

УДК 635.656:631.527:575

ОЦЕНКА СЕЛЕКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ГОРОХА (*PISUM SATIVUM* L.) В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ РАСЧЕТОВ (РЕГРЕССИОННАЯ, АММИ, GGE BIPLLOT МОДЕЛИ)

А. А. ВАСИЛЕНКО, П. Н. СОЛОНЕЧНЫЙ, С. Г. ПОНУРЕНКО

Институт растениеводства им. В. Я. Юрьева НААН,
г. Харьков, Украина, 61060, e-mail: yuriev1908@gmail.com

(Поступила в редакцию 04.03.2019)

Основная цель исследования состояла в сравнении результатов оценки селекционного материала гороха посевного, полученных при разных системах расчетов взаимодействия «генотип-среда» (АММИ, GGE biplot, регрессионная модель). При сравнении результатов, полученных в представленных системах расчетов, установлено, что в каждой системе есть свои положительные свойства. Так, при расчете по регрессионной модели удобным является распределение образцов по типу реакции на условия среды, в АММИ модели ранжирование образцов по ASV и YSI дает оценку каждому образцу с учетом влияния на него компонентов взаимодействия. Но сумма рангов не является исчерпывающей характеристикой образца. В нашей выборке высокий ранг урожайности не соответствовал высокому уровню стабильности, и образцы с высоким уровнем стабильности не отличались высоким уровнем урожайности. Существенным преимуществом GGE biplot является визуализация результатов, при этом учитывается разделение взаимодействия генотип-среда на главные компоненты. Средняя урожайность и стабильность генотипа оценивается по проекции маркеров на соответствующие оси координат. Также система GGE biplot характеризует среду проведения исследований. Установлено, что среди испытываемых селекционных линий наиболее близким к «идеальному» был образец G22 – селекционная линия СЛ 11-105, с наивысшим значением показателя «урожайность». Результаты исследования показывают, что использование АММИ модели, GGI biplot и достаточно традиционных систем не исключают друг друга, а при совместном использовании дают более глубокий анализ полученных результатов и позволяют широко и разносторонне оценить селекционный материал, а также перспективность его использования в селекционной практике.

Ключевые слова: горох, урожайность, АММИ, GGE biplot, регрессионная модель, пластичность, стабильность.

The main objective of the study was to compare the results of evaluation of the breeding material of pea obtained using different systems of calculation of the interaction 'genotype-environment' (AMMI, GGE biplot, regression model). When comparing the results obtained in the presented calculation systems, it was established that each has its own positive properties. So, when calculating according to the regression model, it is convenient to distribute samples according to the type of response to environmental conditions; in the AMMI model, ranking of samples according to ASV and YSI gives an estimate for each sample, taking into account the influence of interaction components on it. But the sum of ranks is not an exhaustive characteristic of the sample. In our sample, a high yield rank did not correspond to a high level of stability, and samples with a high level of stability were not distinguished by a high level of yield. A significant advantage of GGE biplot is the visualization of the results, taking into account the separation of genotype-environment interaction into the main components. The average yield and stability of the genotype is estimated according to the projection of markers on the corresponding coordinate axes. Also, the GGE biplot system characterizes the research environment. It was established that among the tested breeding lines the closest to the "ideal" was sample G22 – the selection line SL 11-105, with the highest value of the indicator "yield". The results of the study show that the AMMI model, GGI biplot and fairly traditional systems do not exclude each other, and when used together, they provide a more in-depth analysis of the results and allow a wide and diversified assessment of the breeding material, as well as the future of its use in the breeding practice.

Key words: pea, yield, AMMI, GGE biplot, regression model, plasticity, stability.

Введение

Проблема оценки адаптивных свойств селекционного материала решается за счет опытов простой структуры, оценивающих взаимодействие генотип-среда (genotype-environment interaction (GEI)). Поскольку степень фенотипического проявления генотипа зависит от окружающей среды, проведение экологического сортоиспытания путем рассредоточения опытов как во времени, так и в пространстве является просто необходимым [1]. Такие многолетние данные по продуктивности образцов являются отображением влияния агроклиматических условий, а условия эти могут быть гораздо более контрастными и их влияние на урожай намного большим, нежели влияние на проявление признака зоны выращивания в классическом экологическом сортоиспытании [2]. Реакция на любой экологический фактор носит типичный криволинейный характер с расположенной ниже некоторого оптимума монотонностью при условии, что остальные факторы среды постоянны. Поэтому можно с уверенностью предполагать, что для установления взаимодействий между каким-то одним фактором и данным набором сортов достаточна элементарная линейная модель. Тем не менее дополнительные факторы изменчивы и, следовательно, нелинейность все-таки должна проявиться [3].

Методы S. A. Eberhart, W. A. Russel (1966) и G. C. Tai (1977) позволяют выявить три параметра продуктивности и средовой устойчивости: среднее значение генотипа, показатели линейной и нелинейной реакции на среду. Графический метод выделения продуктивных и стабильных генотипов, предложенный G. C. Tai (1977), делает затруднительным одновременный отбор по трем параметрам и ограничивает возможности использования этих методов в селекционных программах [4]. Преимущество наиболее распространенной методики S. A. Eberhart, W. A. Russel (1966), заключается в совместном анализе пластичности и стабильности как взаимодополняющих показателей [5]. Параметр экологической пластичности рассчитывается как коэффициент линейной регрессии значений признака на индекс условий среды, экологической стабильности – как варианса, т. е. сумма квадратов отклонений фактических значений признака от расчетных по уравнению регрессии. Принципиальный недостаток методики – отсутствие нормирующих критериев для классификации генотипов по исследуемым параметрам [6]. В работе Потанина В. Г. и др. проведено сравнение различных количественных методов расчета экологической пластичности сортов растений и представлены результаты оценки экологической пластичности с использованием показателей интенсивности и устойчивости индекса стабильности, предложенной Р. А. Удачным [7].

Модель AMMI (additive main effects and multiplicative interaction) и GGE (genotype (G) plus genotype-by-environment (GE) interaction) biplot анализ, базирующиеся на методе главных компонент, дают возможность более наглядно представить расположение исследуемых объектов в системе сред. Модель AMMI включает в себя анализ ANOVA (дисперсионный анализ) и метод главных компонент – PCA (principal component analysis) в совокупном применении [8]. При этом результаты, полученные в системах AMMI и GGE biplot, дополняют друг друга, хотя программы могут использоваться абсолютно обособленно. Целесообразность и преимущества использования AMMI и GGE biplot показаны на ячмене озимом и яровом [9, 10, 11, 12]. Исходя из вышеизложенного, основная цель исследования состояла в оценке генотипов гороха посевного при сравнении результатов, полученных в разных системах расчетов взаимодействия «генотип-среда».

Основная часть

Полевые опыты выполнены в 2013–2016 гг. в соответствии с методикой полевого эксперимента [13] в научном севообороте Института растениеводства (ИР) им. В. Я. Юрьева, который расположен в п. Элитное Харьковского района Харьковской области. Объектами исследования были 48 образцов гороха – 19 сортов различного эколого-географического происхождения, внесенные в разное время в Государственный реестр сортов растений, пригодных для распространения в Украине, и 29 селекционных линий гороха, созданных в лаборатории селекции гороха ИР им. В. Я. Юрьева. Все сорта и линии – гладкосемянные, безлисточкового типа, кроме листочковых сортов Интенсивный 92 и Харьковский янтарный. Погодные условия 2013–2016 гг. отличались неравномерным гидротермическим режимом, что полностью отражает особенности региона и позволяет объективно оценить селекционный материал. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили по А. И. Седловскому и др. с использованием штатных возможностей программ Microsoft [14]. Для оценки реакции сортов и селекционных линий гороха на изменение факторов окружающей среды мы использовали регрессионную модель на основе методики предложенной S. A. Eberhart, W. A. Russel, где коэффициент регрессии и был показателем взаимодействия генотип-среда [15]. Для оценки различий по генотипическому эффекту (ГЭ) и коэффициенту регрессии (КР) как степени изменения признака при изменении условий среды, введены ранги практической ценности.

Таблица 1. Ранги практической ценности

Ранги	ГЭ (ϵ_i)	КР (b_i)
1	$0+\gamma > \epsilon_i$	$1-\gamma > b_i$
2	$0-\gamma < \epsilon_i < 0+\gamma$	$1-\gamma < b_i < 1+\gamma$
3	$0-\gamma < \epsilon_i$	$1+\gamma < b_i$

Соответственно, первый ранг по ГЭ – образцы с наибольшим генотипическим потенциалом по исследуемому признаку, а третий – наименьшим. Для КР первый ранг это образцы с низким уровнем реакции на условия выращивания, третий – интенсивного типа, которые имеют высокую

степень изменчивости в зависимости от условий выращивания. Параллельно были проведены расчеты в системе AMMI и GGE biplot анализов. В опыте были установлены значимые эффекты влияния генотипа, среды и их взаимодействия (табл. 1).

Таблица 2. Дисперсионный анализ урожайности гороха

Источник дисперсии	df	SS		ms		Доля изменчивости, %
		1	2	1	2	
Общая	575	103,60	103,60	0,180	–	–
Генотип (G)	47	23,54	23,54	0,501	0,501	26,4
Среда (E)	3	42,93	42,93	14,31	14,310	48,1
Взаимодействие (GE)	141	22,73	22,73	0,161	0,161	25,5
IPCA 1	49	12,00	–	0,245	–	52,8
IPCA 2	47	6,68	–	0,142	–	29,4
IPCA 3	45	4,05	–	0,090	–	17,8
IPCA 4	43	0	–	0	–	0,0
Ошибка	376	13,61	14,40	0,036	0,038	–
Block	8	0,80	–	0,100	–	–

1 – AMMI, 2 – по [4]

Единственное отличие обнаружилось при анализе ошибки. Так, в расчете по А. В. Кильчевскому и др. [4], значение ошибки составило 14,40, а в расчетах AMMI модели – 13,61, но к этому значению необходимо добавить значение «Block», т. е. полное значение ошибки равно сумме «Error» и «Block» (13,61 + 0,80), т. е. – 14,41, тогда значения ошибки в системах расчета становятся тождественными.

Вклад среды в общую изменчивость составил практически половину – 48,1 %, генотип и взаимодействие «генотип-среда» внесли равные вклады – 26,4 % и 25,5 % соответственно.

Проведенные расчеты с использованием регрессионной модели показали, что 44 (91,6 %) образца были отнесены ко второму рангу по генотипическому эффекту с разным уровнем реакции на изменения экологических условий (табл. 3). Всего четыре образца (8,4 %) составили группу с низким генотипическим потенциалом. Исследуемые образцы были ранжированы в группы по уровню пластичности. Так, образцы группы 2/1 и 3/1 – гомеостатичного типа, с рангом 2/2 и 3/2 определены как образцы с адекватной реакцией, а 2/3 и 3/3 – могут считаться образцами интенсивного типа (с высоким откликом на изменение условий среды).

Таблица 3. Распределение образцов по ГЭ и КР

Генотипический эффект (ГЭ), ранги	Коэффициент регрессии (КР), ранги		
	1	2	3
1	–	–	–
2	37,5% (18 шт.)	22,9% (11 шт.)	31,2% (15 шт.)
3	4,2% (2 шт.)	2,1% (1 шт.)	2,1% (1 шт.)

В табл. 4 представлены образцы с максимальным и минимальным уровнем признака «урожайность» в своей группе.

Таблица 4. Урожайность образцов гороха и результаты оценки по ГЭ и КР

Образцы	Урожайность, т/га			ГЭ	Ранг	КР	Ранг
	max	min	средняя				
СЛ 11-105	2,90	1,60	2,24	0,330	2	0,895	1
Босфор	2,35	1,24	1,63	-0,284	2	0,853	1
СЛ 10-85	2,74	1,50	2,19	0,279	2	1,025	2
Зекон	2,14	1,16	1,74	-0,177	2	1,049	2
СЛ 10-24	2,68	1,28	2,15	0,233	2	1,251	3
Камелот	2,44	1,07	1,72	-0,195	2	1,227	3
Отаман	1,87	1,26	1,54	-0,370	3	0,233	1
Харьковский эталонный	1,99	0,94	1,38	-0,530	3	0,721	1
Гейзер	1,78	0,92	1,34	-0,578	3	0,970	2
Оплот	2,20	1,00	1,56	-0,350	3	1,427	3
Среднее	–	–	1,88	–	–	–	–
НСР ₀₅	–	–	0,09	0,345	–	0,054	–

В AMMI модели для ранжирования генотипов по стабильности урожая используют ASV (AMMI stability value). Сумма рангов ASV и урожайности (Y) составляет индекс стабильности урожайности (YSI – yield stability index), который комплексно оценивает генотип по этим двум признакам. В нашей выборке высокий ранг урожайности не

соответствовал высокому уровню стабильности, и образцы с высоким уровнем стабильности не отличались высоким уровнем урожайности.

При сравнении результатов, полученных по двум системам расчетов, установлено, что в каждой есть свои положительные свойства. Так, при расчете по Методическим рекомендациям по экологическому сортоиспытанию кукурузы [15], удобным является распределение образцов по типу реакции на условия среды, в АММИ модели ранжирование образцов по ASV и YSI дает оценку каждому образцу с учетом влияния на него компонентов взаимодействия. Но в обоих случаях сумма рангов не является исчерпывающей характеристикой образца. Так, у образцов с минимальной суммой рангов уровень урожайности (в среднем за годы исследований) был достаточно средним, но отличался высокой стабильностью.

Для более полного анализа результатов подобных исследований мы используем конкретные показатели (уровень продуктивности, урожайности и т. д.) и ранги, полученные по каждому признаку, а не сумму рангов для обобщающей характеристики образцов.

Существенным преимуществом GGE biplot является визуализация результатов, при этом учитывается разделение взаимодействия генотип-среда на главные компоненты. В нашем опыте, как показывают расчеты, базовые компоненты IPСА 1 (ось первого главного компонента) и IPСА 2 (ось второго главного компонента) совокупно дают 85,78 % общей изменчивости. Соответственно только они будут составлять систему осей biplot (рисунок).

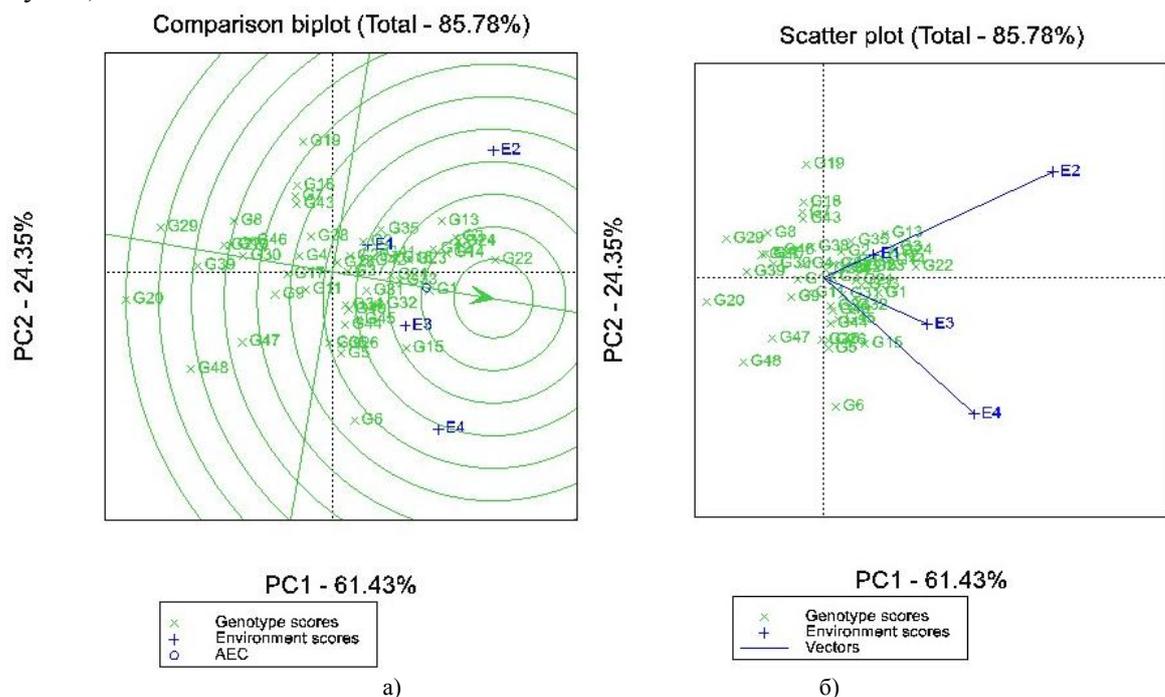


Рис. а) GGE biplot характеризующий стабильность и урожайность генотипов и ранжирование образцов по отношению к «идеальному» генотипу; б) GGE biplot, характеризующий информативность сред

Представленное распределение образцов в системе главных компонент показывает графическое распределение генотипов по уровню урожайности (горизонтальная ось) и уровню стабильности (вертикальная ось), а стрелка – положительный конец оси.

Средняя урожайность и стабильность генотипа оценивается по проекции маркеров на соответствующие оси координат. Так, наименее урожайным генотипом является G20 – Гейзер, а генотип G6 (СЛ 11-220) – с наибольшим уровнем варьирования признака (табл. 2–4). Наиболее близким к «идеальному» стал образец G22 – селекционная линия СЛ 11-105, у которой наивысшее значение показателя «урожайность» было в обеих системах расчета (табл. 2–3). Генотипы G1 (СЛ 11-25), G12 (СЛ 11-176), G14 (СЛ 10-24), G24 (СЛ 10-85) – приближены к «идеальному» так как расположены в следующем радиусе.

Также система GGE biplot характеризует среду проведения исследований [8, 17] (рис. б). Маркер среды E 1 (агрометеорологические условия 2013 г.) имеет небольшую длину вектора, т.е. крайне приближен к началу оси координат, что характеризует его как среду с малой информативностью для дифференциации образцов. Среды E 2 (2014 г.) и E 4 (2016 г.) длинновекторные, но углы к оси абсцисс достаточно велики, следовательно в таких условиях лучше проводить отбор на стабильность. Лучшей дифференцирующей средой (в нашем случае за годы проведения исследований) оказалась среда E 3 (2015 г.). Ее вектор имеет небольшой угол, достаточную длину и максимально приближен к точке АЕС – средней координат среды (рис. а, б). Следовательно, годы изучения образцов были достаточно разнообразными для получения объективной оценки, как потенциала продуктивности, так и адаптивных свойств.

Заключение

Использование АММИ модели, GGI biplot и достаточно традиционных систем расчета не исключают друг друга, а при совместном использовании дают более глубокий анализ полученных результатов и позволяют широко и разносторонне оценить селекционный материал, а также перспективность его использования в селекционной практике. Положительным моментом в системе расчетов GGI biplot есть то, что представляется возможным провести характеристику сред проведения исследований и их информативность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литун, П. П. Пластичность генотипов в экологических опытах простой структуры / Селекция и семеноводство // П. П. Литун, М. В. Шевченко, Г. М. Субота. – Киев: Урожай. – 1982. – вып. № 50. – С. 11–15.
2. Гудзь, Ю. В. Теория и практика адаптивной селекции кукурузы: монография / Ю. В. Гудзь, Ю. А. Лавриненко. – Херсон: Борисфен-полиграфсервис, 1997. – 168 с.
3. Майо, О. Теоретические основы селекции растений / О. Майо; пер. с англ. В. В. Иноземцева, А. А. Наумова; под ред. и предисл. Ю. Л. Гужова. – М.: Колос, 1984. – 295 с.
4. Кильчевский, А. В. Генотип и среда в селекции растений / А. В. Кильчевский, Л. В. Хотылева. – Минск: Наука и техника, 1989. – 191 с.
5. Пакудин, В. З. Оценка экологической пластичности и стабильности сортов сельскохозяйственных культур / В. З. Пакудин, Л. М. Лопатина // Сельскохозяйственная биология. – 1984. – № 4. – С. 109–113.
6. Кравченко, Р. В. Агробиологическое обоснование получения стабильных урожаев зерна кукурузы в условиях степной зоны Центрального Предкавказья : монография / Р. В. Кравченко. – Ставрополь, 2010. – 208 с.
7. Потанин, В. Г. Новый подход к оценке экологической пластичности сортов растений / В. Г. Потанин, А. Ф. Алейников, П. И. Степочкин // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2014. – Том 18 – №3. – С. 552–578
8. Yan W., Kang M.S., Ma B., Woods S., Cornelius P.L. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype – by- environment data. *Crop Science*. – 2007. – 47. – P. 643–655.
9. Гудзенко, В. Н. Использование АММИ и GGE biplot моделей для оценки селекционных линий ячменя озимого в лесостепи Украины / В. Н. Гудзенко, С. П. Васильковский, А. А. Демидов // Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-ammi-i-gge-biplot-modeley>.
10. Гудзенко, В. М. Графічний аналіз адаптивності селекційних ліній ячменю ярого в Центральному лісостепу України. Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин / В. М. Гудзенко, О. А. Демидов, С. П. Васильківський, С. С. Коляденко. – 2017. – Т. 13, № 1 – С. 20–27. URL: <https://journals.sops.gov.ua/article/viewfiles/972333/93208>.
11. Солонечный, П. М. GGE biplot аналіз взаємодії генотип-середовище сортів ячменю ярого / П. М. Солонечный, М. Р. Козаченко, Н. І. Васько, О. Г. Наумов, О. Э. Важеніна, О. В. Солонечна, П. П. Дмитренко, О. Л. Коваленко // Селекція і насінництво. – 2014. Вип. 106. – С 93–102.
12. Солонечный, П. Н. АММИ и GGE biplot анализ взаимодействия генотип–среда линий ячменя ярвого / П. Н. Солонечный / Режим доступа: <https://doi.org/10.18699/vj17.283>.
13. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – М: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
14. Седловский, А. И. Генетико-статистические подходы к теории селекции самоопыляющихся культур А. И. Седловский, С. П. Мартынов, Л. К. Мамонов. – Алма-Ата, 1982. – 198 с.
15. Методические рекомендации по экологическому сортоиспытанию кукурузы. – Харьков: УкрНИИРСиГ, 1981. – 31 с.
16. Fan X. M., Kang M. S., Chen H., Zhang Y., Tan J., Xu C. Yield stability of maize hybrids evaluated in multi-environment trials in Yunnan, China. *Agronomy Journal*. – 2007. – 99. – P. 220–228.