г. Поэтому максимальное значение урожайности было в третьем сроке сева – 4.83 т/га, минимальное в первом – 3.93 т/га (табл. 3).

В целом по сравнению с двумя предыдущими годами условия 2014/2015 г. были наиболее благоприятными для роста и развития ячменя озимого. В то же время у неустойчивых линий в этом году отмечали полегание, особенно в первом сроке сева. Максимальную урожайность отметили во втором сроке сева – 6.33 т/га, наименьшую в последнем – 5.08 т/га (табл. 4).

Обобщая трехлетние результаты исследований, следует отметить, что изменчивость условий вегетации растений в разные годы значительно влияла на урожайность селекционных линий. Сроки сева влияли на увеличение вариабельности урожайности. Разница между средним значением урожайности в опыте по срокам сева в пределах года составляла: 2012/2013 г. – 1.05 т/га, 2013/2014 г. – 0.90 т/га, 2014/2015 г. – 1.25 т/га. При этом максимальный уровень урожайности линий по срокам сева варьировал по годам.

**Table 3.** Grain yield (metric t/ha) in winter barley breeding lines depending on sowing date in 2013/14

Code	Reference, breeding lines	Sowing date				Mean
		14-1	14-2	14-3	14-4	
G1	Zherar	4.15	4.41	5.01	4.45	4.51
G2	Pallidum 4857	5.23	5.46	6.09	5.85	5.66
G3	Pallidum 4816	5.21	5.29	5.79	5.22	5.38
G4	Parallelum 4418	3.81	4.06	5.98	5.44	4.82
G5	Pallidum 4483	3.75	4.02	5.69	5.77	4.81
G6	Pallidum 4836	3.70	4.53	5.46	4.82	4.63
G7	Pallidum 4659	4.50	4.53	4.85	4.84	4.68
G8	Pallidum 4031	4.35	4.63	4.79	4.69	4.62
G9	Pallidum 4810	3.88	4.06	4.32	4.60	4.22
G10	Pallidum 4792	3.55	3.97	4.32	4.62	4.12
G11	Pallidum 4860	3.87	4.13	4.19	4.20	4.10
G12	Pallidum 4879	3.19	3.32	4.34	4.63	3.87
G13	Pallidum 4723	3.44	3.72	3.96	4.04	3.79
G14	Pallidum 4654	3.25	3.76	3.97	3.82	3.70
G15	Pallidum 4606	3.11	3.42	3.67	3.62	3.46
Mean		3.93	4.22	4.83	4.71	4.42
LSD <sub>05</sub>		0.34	0.34	0.31	0.27	0.32

**Table 4.** Grain yield (metric t/ha) in winter barley breeding lines depending on sowing date in 2014/15

Code	Reference, breeding lines	Sowing date				Mean
		15-1	15-2	15-3	15-4	
G1	Zherar	6.12	6.41	5.49	5.34	5.84
G2	Pallidum 4857	6.58	6.78	6.23	5.33	6.23
G3	Pallidum 4816	6.62	7.52	5.98	5.19	6.33
G4	Parallelum 4418	5.74	6.55	5.03	4.55	5.47
G5	Pallidum 4483	5.87	6.03	5.61	4.97	5.62
G6	Pallidum 4836	6.07	6.17	5.68	5.17	5.77
G7	Pallidum 4659	6.83	6.93	6.24	5.91	6.48
G8	Pallidum 4031	5.03	6.90	6.35	5.51	5.95
G9	Pallidum 4810	5.23	6.15	5.65	5.01	5.51
G10	Pallidum 4792	5.11	5.64	5.13	4.63	5.13
G11	Pallidum 4860	6.26	6.30	6.10	5.12	5.95
G12	Pallidum 4879	4.71	5.37	5.16	4.98	5.06
G13	Pallidum 4723	5.09	5.88	5.45	5.03	5.36
G14	Pallidum 4654	5.66	6.03	5.88	4.65	5.56
G15	Pallidum 4606	5.73	6.26	5.46	4.88	5.58
Mean		5.78	6.33	5.70	5.08	5.72
LSD <sub>05</sub>		0.24	0.26	0.27	0.25	0.26

**Table 5.** Analysis of variance for the yields in winter barley breeding lines

Source of variation	SS	df	MS	Percentage of variation
Genotype	63.47	14	4.53*	15.57
Environment	263.28	11	23.93*	64.59
Genotype-environment interaction	68.63	154	0.45*	16.84
Error	12.24	360	0.03	3.00
Total	407.62	539		

Notes: SS – sum of squares, df – degree of freedom, MS – mean square, \* significant at  $p < 0.01$  %.

Наиболее высокая в среднем по опыту урожайность отмечена в 2014/2015 г. во втором сроке сева – 6.33 т/га. Минимальная средняя урожайность была в 2013/2014 г. при первом сроке сева – 3.93 т/га. Абсолютная минимальная урожайность (G15 – 3.11 т/га) отмечена при первом сроке сева 2013/2014 г., максимальная (G3 – 7.52 т/га) – во втором сроке 2014/2015 г. Такая вариабельность урожайности свидетельствует об отсутствии одного универсального календарного срока сева ячменя озимого. Полученные данные подтверждают необходимость создания сортов, способных к реализации продуктивного потенциала при варьирующих сроках сева в производственных условиях.

Дисперсионный анализ показывает, что наибольший вклад в вариацию урожайности имели условия среды – 64.59 %, существенно ниже, практически равнозначно – взаимодействие генотип–среда – 16.84 % и генотип – 15.57 % (табл. 5).

## Обсуждение

Для полного анализа экспериментальных данных взаимодействия генотип–среда необходимо учитывать не только оценку генотипов, но и два других важных аспекта: мегасредовой анализ и оценку сред испытания (Yan, Tinker, 2006).

Одним из преимуществ методики А.В. Кильчевского и Л.В. Хотылёвой (1985) является возможность характеризовать среды испытаний по дифференцирующей способности и другим параметрам (табл. 6). Низкие значения дифференцирующей способности среды ( $\sigma^2 DAE_k$ ) и относительной дифференцирующей способности среды ( $S_{ek}$ ), а также сильный компенсирующий эффект ( $K_{ek} = 0.34-0.56$ ) отмечены во всех четырех сроках сева 2012/2013 г. Следует отметить, что они достаточно сильно различались между собой по продуктивности ( $d_k$ ). Высокими  $\sigma^2 DAE_k$  и  $S_{ek}$  характеризовались четыре срока сева 2013/2014 г., а также первые два срока сева 2014/2015 г. В этих средах отмечен высокий дестабилизирующий эффект ( $K_{ek} = 2.50-5.47$ ). Все сроки сева 2013/2014 г. имели низкую  $d_k$ , особенно первые два. В противоположность этому, первые два срока сева 2014/2015 г. имели наивысшую  $d_k$  в опыте. Условия двух последних сроков сева 2014/2015 г. занимали промежуточное положение между рассмотренными средами, но между собой они достаточно сильно отличались по  $d_k$ . В среде 15-3 превалировали дестабилизирующие эф-

**Table 6.** Test environment parameters for the evaluation and selection of breeding lines

Environment	$d_k$	$\sigma^2(G \times E)_{ek}$	$\sigma^2 DAE_k$	$L_{ek}$	$S_{ek}$	$K_{ek}$
13-1	0.25	0.13	0.07	1.93	4.93	0.56
13-2	0.04	0.10	0.05	1.88	4.61	0.46
13-3	-0.56	0.04	0.05	0.74	5.26	0.46
13-4	-0.81	0.05	0.04	1.29	4.80	0.34
14-1	-1.00	0.11	0.42	0.27	16.52	3.64
14-2	-0.72	0.09	0.36	0.24	14.17	3.09
14-3	-0.11	0.33	0.63	0.53	16.49	5.47
14-4	-0.23	0.23	0.42	0.54	13.77	3.63
15-1	0.84	0.18	0.41	0.45	11.04	3.51
15-2	1.39	0.09	0.29	0.32	8.51	2.50
15-3	0.76	0.08	0.17	0.50	7.21	1.46
15-4	0.15	0.09	0.12	0.76	6.69	1.00

Notes:  $d_k$ , productivity of the environment;  $\sigma^2(G \times E)_{ek}$ , variance of genotype  $\times$  environment interaction;  $\sigma^2 DAE_k$ , variance of the discriminating ability of the environment;  $L_{ek}$ , coefficient of the nonlinear response of the genotype in the environment;  $S_{ek}$ , relative discriminating ability of the environment;  $K_{ek}$ , coefficient of compensation of the environment.

факты, а в 15-4 эффекты компенсации и дестабилизации были на одном уровне. Приведенные данные указывают на различную продуктивность фонов исследований, а также на их способность дифференцировать генотипы. Условия сред 13-1, 13-2, 13-3, 13-4 можно характеризовать как нивелирующий фон; 14-1, 14-2, 14-3, 14-4, 15-1, 15-2 – анализирующий; 15-3, 15-4 – стабилизирующий.

Характеристика селекционных линий по параметрам адаптивной способности, пластичности и стабильности приведена в табл. 7 и 8. Ранги (R) отчетливо указывают на оценку линий тем или иным параметром и позволяют дифференцировать генотипы между собой. Максимальная общая адаптивная способность ( $GAA_i$ ) отмечена у линий G2 и G3. Самое низкое значение дисперсии специфической адаптивной способности ( $\sigma^2 SAA_i$ ) было у селекционной линии G10, самое высокое – у G15. Следует отметить, что линия G15 уступала остальным по показателям относительной стабильности ( $Sg_i$ ) и селекционной ценности генотипа ( $SVG_i$ ). По этим показателям преимущество имела селекционная линия G2. Оптимальной реакцией на изменение условий среды по коэффициенту регрессии ( $b_i$ ) характеризовалась линия G3. Близкой к оптимальной была реакция у линий G8, G6, G4, G13. Наименее реагировала на изменение условий среды линия G2, наиболее – G15. В соответствии с среднеквадратическим отклонением ( $S^2 d_i$ ) и эквивалентом ( $W_i$ ) стабильными были линии G10 и G9. По показателю преимущества сорта ( $P_i$ ) существенно преобладали линии G3 и G2. Лучшее значение первого непараметрического показателя стабильности ( $S_i^{(1)}$ ) имела линия G10, второго непараметрического показателя стабильности ( $S_i^{(2)}$ ) – G2. Таким образом, следует отметить существенное изменение рангов селекционных линий по разным показателям.

Для определения связей между приведенными параметрами и средней урожайностью использовали корреляционный анализ (табл. 9). Большинство показателей ( $\sigma^2 SAA_i$ ,  $b_i$ ,  $S_i^{(1)}$ ,  $S_i^{(2)}$ ,  $W_i$ ,  $Sg_i$ ) не имело существенной связи со средней урожайностью. Таким образом, отбор линий только по этим показателям может способствовать выделению стабильных генотипов, но практически без учета их уровня урожайности. В то же время в коммерческом сорте

**Table 7.** Ranking of winter barley breeding lines according to parameters of adaptive ability and stability

Code	$GAA_i$	R	$\sigma^2 SAA_i$	R	$Sg_i$	R	$SVG_i$	R
G1	-0.12	10	0.74	10	17.81	12	2.20	13
G2	0.69	1	0.48	3	12.31	1	3.52	1
G3	0.59	2	0.72	9	15.32	5	2.95	2
G4	-0.03	8	0.76	11	17.72	11	2.26	10
G5	0.12	5	0.63	7	15.70	7	2.64	7
G6	0.10	6	0.59	5	15.25	4	2.70	4
G7	0.43	3	0.78	12	16.46	9	2.68	6
G8	0.16	4	0.67	8	16.07	8	2.60	8
G9	-0.11	9	0.49	4	14.57	3	2.69	5
G10	-0.37	13	0.34	1	12.81	2	2.78	3
G11	-0.01	7	0.78	13	17.94	13	2.24	12
G12	-0.47	15	0.48	2	15.46	6	2.36	9
G13	-0.31	12	0.62	6	16.94	10	2.24	11
G14	-0.29	11	0.85	14	19.81	14	1.84	14
G15	-0.38	14	1.01	15	22.05	15	1.50	15

Notes:  $GAA_i$ , general adaptive ability;  $\sigma^2 SAA_i$ , variance of specific adaptive ability;  $Sg_i$ , relative stability of the genotype;  $SVG_i$ , selection value of the genotype; R, rank of the genotype.

**Table 8.** Ranking of winter barley breeding lines according to parametric and nonparametric measures of plasticity and stability

Code	$b_i$	R	$S^2d_i$	R	$W_i$	R	$P_i$	R	$S_i^{(1)}$	R	$S_i^{(2)}$	R
G1	1.07	4	0.15	9	1.60	9	0.49	8	0.52	12	22.18	14
G2	0.71	8	0.74	15	2.28	13	0.07	2	0.18	2	2.18	1
G3	1.00	1	0.22	13	2.29	14	0.06	1	0.26	3	5.73	3
G4	0.97	2	0.29	14	2.91	15	0.47	7	0.59	14	23.20	15
G5	0.93	4	0.18	12	1.92	11	0.39	6	0.45	10	8.91	10
G6	1.02	3	0.06	3	0.62	3	0.36	4	0.39	6	5.84	4
G7	1.15	5	0.09	4	1.09	4	0.18	3	0.33	5	6.91	6
G8	1.01	2	0.16	10	1.63	10	0.37	5	0.67	15	16.75	13
G9	0.93	5	0.05	2	0.60	2	0.61	10	0.45	11	8.45	9
G10	0.80	7	0.01	1	0.43	1	0.86	11	0.17	1	3.02	2
G11	1.16	6	0.09	5	1.10	5	0.53	9	0.44	8	7.75	7
G12	0.83	6	0.13	6	1.47	7	1.08	15	0.41	7	5.93	5
G13	0.97	3	0.13	7	1.37	6	0.91	13	0.26	4	11.73	12
G14	1.18	7	0.13	8	1.58	8	0.89	12	0.44	9	8.18	8
G15	1.27	8	0.18	11	2.25	12	1.04	14	0.53	13	10.18	11

Notes:  $b_i$ , coefficient of regression;  $S^2d_i$ , mean square deviation;  $W_i$ , ecovalence;  $P_i$ , cultivar superiority measure;  $S_i^{(1)}$  and  $S_i^{(2)}$ , nonparametric stability measures; R, rank of the genotype.

**Table 9.** Spearman's coefficient of rank correlation between mean yield and indices of adaptability, plasticity and stability

Index	Mean yield	$b_i$	$S^2d_i$	$W_i$	$P_i$	$S_i^{(1)}$	$S_i^{(2)}$	$\sigma^2SAA_i$	$Sg_i$
$b_i$	-0.17								
$S^2d_i$	0.56	-0.42							
$W_i$	0.28	0.06	0.64						
$P_i$	-0.96	0.16	-0.45	-0.21					
$S_i^{(1)}$	-0.24	0.48	-0.23	0.27	0.13				
$S_i^{(2)}$	-0.19	0.29	-0.08	0.41	0.02	0.74			
$\sigma^2SAA_i$	-0.01	0.91	-0.07	0.46	0.04	0.52	0.40		
$Sg_i$	-0.42	0.88	-0.26	0.32	0.43	0.58	0.45	0.91	
$SVG_i$	0.72	-0.75	0.47	-0.11	-0.71	-0.55	-0.43	-0.69	-0.93

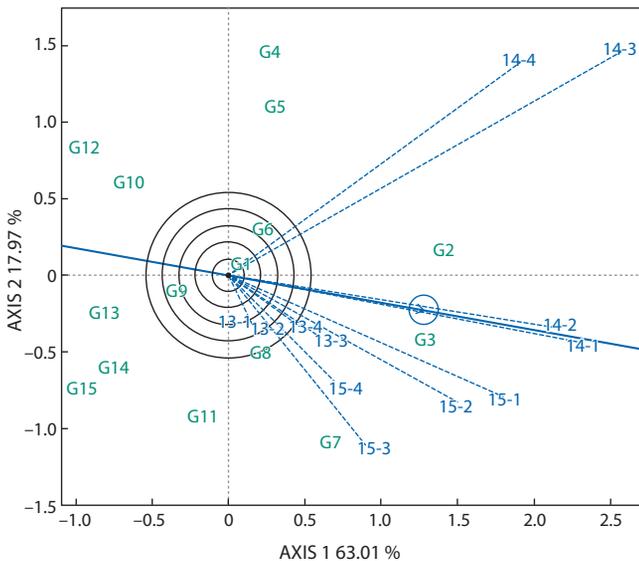
необходимо стремиться достичь оптимального баланса между урожайностью и стабильностью. Высокая отрицательная связь выявлена между средней урожайностью и показателем преимущества генотипа  $P_i$  ( $r = -0.96$ ). Это свидетельствует о том, что  $P_i$  преимущественно связан со средним уровнем урожайности, но меньше характеризует стабильность генотипов. Вышесредняя корреляция отмечена между урожайностью и  $SVG_i$  ( $r = 0.72$ ). Это может указывать на то, что  $SVG_i$  более сбалансирован по сочетанию урожайности и стабильности.

Высокую отрицательную корреляцию отметили между параметрами  $Sg_i$  и  $SVG_i$  ( $r = -0.93$ ), положительную – между  $b_i$  и  $\sigma^2SAA_i$  ( $r = 0.91$ ), а также  $Sg_i$  и  $b_i$  ( $r = 0.88$ ). Существенная отрицательная связь отмечена между  $SVG_i$  и  $b_i$  ( $r = -0.75$ ),  $P_i$  и  $SVG_i$  ( $r = -0.71$ ), а также  $SVG_i$  и  $\sigma^2SAA_i$  ( $r = -0.69$ ), положительная – между двумя непараметри-

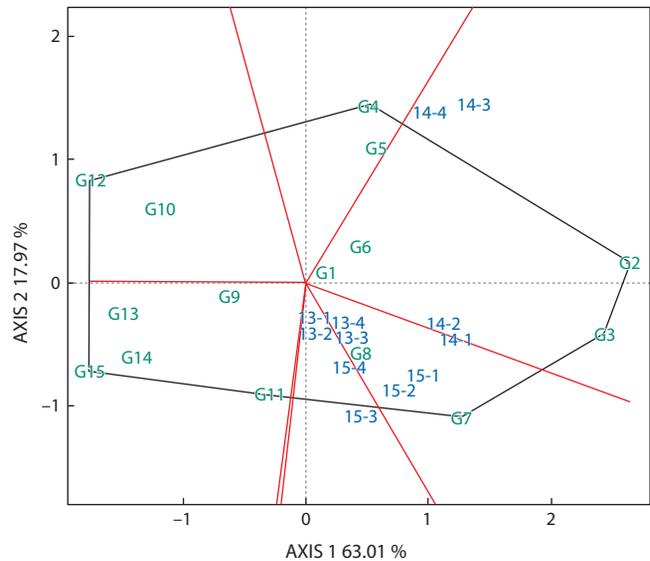
ческими показателями  $S_i^{(1)}$  и  $S_i^{(2)}$  ( $r = 0.74$ ). Выявленные закономерности связей между урожайностью и показателями стабильности следует учитывать при общей оценке адаптивности генотипов.

W. Yan с коллегами (2007) сообщают, что GGE biplot имеет преимущество по сравнению с другими статистическими моделями, поскольку позволяет характеризовать все три аспекта генотип-средовых испытаний: генотипы, среды и мегасредовой анализ. Важным инструментом GGE biplot является также то, что в одной модели объединены (а не разъединены) два главных источника вариации в мегасредовом анализе: генотип и взаимодействие генотип–среда.

В нашем случае первые две главные компоненты (Axis 1, Axis 2) GGE biplot модели объясняют 80.98 % взаимодействия генотип–среда. На рис. 1 показана срав-



**Fig. 1.** Discriminating ability against representativeness of test environments.



**Fig. 2.** The "which-won-where" view of the GGE biplot.

нительная характеристика сред по дифференцирующей способности и репрезентативности. Линия, проходящая сквозь центр GGE biplot, представляет собой среднюю ось сред. Пунктирные линии, соединяющие центр GGE biplot с годами испытаний, являются векторами сред. Более длинный вектор информирует о большей дифференцирующей способности соответствующей среды. В этом случае повышенной дифференцирующей способностью характеризуются среды 14-3, 14-4, 14-1, 14-2, 15-1, 15-2, 15-3, несколько ниже – 15-4, низкой – 13-1, 13-2, 13-3, 13-4. Угол между средней осью сред и вектором конкретной среды характеризует его репрезентативность. Меньший угол соответствует более высокой репрезентативности. Максимальная репрезентативность отмечена в средах 14-1 и 14-2. В целом следует отметить, что среды 14-1 и 14-2 сочетали высокие уровни дифференцирующей способности и репрезентативности. Чем меньше угол между векторами сред, тем более похожи эти среды между собой по уровню урожайности, и наоборот. Наиболее близкими между собой были среды 14-1, 14-2, наиболее отличались 14-4 и 13-1.

GGE biplot «кто-где-победил» позволяет визуализировать преимущество генотипов в отдельной среде или группе сред (рис. 2).

Линиями, отходящими из центра GGE biplot, двухкомпонентное пространство распределено на сектора, в которых распределены среды и генотипы. На углах полигональной фигуры расположены генотипы, которые имеют преимущество в определенных средах или группе сред (мегасреда, mega-environment). Так, линии G2 и G3 являются лучшими в совокупности сред 14-1, 14-2, 14-3, 14-4. В этом секторе разместились также генотипы G6 и G1. Преимущество в мегасреде, образованной совокупностью сред 15-1, 15-2, 13-3, 13-4, имеет линия G7. К этому сектору принадлежит также линия G8. Генотипы, попавшие в сектора без сред, уступали приведенным выше линиям по адаптивности.

На рис. 3 представлен GGE biplot, характеризующий селекционные линии по сочетанию средней урожайности и стабильности. Ось, проходящая сквозь центр GGE biplot по горизонтали, с обозначенной кругом стрелкой, является средней для сред абсциссой. Слева направо образцы ранжированы по средней урожайности. В вертикальном направлении среднюю для сред абсциссу пересекает средняя для сред ордината. Место их пересечения одновременно представляет среднее значение урожайности по опыту. Линии, расположенные правее от нее, имеют вышесреднюю по опыту урожайность, левее – урожайность ниже, чем по опыту. Удаленность образцов от оси абсцис по оси ординат в обоих направлениях характеризует вариабельность урожайности по отношению к ожидаемому ее уровню проявления в конкретных годах. Чем ближе генотипы размещены к абсциссе, тем они стабильнее, и наоборот, чем более они отдалены, тем больше их вариабельность.

Таким образом, максимальной урожайностью по убывающей характеризуются линии G2, G3, G7. Линия G3 имела большую стабильность по сравнению с G2 и G7. Это связано с тем, что урожайность линии G2 была несколько выше, чем прогнозируемая в средах 14-3 и 14-4, а линии G7 – в средах 15-1, 15-2, 15-3, 15-4. Генотипы G8, G6, G5, G1, G4 и G11 имеют урожайность, близкую к среднему значению по опыту. Линии G9, G14, G10, G13, G15 и G12 уступают по урожайности среднему ее значению по опыту. Повышенной стабильностью характеризуются стандарт Жерар (G1) и линии G10, G12, G9, G8. Наиболее вариабельными были генотипы G4 и G15.

На рис. 4 отражено ранжирование генотипов по отношению к гипотетическому «идеальному» генотипу, который условно должен располагаться в центре центральных кругов. Линия G3 – максимально близка к нему. Таким образом, линия G3 (Pallidum 4816) оптимально сочетает потенциал урожайности и адаптивности. Уступают ей по стабильности линия G2 (Pallidum 4857), по урожайности и стабильности – G7 (Pallidum 4659). Генотипы G8, G6,



- Frutos E., Galindo M.P., Leiva V. An interactive biplot implementation in R for modeling genotype-by-environment interaction. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 2014;28:1629-1641. DOI 10.1007/s00477-013-0821-z.
- Gebremedhin W., Firew M., Tesfye B. Stability analysis of food barley genotypes in Northern Ethiopia. *Afr. Crop Sci. J.* 2014;22(2):145-153.
- Huehn M. Nonparametric measures of phenotypic stability. Part 1: Theory. *Euphytica.* 1990;47:189-194. DOI 10.1007/BF00024241.
- Ingvordsen C.H., Backes G., Lyngkjær M.F., Peltonen-Sainio P., Jensen J.D., Jalli M., Jahoor A., Rasmussen M., Mikkelsen T.N., Stockmarr A., Jørgensen R.B. Significant decrease in yield under future climate conditions: Stability and production of 138 spring barley accessions. *Europ. J. Agron.* 2015;63:105-113.
- Jalata Z. GGE-biplot analysis of multi-environment yield trials of barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes in Southeastern Ethiopia Highlands. *Int. J. Plant Breed. Genet.* 2011;5(1):59-75.
- Lin C.S., Binns M.R. A superiority measure of cultivar performance for cultivar  $\times$  location data. *Can. J. Plant Sci.* 1988;68:193-198. DOI 10.4141/cjps88-018.
- Macholdt J., Honermeier B. Impact of climate change on cultivar choice: adaptation strategies of farmers and advisors in German cereal production. *Agronomy.* 2016;6(40). DOI 10.3390/agronomy6030040.
- Mirosavljevic M., Przulj N., Bocanski J., Stanisavljevic D., Mitrovic B. The application of AMMI model for barley cultivars evaluation in multi-year trials. *Genetika.* 2014;46(2):445-454.
- Mohammadi M., Noorinia A.A., Khalilzadeh G.R., Hosseinpoo T. Application of GGE biplot analysis to investigate GE interaction on barley grain yield. *Curr. Opin. Agric.* 2015;4(1):25-32.
- Mortazavian S.M.M., Nikkhah H.R., Hassani F.A., Sharif-al-Hosseini M., Taheri M., Mahlooji M. GGE biplot and AMMI analysis of yield performance of barley genotypes across different environments in Iran. *J. Agr. Sci. Tech.* 2014;16:609-622.
- Nicotra A.B., Atkin O.K., Bonser S.P., Davidson A.M., Finnegan E.J., Mathesius U., Poot P., Purugganan M.D., Richards C.L., Valladares F., van Kleunen M. Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends Plant Sci.* 2010;15(12):684-692. DOI 10.1016/j.tplants.2010.09.008.
- Sarkar B., Sharma R.C., Verma R.P.S., Sarkar A., Sharma I. Identifying superior feed barley genotypes using GGE biplot for diverse environments in India. *Indian J. Genet. Plant Breed.* 2014;74(1):26-33.
- Shukla G.K. Some statistical aspects of partitioning genotype-environmental components of variability. *Heredity.* 1972;29:237-245. DOI 10.1038/hdy.1972.87.
- Solonechnyi P., Vasko N., Naumov O., Solonechnaya O., Vazhenina O., Bondareva O., Logvinenko Yu. GGE biplot analysis of genotype by environment interaction of spring barley varieties. *Zemdirbyste-Agriculture.* 2015;102(4):431-436. DOI 10.13080/z-a.2015.102.055.
- Tai G.C.C. Genotypic stability analysis and its application to potato regional traits. *Crop Sci.* 1971;11:184-190. DOI 10.2135/cropsci1971.0011183X001100020006x.
- Wricke G. Über eine methode zur erfassung der ökologischen streubreite in feldversuchen. *Z. Pflanzenzüchtg.* 1962;47:92-96.
- Yan W., Hunt L.A., Shen Q., Szlavnic Z. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Sci.* 2000;40:597-605. DOI 10.2135/cropsci2000.403597x.
- Yan W., Kang M.S., Ma B., Woods S., Cornelius P.L. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Sci.* 2007;47:641-653. DOI 10.2135/cropsci2006.06.0374.
- Yan W., Tinker N.A. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications. *Can. J. Plant. Sci.* 2006;86:623-645. DOI 10.4141/P05-169.

**ORCID ID**

V.N. Gudzenko orcid.org/0000-0002-9738-1203

**Conflict of interest.** The author declares no conflict of interest.

Received March 25, 2018. Revised June 19, 2018. Accepted December 25, 2018.