

Генетика и селекция

УДК 635.656:631.52:575.167

doi: 10.15389/agrobiology.2022.5.965rus

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГЕНОТИП—СРЕДА И СТАБИЛЬНОСТЬ
КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ У САДОВОГО ГОРОХА
(*Pisum sativum* L.)***S. KALAPCHIEVA¹, V. KOSEV², V. VASILEVA³ 

Горох относится к наиболее распространенным и широко культивируемым однолетним бобовым растениям. Большинство современных сортов гороха обладают высоким потенциалом продуктивности, реализация которого ограничена их низкой гомеостатичностью и чувствительностью к абиотическому стрессу, у создаваемых сортов наблюдается тенденция к снижению адаптивности. Одна из основных задач современной селекции гороха — получение оптимального генотипа, способного реализовать биологический потенциал и адекватно реагировать на изменения условий выращивания. Поэтому проведение экологических испытаний остается реальной необходимостью. В настоящем сообщении впервые представлены результаты изучения способности формировать хозяйственно значимые количественные признаки у селекционных образцов рабочей коллекции гороха (Maritsa Vegetable Crop Research Institute, Пловдив, Болгария). Выявлены три статистически значимых источника изменчивости (генотип, окружающая среда и взаимодействие генотип—среда) общего числа стручков, числа продуктивных узлов с двумя стручками на растение, массы стручков и массы зерна. В 2018–2020 годах мы оценили фенотипическую стабильность 10 генотипов гороха (*Pisum sativum* L.), в том числе 4 перспективные линии (22/16-af, 22/16-n, B4/34-n и 1/17-n) и 6 сортов (Kazino-af, Plovdiv-n, Marsi-n, Echo-af, Shugar dwarf-n и Vecherniza-n), по основным количественным признакам (число стручков на растение, число продуктивных узлов с одним стручком на растение, число продуктивных узлов с двумя стручками на растение, длина стручка, ширина стручка, масса стручков с растения, масса зерен с растения). Влияние всех факторов вариации на число стручков на растение, число продуктивных узлов с двумя стручками на растение, массу стручков с растения, массу зерен с растения оказалось статистически значимым. Самым сильным было влияние фактора «окружающая среда» на число стручков на растение (52,20 %) и число продуктивных узлов с 2 стручками на растение (59,00 %). Генотип обуславливал наибольшую долю общей изменчивости массы стручков с растения (64,10 %) и массы зерен с растения (67,40 %). Поэтому эффективный отбор по этим признакам может вестись независимо от условий среды. По числу стручков на растение и длине стручка требуются более длительные испытания для получения объективной оценки из-за превышения дисперсии этих показателей для взаимодействия генотип—среда над дисперсией для генотипа. Для каждого признака мы рассчитывали несколько параметров стабильности. Сорта Marsi-n и Echo-af были идентифицированы как наиболее ценные генотипы по числу стручков на растение. Kazino-af, 1/17-ob и Plovdiv-n проявляют высокую изменчивость и имеют меньшее число стручков на растение. По массе стручков генотипы показали высокую экологическую пластичность, особенно сорт Plovdiv-n ($b_i = 2,68$), 1/17-ob ($b_i = 2,63$) и сорт Marsi-n ($b_i = 2,18$), которые имеют более высокую массу стручка; сорт Echo-af наиболее стабилен ($b_i = 1,39$; $S_i^2 = 1,91$). По массе зерна с растения высокопродуктивными были сорта и образцы Marsi-n ($b_i = 3,08$), 1/17-ob ($b_i = 2,62$) и Plovdiv-n ($b_i = 4,02$), но они же оказались и самыми изменчивыми. 10-Vecherniza-n и 22/16-af проявляют значительную стабильность, но малоурожайны.

Ключевые слова: фенотипическая стабильность, фактор влияния, генотип, среда, урожайность, стабильность, экологическая пластичность.

Горох относится к наиболее распространенным и широко культивируемым однолетним бобовым растениям и по масштабам мирового производства занимает второе место после бобов. Бобовые — чуть ли не единственный источник растительного белка, причем в горохе его содержание составляет около 23–25 % от сухой массы семян (1).

Адаптивные свойства селекционного материала обычно оцениваются экспериментально по результатам изучения взаимодействия генотипа и окружающей среды. Поскольку степень фенотипического проявления генотипа зависит от среды развития организма, проведение экологических испытаний в разное время и при разной локализации участков тестирования остается реальной необходимостью. Такие данные о продуктивности

* Исследование финансировалось Национальным научным фондом Болгарии (грант КП-06-H26/12).

образцов отражают влияние агроклиматических условий. Эти условия гораздо более контрастны, а их воздействие на продуктивность способно проявиться в на много большей степени, чем при классическом сортоиспытании (2).

Сортовой потенциал сельскохозяйственных культур — один из основных факторов эффективного растениеводства. Большинство современных сортов гороха обладают высоким потенциалом продуктивности, реализация которого ограничена их низкой гомеостатичностью и чувствительностью к абиотическому стрессу (3). У этих сортов при биотическом и абиотическом стрессе (сильная засуха, чрезмерная влажность, ущерб от вредителей и болезней) формируемая масса семян на 55–72 % меньше, чем при благоприятных условиях. У создаваемых сортов наблюдается тенденция к снижению способности адаптироваться к факторам окружающей среды, что может стать основной причиной снижения урожайности культуры (4–6). В связи с этим одна из основных задач современной селекции гороха — получение оптимального генотипа, способного реализовать свой биологический потенциал и в то же время адекватно реагировать на изменения условий выращивания (7). Термины пластичность и стабильность используются для характеристики потенциала модификации и генотипической изменчивости индивидуальных признаков и видов растений. Пластичность, отражающая способность к изменчивости признаков при разных условиях среды, а также стабильность, считаются основными адаптивными свойствами живых организмов (8). Экологическая пластичность генотипа заключается в способности стабильно формировать высокое значение генетически детерминированного изучаемого признака на обширной территории при достаточно разнообразных метеорологических условиях (9). При оценке сортов культурных растений на пластичность и стабильность проявления признака среди ученых нет единого мнения. Некоторые считают, что генотипы со средней пластичностью и высоким средним показателем формируемого признака в различных условиях окружающей среды должны оцениваться как лучшие (10). Другие полагают, что наиболее перспективны наиболее адаптивные генотипы, которые имеют минимальное взаимодействие с окружающей средой и высокую устойчивость признака. Третья точка зрения заключается в том, что оптимальный сорт должен обладать высоким общим адаптационным потенциалом, обеспечивающим максимальную урожайность как в благоприятных, так и в неблагоприятных условиях (11, 12).

В настоящем сообщении впервые представлены результаты изучения способности формировать хозяйственно значимые количественные признаки у селекционных образцов рабочей коллекции гороха (Maritsa Vegetable Crop Research Institute, Пловдив, Болгария). Выявлены три статистически значимых источника изменчивости (генотип, окружающая среда и взаимодействие генотип—среда) для общего числа стручков, числа продуктивных узлов с 2 стручками на растение, массы стручков и массы зерен с растения.

Целью нашей работы была оценка фенотипической стабильности количественных признаков, связанных с продуктивностью, у генотипов гороха с применением различных методов анализа.

Методика. Исследование проводили в течение двух последовательных сезонов вегетации в 2018–2020 годах в Maritsa Vegetable Crop Research Institute (Пловдив, Болгария) на 10 генотипах садового гороха из рабочей коллекции института. У трех (линии 22/16-af, Kazino-af и Echo-af) листья преобразованы в усы (безлистный тип афила), в то время как остальные семь (линия 1-22/16-n, Plovdiv-n, Marsy-n, Shugar dwarf-n, line B4/34-n, line 1/17-n и Vecherniza-n) — нормальный тип листьев. Линии 22/16-n и 22/16-

af представляли собой поколение F₁₀ кросса сортов Plovdiv × Kazino, Plovdiv-n, Marsy-n, line 1/17-n и Vecherniza-n были выведены в Maritsa Vegetable Crop Research Institute (Пловдив, Болгария), сорта Kazino-af, Echo-af, Shugar dwarf-n и линия B4/34-n — получены через безличинный обмен из Institute of Plant Genetic Resources (Садово, Болгария).

Семена высевали в полевых условиях во второй половине марта по схеме 80 + 20 + 40 + 20/4-5 см (четырёхрядная высокая плоская грядки шириной 160 см). Семена высаживали в две пары двойных рядов на расстоянии 40 см друг от друга. Расстояние между семенами в ряду составляло 4-5 см (по 20 семян на 1 м), расстояние между рядами в паре — 20 см. Схема размещения представляла собой рандомизированную полную блочную конструкцию с тремя репликами. Размер участка составил 1,6×4,0 м.

Учитывали число стручков на растение (NPP), число продуктивных узлов с 1 стручком на растение (NFN-1), число продуктивных узлов с 2 стручками на растение (NFN-2), длину стручка (PL, см), ширину стручка (PW, см), массу стручков с растения (WPP, г), массу зерен с растения (WGP, г).

Данные обрабатывали методом двухфакторного дисперсионного анализа (two-way ANOVA) по каждому признаку для оценки влияния генотипа (G), среды (E) и взаимодействия генотип—среда (G×E). Экологическую стабильность определяли методами регрессионного анализа по S.A. Eberhart и W.A. Russel (10) и G.C.C. Tai (13), рассчитывали коэффициент регрессии (b_i, a_i) и дисперсию регрессионных отклонений (Sd²_i, λ_i), параметр генотипической стабильности W.D. Hanson (D_i) (14), использующий минимальный наклон линии регрессии по методу K.W. Finley и G.N. Wilkinson (12), для анализа дисперсии рассчитывали среднюю дисперсионную составляющую (θ_i) по R.I. Plaisted и L.C. Peterson (15), эквалентность (W₂) определяли по G. Wricke (16). Также применяли метод P. Annicchiarico (17), который предлагает индекс надежности (W_i), оценивающий вероятность того, что показатели генотипа (разновидности) будут ниже, чем в среднем для условий среды, или ниже, чем у любого используемого стандарта. При непараметрическом анализе применяли показатель P_i по модели C.S. Lin и M.R. Binns (18) и ранжирование (R) образцов по адаптивности (A) по методам M. Nascimento с соавт. (19) и M. Huehn (20, 21). Была создана модель биплота GGE, в которой используется разложение сингулярного значения первых двух основных компонентов (22). Все экспериментальные данные подвергались статистической обработке (программа GENES 2009.7.0 для Windows XP) согласно описанию (23). Представлены средние (*M*) и стандартные отклонения (±SD). Различия между средними оценивали по *t*-критерию Стьюдента и считали статистически значимыми при *p* < 0,05.

Результаты. Описание отобранных для изучения генотипов гороха приведено в таблице 1.

Результаты агрометеорологических наблюдений за время исследования представлены данными о среднесуточной температуре воздуха и количестве осадков (табл. 2). Среднее количество осадков характеризовалось выраженным максимумом в апреле 2020 года (76,0 л/м²) и особенно в III декаде июня 2018 года, а также в I декаде июня 2019 года (соответственно 125 и 108 л/м²). Среднесуточная температура в марте, апреле, мае и июне колебалась от 4,6 до 24,8 °С. Самую низкую температуру воздуха зарегистрировали в марте 2018 года и в апреле и мае 2020 года. Май характеризовался пониженными температурами в 2019 и 2020 годах, когда наблюдались более резкие отклонения, в то время как в 2018 году они были близки к средним.

1. Основные характеристики тестируемых селекционных образцов гороха (*Pisum sativum* L.) ($M \pm SD$, Maritsa Vegetable Crop Research Institute, Пловдив, Болгария, 2018-2020 годы)

Генотип	NPP	NFN-1	NFN-2	PL	PW	WPP	WGP
22/16-ob	11,59±1,30 ^{ab}	2,45±0,55 ^{ab}	4,56±0,43 ^{bc}	7,30±0,19 ^{de}	1,17±0,21 ^{bc}	36,66±0,70 ^a	14,23±0,97 ^a
22/16-af	10,00±1,12 ^{ab}	2,92±0,66 ^{ab}	3,61±0,51 ^{ab}	6,69±0,22 ^{bc}	1,01±0,25 ^a	26,23±0,84 ^a	10,36±0,97 ^a
Kazino-af	11,00±1,23 ^{ab}	2,79±0,6 ^{ab}	4,24±0,49 ^{abc}	6,56±0,21 ^{bc}	1,03±0,24 ^{ab}	30,89±0,80 ^a	12,72±0,93 ^a
Plovdiv-n	10,93±1,23 ^{ab}	3,62±0,82 ^b	3,65±0,64 ^{ab}	6,053±0,27 ^a	1,03±0,31 ^{ab}	32,20±1,04 ^a	15,32±1,20 ^a
Echo-af	12,00±1,35 ^{ab}	2,24±0,51 ^a	4,94±0,39 ^{bc}	6,09±0,17 ^{ab}	0,93±0,19 ^a	25,10±0,64 ^a	12,33±0,74 ^a
Marsy-n	13,69±1,54 ^b	2,95±0,67 ^{ab}	5,40±0,52 ^c	7,78±0,22 ^e	1,05±0,25 ^{ab}	56,48±0,85 ^b	26,27±0,98 ^b
Shugar dwarf-n	12,00±1,35 ^{ab}	3,62±0,82 ^b	4,42±0,64 ^{abc}	6,66±0,27 ^{abc}	1,22±0,31 ^c	31,49±1,04 ^a	13,14±1,20 ^a
B4-34-n	12,00±1,35 ^{ab}	2,59±0,59 ^{ab}	4,67±0,46 ^{bc}	6,88±0,20 ^{cd}	1,17±0,22 ^{bc}	30,59±0,74 ^a	10,60±0,86 ^a
1/17-ob	11,00±1,23 ^{ab}	1,78±0,40 ^a	3,01±0,31 ^a	6,74±0,13 ^d	1,05±0,15 ^{ab}	30,64±0,51 ^a	14,83±0,59 ^a
Vechnitza-n	9,00±1,01 ^a	2,05±0,46 ^a	3,55±0,36 ^{ab}	6,61±0,16 ^{abc}	0,97±0,17 ^a	23,66±0,59 ^a	10,53±0,68 ^a
Среднее±SD	11,32±1,27	2,70±0,61	4,20±0,74	6,74±0,51	1,06±0,09	32,39±9,28	14,03±4,66

Примечание. NPP — число стручков на растение, NFN-1 — число продуктивных узлов с 1 стручком на растение, NFN-2 — число продуктивных узлов с 2 стручками на растение, PL — длина стручка, PW — ширина стручка, WPP — масса стручков с растения, WGP — масса зерен с растения.

^{abcd} Разные буквы означают статистически значимые различия при $p < 0,05$.

2. Метеоусловия в течение вегетационных периода по годам исследования (Maritsa Vegetable Crop Research Institute, Пловдив, Болгария)

Декада/10-суточный период/месяц	Температура, °C			Количество осадков, л/м ²		
	2018	2019	2020	2018	2019	2020
I/1-10/03	4,62	11,48	10,02	8,00	1,00	21,00
II/11-20/03	10,71	11,49	9,57	15,00	8,00	21,00
III/21-30/03	6,75	10,53	8,22	42,00	0,00	61,00
I/1-10/04	14,04	10,89	7,88	18,00	45,00	76,00
II/11-20/04	16,05	11,86	13,97	2,00	35,00	16,00
III/21-30/04	18,32	14,67	12,75	1,00	8,00	25,00
I/1-10/05	18,92	15,26	15,54	2,00	2,00	14,00
II/11-20/05	19,64	17,71	21,97	9,00	9,00	0,00
III/21-30/05	19,35	20,99	15,66	21,00	59,00	24,00
I/1-10/06	23,80	20,86	20,02	3,00	108,00	15,00
II/11-20/06	24,10	24,83	21,04	10,00	11,00	34,00
III/21-30/06	21,00	24,03	23,29	125,00	41,00	2,00

В 2020 году сочетание среднесуточной температуры воздуха и количества осадков было благоприятным для развития растений.

3. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа 10 изученных селекционных образцов гороха (*Pisum sativum* L.) (Maritsa Vegetable Crop Research Institute, Пловдив, Болгария, 2018-2020 годы)

Источник вариаций	df	Средний квадрат (MS)						
		NPP	NFN-1	NFN-2	PL	PW	WPP	WGP
Среда (E)	2	33,3969***	14,3263***	13,3668**	1,9813	0,2212	241,9320***	43,0120***
Генотип (G)	9	13,3116***	3,3788*	4,8911**	2,379*	0,0786	775,2542***	195,0155***
G×E	18	17,2714***	1,6588	4,39401*	6,8851	0,3845	192,5514***	51,3245***
E/G	20	18,884***	2,9256*	3,5337	0,5424	0,0413	197,4895***	50,4933***
E/G-1	2	6,3693*	2,2789	7,8776*	0,6962	0,0728	167,8477***	58,0156***
E/G-2	2	14,3731***	0,9139	6,365	1,8486	0,0152	73,3264***	5,7927**
E/G-3	2	43,9108***	0,5971	1,73642**	0,0648	0,0386	315,4953***	48,1701***
E/G-4	2	47,0667***	3,5308	1,44234**	2,1878	0,0294	550,1775***	192,2619***
E/G-5	2	3,6688*	5,7229	8,5688*	0,0338	0,0224	50,2644***	22,8852***
E/G-6	2	3,0963	3,4624	3,7374	2,2838	0,1226	118,9497***	56,0016***
E/G-7	2	6,1129*	2,0293	2,0486	2,8334	0,1568	221,9331***	49,0267***
E/G-8	2	10,9084***	3,1261	4,2422	0,2178	0,3042	160,1757***	33,3229***
E/G-9	2	50,1025***	3,7525	5,1368	0,5432	0,0234	237,2773***	33,8647***
E/G-10	2	3,2311	3,8416	0,9098	0,1382	0,0416	79,4469***	5,5911**
Остаток	29							

Примечание. G-1 — 22/16-ob, G-2 — 22/16-af, G-3 — Kazino-af, G-4 — Plovdiv-n, G-5 — Echo-af, G-6 — Marsy-n, G-7 — Shugar dwarf-n, G-8 — B4-34-n, G-9 — 1/17-ob, G-10 — Vechnitza-n; NPP — число стручков на растение, NFN-1 — число продуктивных узлов с 1 стручком на растение, NFN-2 — число продуктивных узлов с 2 стручками на растение, PL — длина стручка, PW — ширина стручка, WPP — масса стручков с растения, WGP — масса зерен с растения.

*, **, *** Влияние фактора статистически значимо соответственно при $p = 0,1$; $p = 0,05$ и $p = 0,01$.

ANOVA. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа (табл. 3) показывают значительные различия между образцами гороха практически по всем признакам, кроме ширины стручков (PW). Следовательно, по этому признаку генотипические различия незначительны. Влияние окружающей среды оказалось достоверно для общего числа стручков, числа продуктивных узлов с 1 стручком на растение, числа продуктивных узлов с 2 стручками на растение, массы стручка и массы зерен с растения.

Вклад каждого источника изменчивости в общую изменчивость признака определяли по значениям суммы квадратов SS. На общее число стручков и число продуктивных узлов с 2 стручками на растение влияет в основном среда (соответственно 52,20 и 59,00 %), тогда как эффект генотипа и взаимодействия генотип—среда значительно слабее (рис. 1). Наибольшая доля в общей изменчивости массы стручков (64,10 %) и массы зерен (67,40 %) обусловлена генотипом (его влияние в несколько раз сильнее по сравнению с двумя другими факторами). Поэтому эффективную селекцию по этим признакам можно проводить вне зависимости от условий окружающей среды. Суммарная вариация общего числа стручков и длины стручка (PL) вследствие взаимодействия генотип—среда больше обусловлена генотипом, при этом следует учитывать, что для второго показателя эффект G×E статистически не значим. Такой результат показывает, что для установления экологической стабильности по этим признакам необходимы углубленные и более продолжительные исследования. Статистически значимое влияние всех трех факторов на общее число стручков, число продуктивных узлов с 2 стручками на растение, массу стручков и массу зерен является обязательным условием для определения стабильности этих признаков в период исследования.

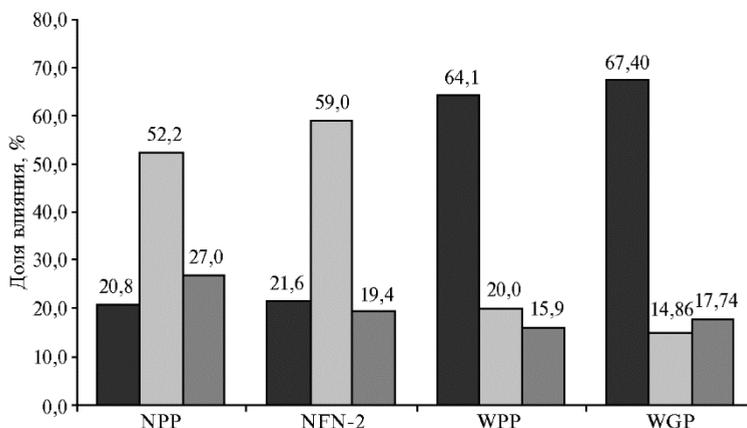


Рис. 1. Доля влияния генотипа (■), среды (■) и взаимодействия этих факторов (■) на суммарную изменчивость изучаемых признаков у 10 селекционных образцов гороха (*Pisum sativum* L.): NPP — число стручков на растение, NFN-1 — число продуктивных узлов с 1 стручком на растение, NFN-2 — число продуктивных узлов с 2 стручками на растение, WPP — масса стручков с растения, WGP — масса зерен с растения (Maritsa Vegetable Crop Research Institute, Пловдив, Болгария, 2018–2020 годы). Список образцов см. в разделе «Методика».

Параметры стабильности. Показатели, характеризующие экологическую пластичность и стабильность по S.A. Eberhart и W.A. Russel (10) и G.C.C. Tai (13), позволяют оценить приспособляемость образцов к конкретным условиям среды произрастания. Пластичность генотипов рассчитывается по коэффициентам соответственно b_i и a_i , стабильность — по коэффициентам S_i^2 и λ_i .

4. Показатели фенотипической стабильности основных признаков продуктивности у изученных селекционных образцов гороха (*Pisum sativum* L.) по результатам регрессионного анализа (Maritsa Vegetable Crop Research Institute, Пловдив, Болгария, 2018-2020 годы)

Образец	S.A. Eberhart и W.A. Russel (10)		G.C.C. Tai (13)		S.A. Eberhart и W.A. Russel (10)		G.C.C. Tai (13)		S.A. Eberhart и W.A. Russel (10)		G.C.C. Tai (13)		S.A. Eberhart и W.A. Russel (10)		G.C.C. Tai (13)	
	b _i	S _i ²	a _i	λ _i	b _i	S _i ²	a _i	λ _i	b _i	S _i ²	a _i	λ _i	b _i	S _i ²	a _i	λ _i
	NPP				NFN-2				WPP				WGP			
22/16-ob	1,25	0,44	1,26	1,28	1,64	-0,10	1,69	0,33	0,61	105,52**	0,61	176,41	0,46	37,72***	0,45	63,40
22/16-af	2,068	0,27	2,10	-0,03	1,47	-0,13	1,50	0,32	1,61*	6,51**	1,61	11,38	1,03	0,49	1,03	1,37
Kazino-af	1,13	26,10**	1,13	44,06	0,74	4,96**	0,72	8,82	1,82**	156,14**	1,83	260,73	1,40	26,16***	1,41	44,14
Plovdiv-n	2,96***	11,44**	3,03	19,19	2,05	0,71	2,14	1,61	2,68**	250,25**	2,69	417,33	4,02***	81,33***	4,10	135,07
Echo-af	0,52	1,52*	0,50	3,06	1,32	0,96	1,35	2,14	1,39	1,91*	1,39	3,73	1,23	10,58***	1,24	18,19
Marsy-n	0,17	1,66*	0,15	3,25	0,96	0,09	0,96	0,71	2,18**	1,76*	2,19	3,34	3,08***	9,69***	3,14	16,21
Shugar dwarf-n	-1,02	1,43*	-1,08	2,48	-0,84	-0,28	-0,99	-0,32	-1,29**	120,61**	-1,30	200,99	-2,49***	14,47***	-2,58	23,28
B4-34-n	0,40	6,58**	0,38	11,49	0,88	0,39	0,87	1,21	-2,44**	9,98**	-2,46	15,87	-2,45***	4,62**	-2,54	6,91
1/17-ob	2,51	19,05**	2,55	32,06	1,35	-0,25	1,38	0,12	2,63**	46,06**	2,64	77,04	2,62**	2,41**	2,67	4,28
Vechernitza-n	0,01	1,82*	-0,02	3,48	0,42	-0,19	0,38	0,20	0,79	42,58**	0,79	71,52	1,08	0,02	1,09	0,59

Примечание. NPP — число стручков на растение, NFN-1 — число продуктивных узлов с 1 стручком на растение, NFN-2 — число продуктивных узлов с 2 стручками на растение, PL — длина стручка, PW — ширина стручка, WPP — масса стручков с растения, WGP — масса зерен с растения.

*, ** Коэффициенты статистически значимы соответственно при p = 0,05 и p = 0,01.

5. Показатели фенотипической стабильности основных признаков продуктивности у изученных селекционных образцов гороха (*Pisum sativum* L.) по результатам дисперсионного анализа (Maritsa Vegetable Crop Research Institute, Пловдив, Болгария, 2018-2020 годы)

Образец	R.I. Plaisted и L.C. Peterson (15)	G. Wricke (16)	P. Annic- chiarico (17)	R.I. Plaisted и L.C. Peterson (15)	G. Wricke (16)	P. Annic- chiarico (17)	R.I. Plaisted и L.C. Peterson (15)	G. Wricke (16)	P. Annic- chiarico (17)	R.I. Plaisted и L.C. Peterson (15)	G. Wricke (16)	P. Annic- chiarico (17)
	PP	W ²	W _i									
	NPP			NFN-2			WPP			WGP		
22/16-ob	2,80	2,73	97,85	0,24	1,78	99,45	61,84	324,86	98,72	19,02	116,66	81,39
22/16-af	3,27	7,80	80,63	0,18	1,20	75,83	35,35	38,81	74,40	8,45	2,47	70,22
Kazino-af	9,90	79,42	78,41	1,56	16,07	77,17	78,29	502,56	76,65	15,71	80,86	73,38
Plovdiv-n	8,21	61,18	76,09	0,64	6,11	67,37	114,07	888,99	73,53	38,21	323,84	73,52
Echo-af	3,21	7,13	100,43	0,46	4,16	105,03	33,07	14,18	72,81	11,30	33,21	76,72
Marsy-n	3,52	10,58	111,79	0,19	1,27	120,89	38,66	74,56	170,71	14,47	67,51	173,84
Shugar dwarf-n	5,56	32,51	93,14	0,93	9,22	85,76	88,93	617,48	77,17	22,07	149,62	71,21
B4-34-n	4,69	23,20	94,28	0,28	2,22	102,07	87,81	605,40	74,72	19,10	117,45	56,30
1/17-ob	9,34	73,38	70,46	0,13	0,58	62,26	56,59	268,17	79,66	11,10	31,09	93,85
Vechernitza-n	3,75	12,96	74,94	0,20	1,31	78,71	43,88	130,90	63,76	8,33	1,13	72,07

П р и м е ч а н и е. NPP — число стручков на растение, NFN-2 — число продуктивных узлов с 2 стручками на растение, WPP — масса стручков с растения, WGP — масса зерен с растения.

В исследуемой коллекции образцов гороха сорт Marsy-n формирует наибольшее число стручков на одно растение — примерно 13-14 (см. табл. 1). Пластичность сорта Plovdiv-n по числу стручков трудно интерпретировать по методу S.A. Eberhart и W.A. Russel (10) и G.C.C. Tai (13), исходя только из коэффициента регрессии ($b_i = 2,96$) (табл. 4). Низкие значения параметра S_i^2 для Shugar dwarf-n, Echo-af и Marsy-n характеризуют их как экологически стабильные. Сорта Vechernitza-n ($S_i^2 = 1,82$), Kazino-af, Plovdiv-n и линию 1/17-ob, у которых число стручков на растение ниже среднего по тестируемой группе, можно отнести к высоковариабельным и нестабильным генотипам. Большинство параметров, рассчитываемых при дисперсионном анализе, таких как PP (15) и W^2 (16), определяют 22/16-ob как генотип с самой высокой экологической стабильностью по числу стручков, за которым следует Echo-af (табл. 5).

То же отмечали для параметров, рассчитанных методом регрессионного анализа для числа продуктивных узлов с 2 стручками на растение (см. табл. 4). Поэтому представление о стабильности этого признака можно получить, используя другие методические подходы. Например, по R.I. Plaisted и L.C. Peterson (15) и G. Wricke (16), по стабильности следует отдать предпочтение линии 1/17-ob ($PP = 0,13$; $W^2 = 0,58$), которая образует ничтожно малое число продуктивных узлов с 2 стручками на растение, в то время как индекс G. Annicchiarico (17) самый высокий у 22/16-ob ($W_i = 99,45$), Echo-af ($W_i = 105,03$) и B4-34 ($W_i = 102,07$) (см. табл. 5). Последние из приведенных значений оценки экологической стабильности изученного признака подтверждают приблизительный вывод, который следует из модели S.A. Eberhart и W.A. Russel (10). В большинстве случаев коэффициенты b_i в линейной регрессии положительны, но они могут принимать и отрицательные значения из-за разных причин (таких как поражение болезнями и вредителями, значительное полегание растений), что снижает коэффициенты и искажает результаты оценки. У сорта Shugar dwarf-n такое отмечали по всем четырем признакам, по которым оценивали экологическую стабильность.

В отношении массы стручков для большинства изученных образцов выявлена высокая отзывчивость на условия выращивания (см. табл. 4). Можно ожидать, что при благоприятных условиях эти растения будут давать стручки с высокой массой. Образцы Plovdiv-n ($b_i = 2,68$), 1/17-ob ($b_i = 2,63$) и Marsy-n ($b_i = 2,18$), которые характеризовались как наиболее пластичные, формировали самые тяжелые стручки (56,48 г, см. табл. 1), статистически значимо отличаясь от остальных образцов. По величине S_i^2 Echo-af, Marsy-n и 22/16-af ранжируются как относительно более стабильные по этому признаку, чем другие образцы.

В тестируемой коллекции образцов гороха согласно критериям, представленным в таблице 5, наименьшая вариабельность характерна для безлистных образцов (линия 22/16-af и сорт Echo-af). Параметр W_i (17) оценивает сорт Marsy-n, у которого стручки имеют большую массу по сравнению с другими генотипами, как наиболее нестабильный ($W_i = 170,71$). Этот сорт представляет интерес для селекции.

Примечательно, что образцы 1/17-ob, Marsy-n и Plovdiv-n с высокой продуктивностью семян с растения характеризовались по этому признаку как наиболее вариабельные (соответственно $b_i = 2,62$; $b_i = 3,08$ и $b_i = 4,02$) (см. табл. 4). Можно предположить, что сорт Vechernitza-n и линия 22/16-af по стабильности и отзывчивости приближаются к идеальному генотипу с b_i , близким к единице, и с меньшей дисперсией отклонений регрессионного

уравнения. Но у указанных образцов это нельзя рассматривать как преимущество, потому что они занимают последние позиции по массе зерен с растения. Оценки их стабильности и пластичности статистически незначимы, следовательно, реакция этих образцов на изменения окружающей среды непредсказуема. Параметры стабильности PP и W^2 (см. табл. 5) показали, что у сортов Plovdiv-n и Shugar dwarf-n масса зерен очень чувствительна к изменениям условий среды. Эти индексы, а также W_i дают однозначную оценку стабильности образцов 22/16-af и Vechernitza-n.

б. Оценка фенотипической стабильности основных признаков продуктивности у изученных селекционных образцов гороха (*Pisum sativum* L.) по непараметрическим критериям (Maritsa Vegetable Crop Research Institute, Пловдив, Болгария, 2018-2020 годы)

Образец	R. M. Huehn (20)				P _i , C.S. Lin и M.R. Binns (18)			
	NPP	NFN-2	WPP	WGP	NPP	NFN-2	WPP	WGP
22/16-ob	2	5	5	8	5,79	0,94	225,91	90,25
22/16-af	4	4	4	2	11,64	2,56	458,54	129,43
Kazino-af	7	7	7	6	10,18	2,13	348,16	93,81
Plovdiv-n	8	7	8	9	11,82	2,79	345,17	85,19
Echo-af	4	7	2	5	4,05	0,61	494,05	98,81
Marsy-n	4	4	4	6	1,56	0,18	391,31	103,86
Shugar dwarf-n	7	9	7	7	5,75	1,53	360,03	101,08
B4-34-n	6	5	8	7	5,90	0,83	396,39	142,23
1/17-ob	9	3	7	4	13,05	4,09	339,09	65,87
Vechernitza-n	4	4	4	2	16,08	2,71	554,49	128,14

Примечание. NPP — число стручков на растение, NFN-2 — число продуктивных узлов с 2 стручками на растение, WPP — масса стручков с растения, WGP — масса зерен с растения.

Результаты, представленные в таблице 6, получены при использовании альтернативных подходов к оценке ответа образцов при различных условиях выращивания. Ранговый анализ по методу M. Huehn (20) позволяет оценить стабильность генотипа в ответ на изменения факторов среды. Линия 22/16-ob получила самый низкий ранг ($R = 2$) по общему числу стручков, далее следуют 22/16-af, Echo-af, Marsy-n и Vechernitza-n, занимающие вторую позицию ($R = 4$). По числу продуктивных узлов с 2 стручками на растение только линия 1/17-ob имеет $R = 3$, и по этому признаку она неперспективна. Из следующих в рейтинге образцов представляет интерес сорт Marsy-n. Таким образом, для селекции гороха на повышенную массу стручка (при достаточно стабильном проявлении признака) можно рекомендовать сорт Marsy-n и линию 22/16-ob, на повышенную массу зерен с растения — Marsy-n и линию 1/17-ob.

При оценке по параметру P_i , предложенному C.S. Lin и M.R. Binns (18), предпочтение отдается генотипу с наименьшим индексом. Сорта Echo-af и Marsy-n с высоким общим числом стручков и числом продуктивных узлов с 2 стручками на растение также занимают два первых места по стабильности. По второму признаку лидируют линии B4-34-n и 22/16-ob. По индексу P_i по двум другим признакам (масса стручка и массы зерна) приоритет получают линии 1/17-ob и 22/16-ob, а также сорт Plovdiv-n.

Результаты применения метода центроидной классификации M. Nascimento с соавт. (19) (рис. 2) показывают, что значительная доля изученных образцов гороха характеризовалась умеренной общей адаптивностью ($R = 5$) по числу стручков на растение. У сорта Vechernitza-n адаптивность низкая ($R = 4$) как по числу стручков на растение, так и по массе стручков и массе зерен с растения. Сорта Marsy-n и Shugar dwarf-n достаточно хорошо адаптируются к неблагоприятным условиям. Сорт Marsy-n обладает высокой общей адаптивностью ($R = 1$) по числу продуктивных узлов с 2 стручками на растение, массе стручков и массе зерен с растения. Линию B4-34-n можно

привлекать для формирования стручков с большой массой ($R = 3$) при неблагоприятных условиях, но она не подходит для получения высокой продуктивности зерен с растения. Некоторые из образцов в нашем исследовании показали умеренную общую адаптивность по анализируемым признакам.

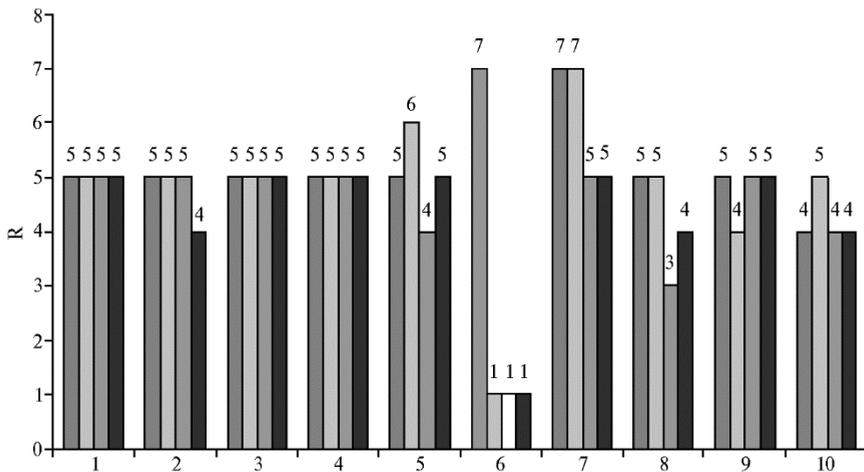


Рис. 2. Непараметрический ранговый анализ признаков NPP (число стручков на растение, ■), NFN-2 (число продуктивных узлов с 2 стручками на растение, ■), WPP (масса стручков с растения, ■) и WGP (масса зерен с растения, ■) по M. Nascimento с соавт. (19) у изученных селекционных образцов гороха (*Pisum sativum* L.): 1 — 22/16-ob, 2 — 22/16-af, 3 — Kazino-af, 4 — Plovdiv-n, 5 — Echo-af, 6 — Marsy-n, 7 — Shugar dwarf-n, 8 — B4-34-n, 9 — 1/17-ob, 10 — Vechernitza-n. Значения рангов R: 1 — высокая общая адаптивность, 2 — адаптивность при благоприятных условиях, 3 — адаптивность при неблагоприятных условиях, 4 — низкая адаптивность, 5 — умеренная общая адаптивность, 6 — адаптивность при умеренно благоприятных условиях, 7 — адаптивность при умеренно неблагоприятных условиях (Maritsa Vegetable Crop Research Institute, Пловдив, Болгария, 2018-2020 годы).

GGE biplot анализ. Это комплексный анализ, позволяющий отражать графически большинство эффектов взаимодействия генотип—среда, представленных в виде таблицы. В результате оценка образцов и идентификация мегасреды визуализируются и значительно упрощаются. В графической модели сохраняются только две главные компоненты (PC1 и PC2) (рис. 3), так как это наиболее подходящий способ установить основные закономерности и исключить избыточные данные. Первые две главные компоненты могут быть представлены в 2D-графическом пространстве, так что взаимодействие между каждым генотипом и средой легко интерпретируется.

GGE biplot анализ показал, что первые две главные компоненты объясняют 84,6 % общей изменчивости числа стручков на растение, вызванной взаимодействием генотип—среда. У сортов Marsy-n и Shugar dwarf-n наибольшее число стручков формировалось в среде E1 (2018 год), у сорта Plovdiv-n — в среде E2 (2019 год). Для сорта Kazino-af и линии 1/17-ob наиболее благоприятной для образования большего числа стручков была среда E3 (2020 год, наиболее благоприятный для развития растений по сравнению с остальными периодами исследования) (см. рис. 3).

По числу продуктивных узлов с 2 стручками на растение также образовался многоугольник, на вершинах которого находятся проекции образцов, имеющих преимущество в определенной среде (или группе сред). У линии 22/16-ob и сорта Echo-af этот показатель был выше в средах E2 (2019 год) и E3 (2020 год). На сорт Shugar dwarf-n, у которого, как и у Echo-af, величина признака выше средней по выборке, положительно повлияли климатические условия среды E1 (2019 год). Генотипы Plovdiv-n, 1/17-ob,

Vechernitza-n и 22/16-af находятся в секторах без специфической среды и поэтому уступают остальным в адаптивности по этому признаку (см. рис. 3).

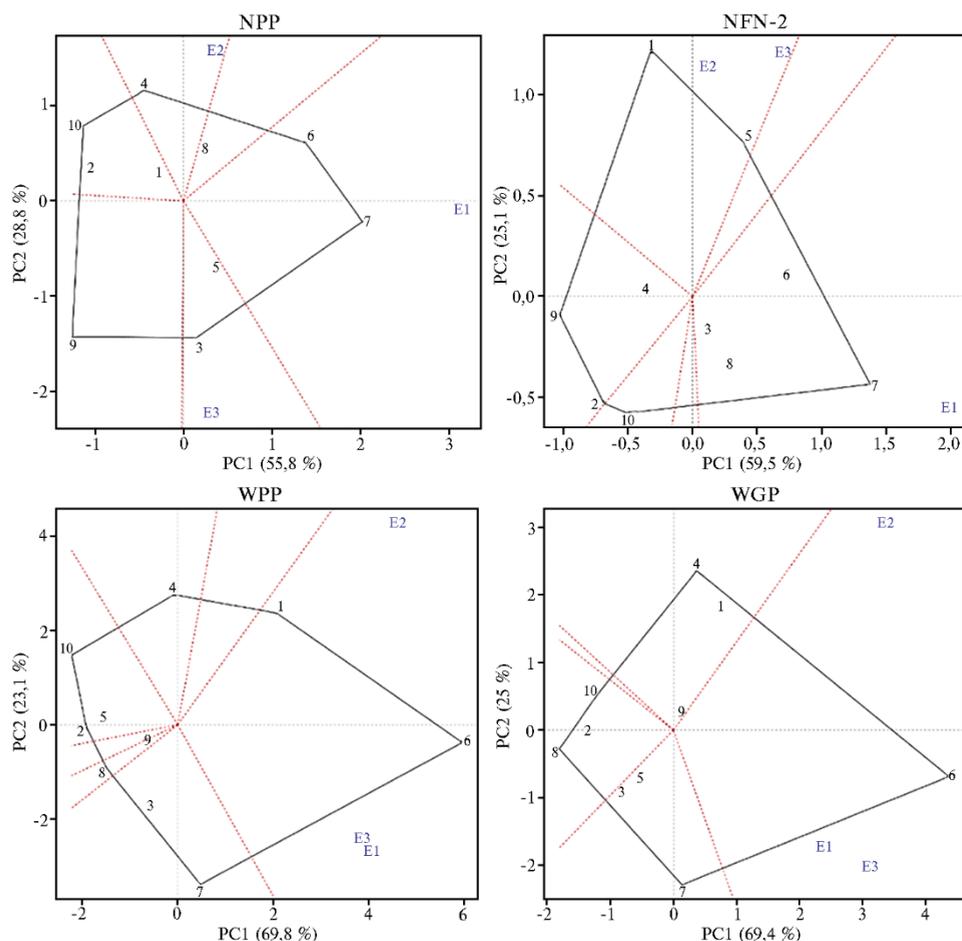


Рис. 3. GGE biplot анализ признаков NPP, NFN-2, WPP и WGP у изученных селекционных образцов гороха (*Pisum sativum* L.): 1 — 22/16-ob, 2 — 22/16-af, 3 — Kazino-af, 4 — Plovdiv-n, 5 — Echo-af, 6 — Marsy-n, 7 — Shugar dwarf-n, 8 — B4-34-n, 9 — 1/17-ob, 10 — Vechernitza-n; E1, E2 и E3 — условия среды соответственно в 2018, 2019 и 2020 году; NPP — число стручков на растение, NFN-2 — число продуктивных узлов с 2 стручками на растение, WPP — масса стручков с растения, WGP — масса зерен с растения (Maritsa Vegetable Crop Research Institute, Пловдив, Болгария, 2018-2020 годы).

В вершинах многоугольника, визуализирующего изменение массы стручков с растения в зависимости от условий выращивания, находятся генотипы Plovdiv-n (вверху), Vechernitza-n, 22/16-af и B4-34-n (расположены слева), Shugar dwarf-n (нижнее положение) и 22/16-ob и Marsy-n (правая часть многоугольника). Последние два генотипа, особенно Marsy-n, способны формировать больше зрелых стручков, чем остальные. Для сорта Marsy-n при этом более благоприятными были среды E1 и E3, тогда как для 22/16-ob — среда E2 (см. рис. 3).

По массе зерен с растения наблюдалось некоторое сходство как в пространственном расположении образцов, так и в связи проявления признака с условиями среды. Видно, что в образовавшемся многоугольнике генотипы расположены в пяти секторах. При этом Plovdiv-n, B4-34-n, Shugar dwarf-n и Marsy-n находятся в верхней части многоугольника. Сорт Marsy-n занимает крайне правое положение, определяемое квадрантом с

положительным значением PC1 и отрицательным значением PC2, но не очень далеко от абсциссы. Это обусловлено сильным превосходством этого сорта над остальными по общей массе зерен. Среды E1 и E3 расположены очень близко друг к другу и образуют мегасреду. Среда E2 находится в том же секторе, но расположена на его противоположном конце (см. рис. 3).

Таким образом, мы обнаружили три источника изменчивости (генотип, окружающая среда и взаимодействие генотип—среда), статистически значимые влияющие на общее число стручков, на число продуктивных узлов с 2 стручками на растение, массу стручков и массу зерен. Аналогичные результаты для той же культуры были представлены T.T. Tolessa с соавт. (24) и J. Wocianowski с соавт. (25), особенно по массе семян с растением.

Аналогичные результаты были получены при изучении генотипов нута (26). Анализ дисперсии по длине стручка показал, что более 60 % общей вариации признака обусловлено влиянием среды выращивания, далее следует взаимодействие генотип—среда. Фактор генотипа оказал наименьшее влияние на проявление признака. Выводы A.K. Mukherjee с соавт. (27), сделанные при тестировании сортов риса, согласуются с результатами нашего исследования. Авторы выяснили, что для небольшой части признаков полученная сумма квадратов была больше для фактора генотип, из чего можно сделать вывод, что протестированные ими образцы существенно различаются по генетическому потенциалу. Влияние других факторов на изменчивость было слабее, особенно для взаимодействия генотип—среда. Применив метод S.A. Eberhart и W.A. Russel (10) для оценки фенотипической стабильности количественных признаков у гороха, S. Rana с соавт. (28) получили аналогичные результаты и отметили взаимодействие генотипа—среды как фактор, статистически значимо влияющий на массу стручков и семян с растения. Для генотипов паннонской вики (29) и садового гороха (30) сообщалось, что образцы с низкой семенной продуктивностью обычно имеют высокую стабильность признаков и проявляют адаптивность к различным условиям выращивания. Результаты нашего исследования подтверждают эти выводы. По мнению Y. Goa и H. Mohammed (31), основанному на практическом опыте работы с горохом, наиболее подходящим для селекции и желательным следует считать генотип, который сочетает высокую продуктивность с достаточно выраженной стабильностью. По мнению авторов, наиболее высокопродуктивные генотипы экологически нестабильны при негативных изменениях условий внешней среды, но отзывчивы на благоприятные условия. К такому же утверждению приводят полученные нами данные. Результаты нашей оценки стабильности сортов гороха с разной морфологией листьев согласуются с выводами предыдущих аналогичных исследований, в частности E. Asikgoz с соавт. (32). Авторы сообщают, что безлистные (афильные) генотипы с видоизмененными листьями («усатый» тип) по массе семян с растения стабильнее листочковых форм при выращивании в разных условиях.

В нашем исследовании несколько образцов гороха сочетали высокие значения и адекватную стабильность анализируемого признака. То же описано для других культур. T. Simion с соавт. (33) сообщают, что небольшая часть генотипов вигны показывает высокую экспрессию и стабильность проявления основных количественных признаков. Авторы предполагают, что такие генотипы будут адекватно реагировать на изменения условий среды при культивировании.

Y. Rezene с соавт. (34) в работе, выполненной на горохе, показали, что GGE biplot анализ дает дополнительную информацию о сортах и их возможном практическом использовании. То же подтвердило наше ис-

следование. В последние годы GGE biplot анализ широко применяется для изучения взаимодействия генотипа и среды в связи со стабильностью признаков у других культур — соевых бобов (35), вигны (36), нута (37) и ячменя (38). O. Sozena с соавт. (39) рекомендуют применять различные методы оценки фенотипической стабильности признаков, чтобы получить более полную и точную характеристику изучаемых форм. Результаты их исследования показывают, что при анализе экологической стабильности параметрические тесты пригодны и надежны. В своем исследовании для всестороннего изучения образцов мы использовали набор методов, включая оценку по непараметрическим критериям.

Итак, показано, что влияние всех факторов вариации на общее число стручков, число продуктивных узлов с 2 стручками на растение, массу стручков и массу зерен с растения статистически значимо ($p < 0,05$). Наибольшее влияние окружающей среды отмечено для общего числа стручков (52,20 %) и числа продуктивных узлов с 2 стручками на растение (59,00 %). Генотип определяет наибольшую часть общей изменчивости по массе стручков с растения (64,10 %) и массе зерен с растения (67,40 %), поэтому эффективный отбор по этим признакам можно вести независимо от условий окружающей среды. Для числа стручков на растение и длины стручков генотипическая дисперсия оказалась ниже изменчивости под влиянием взаимодействия генотип—среда, что требует продолжения испытаний для более точной оценки. Для каждого признака мы рассчитали несколько параметров стабильности. По итогам сорта Marsy-n и Echo-af идентифицированы как наиболее ценные генотипы по числу стручков с растения. Образцы Kazino-af, 1/17-ob и Plovdiv-n характеризуются высокой изменчивостью и формируют меньшее число стручков. По массе стручков генотипы показали хорошую отзывчивость, особенно Plovdiv-n ($b_i = 2,68$), 1/17-ob ($b_i = 2,63$) и Marsy-n ($b_i = 2,18$), у которых масса стручка больше, а сорт Echo-af демонстрирует лучшую стабильность ($b_i = 1,39$; $S_i^2 = 1,91$). Образцы Marsy-n ($b_i = 3,08$), 1/17-ob ($b_i = 2,62$) и Plovdiv-n ($b_i = 4,02$) были высокопродуктивными по массе зерен, но и наиболее изменчивыми. Сорт Vechernitza-n и линия 22/16-af близки к идеальному генотипу по стабильности, но малоурожайны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smýkal P., Aubert G., Burstin J., Coyne C.J., Ellis N.T., Flavell A.J., Ford R., Hэbl M., Macas I., Neumann P., McPhee K.E., Redden R.J., Rubiales D., Weller J.L., Warkentin T.D. Pea (*Pisum sativum* L.) in the genomic era. *Agronomy*, 2012, 2(2): 74-115 (doi: 10.3390/agronomy2020074).
2. Василенко А.А., Солонечный П.Н., Понуренко С.Г. Оценка селекционного материала гороха (*Pisum sativum* L.) в различных системах расчетов (регрессионная, AMMI, GGE biplot модели). *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*, 2019, 2: 191-195.
3. Parihar A.K., Hazra K.K., Lamichaney A., Dixit G.P., Singh D., Singh A.K., Singh N.P. Characterizing plant trait(s) for improved heat tolerance in field pea (*Pisum sativum* L.) under subtropical climate. *Int. J. Biometeorol.*, 2022, 66(6): 1267-1281 (doi: 10.1007/s00484-022-02275-5).
4. Амелин А.В. Физиологические основы селекции гороха. *Зернобобовые и крупяные культуры*, 2012, 1: 46-52.
5. Белявская Л.Г., Белявский Ю.В., Диянова А.А. Оценка экологической стабильности и пластичности сортов сои. *Зернобобовые и крупяные культуры*, 2018, 4(28): 42-48.
6. Пономарева С.В. Изучение исходного материала коллекции гороха в условиях Нижегородской области. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, 2018, 63(2): 23-28 (doi: 10.30766/2072-9081.2018.63.2.23-28).
7. Зеленев А.Н., Шелепина Н.В., Мамаева М.В. Особенности аминокислотного состава белка листовых мутантов гороха. *Зернобобовые и крупяные культуры*, 2013, 1(5): 21-25.
8. Жученко А.А. *Мобилизация мировых ресурсов цветковых растений на основе создания систематизированных генетических коллекций*. М., 2012.

9. Dragavtsev V.A. *Ecological and genetic screening of the gene pool and methods of designing varieties of agricultural plants in terms of yield, stability and quality. Methodical recommendations (new approaches)*. St. Petersburg, 1997.
10. Eberhart S.A., Russel W.A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, 1966, 6(1): 36-40 (doi: 10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x).
11. Sabaghnia N., Karimizadeh R., Mohammadi M. Graphic analysis of yield stability in new improved lentil (*Lensculinaris* Medik.) genotypes using nonparametric statistics. *Acta Agriculturae Slovenica*, 2015, 103(1): 113-127.
12. Finley K.W., Wilkinson G.N. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1963, 14(6): 742-754 (doi: 10.1071/AR9630742).
13. Tai G.C.C. Analysis of genotype—environment interactions of potato yield. *Crop Science*, 1979, 19(4): 434-438 (doi: 10.2135/cropsci1979.0011183X001900040003x).
14. Hanson W.D. Genotypic stability. *Theor. Appl. Genet.*, 1970, 40(5): 226-231 (doi: 10.1007/BF00285245).
15. Plaisted R.I., Peterson L.C. A technique for evaluating the ability of selection to yield consistently in different locations or seasons. *American Potato Journal*, 1959, 36: 381-385 (doi: 10.1007/BF02852735).
16. Wricke G. Über eine Methode zur Erfassung der ökologischen Streubreite in Feldversuchen. *Z. Pflanzenzücht*, 1962, 47: 92-96.
17. Annicchiarico P. Cultivar adaptation and recommendation from alfalfa trials in Northern Italy. *Journal of Genetics and Plant Breeding*, 1992, 46(3): 269-278.
18. Lin C.S., Binns M.R. A superiority measure of cultivar performance for cultivar × location data. *Canadian Journal of Plant Science*, 1988, 68(1): 193-198 (doi: 10.4141/cjps88-01).
19. Nascimento M., Cruz C.D., Campana A.C.M., Tomaz R.S., Salgado C.C., Ferreira R. Alteration of the centroid method to evaluate genotypic adaptability. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2009, 44: 263-269 (doi: 10.1590/S0100-204X2009000300007).
20. Huehn M. Nonparametric measures of phenotypic stability: Part 1: Theory. *Euphytica*, 1990, 47: 189-194 (doi: 10.1007/BF00024241).
21. Huehn M. Nonparametric measures of phenotypic stability: Part 2. Application. *Euphytica*, 1990, 47: 195-201 (doi: 10.1007/BF00024242).
22. Yan W. Singular-value partitioning in biplot analysis of multi-environment trial data. *Agronomy Journal*, 2002, 94(5): 990-996 (doi: 10.2134/agronj2002.9900).
23. Cruz C.D. *Programa Genes: Biometria. version 7.0*. University of Federal Viçosa, Viçosa, Brazil, 2009.
24. Tolessa T.T., Keneni G., Sefera T., Jarso M., Bekele Y. Genotype × environment interaction and performance stability for grain yield in field pea (*Pisum sativum* L.) genotypes. *International Journal of Plant Breeding*, 2013, 7(2): 116-123.
25. Bocianowski J., Księżak J., Nowosad K. Genotype by environment interaction for seeds yield in pea (*Pisum sativum* L.) using additive main effects and multiplicative interaction model. *Euphytica*, 2019, 215: 191 (doi: 10.1007/s10681-019-2515-1).
26. Singh J., Kumar A., Fiyaz R.A., Singh M.K. Stability analysis of pigeon pea genotypes by deployment of AMMI model under rainfed environment. *Legume Research*, 2018, 41(2): 182-188 (doi: 10.18805/lr.v0i0.7851).
27. Mukherjee A.K., Mohapatra N.K., Bose L.K., Jambhulkar N.N., Nayak P. Additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) analysis of G×E interactions in rice blast pathosystem to identify stable resistant genotypes. *Global Journal of Crop, Soil Science and Plant Breeding*, 2013, 1(1): 103-118.
28. Rana C., Sharma A., Sharma K.C., Mittal P., Sinha B.N., Sharma V.K., Chandel A., Thakur H., Kaila V., Sharma P., Rana V. Stability analysis of garden pea (*Pisum sativum* L.) genotypes under North Western Himalayas using joint regression analysis and GGE biplots. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2021, 68: 999-1010 (doi: 10.1007/s10722-020-01040-0).
29. Nizam I., Cubuk M.G., Moralar E. Genotype-environment interaction and stability analysis of some Hungarian vetch (*Vicia pannonica* Crantz.) genotypes. *African Journal of Agricultural Research*, 2011, 6(28): 6119-6125 (doi: 10.5897/AJAR11.1228).
30. Al-Aysh F., Kotmaa H., Al-Shareef A., Al-Serhan M. Genotype-environment interaction and stability analysis in garden pea (*Pisum sativum* L.) landraces. *Agriculture & Forestry*, 2013, 59(3): 183-191.
31. Goa Y., Mohammed H. Genotype × environment interaction and yield stability in field pea (*Pisum sativum* L.) tested over different locations in Southern Ethiopia. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 2013, 3(19): 91-100.
32. Acikgoz E., Ustun A., Gul I., Anlarsal E., Tekeli A.S., Nizam I., Avcioglu R., Geren H., Cakmakci S., Aydinoglu B., Yucel C., Avci M., Acar Z., Ayan I., Uzun A., Bilgili U., Sincik M., Yavuz M. Genotype × environment interaction and stability analysis for dry matter and seed yield in field pea (*Pisum sativum* L.). *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2009, 7(1): 96-106 (doi: 10.5424/sjar/2009071-402).
33. Simion T., Mohammed W., Amsalu B. Genotype by environment interaction and stability analysis

- of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) genotypes for yield in Ethiopia. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 2018, 10(9): 249-257 (doi: 10.5897/JPBCS2018.0753).
34. Rezene Y., Bekele A., Goa Y. GGE and AMMI biplot analysis for field pea yield stability in SNNPR state, Ethiopia. *International Journal of Sustainable Agricultural Research*, 2014, 1(1): 28-38.
 35. Bhartiya A., Aditya J., Kumari V., Kishore N., Purwar J., Agrawal A. GGE biplot & AMMI analysis of yield stability in multi-environment trial of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] genotypes under rainfed condition of North Western Himalayan hills. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 2017, 27(1): 227-238.
 36. Horn L., Shimelis H., Sarsu F., Mwadzingeni L., Laing M.D. Genotype-by-environment interaction for grain yield among novel cowpea (*Vigna unguiculata* L.) selections derived by gamma irradiation. *The Crop Journal*, 2018, 6(3): 306-313 (doi: 10.1016/j.cj.2017.10.002).
 37. Farshadfar E., Rashidi M., Jowkar M.M., Zali H. GGE biplot analysis of genotype × environment interaction in chickpea genotypes. *European Journal of Experimental Biology*, 2013, 3(1): 417-423.
 38. Vaezi B., Pour-Aboughadareh A., Mohammadi R., Armion M., Mehraban A., Hossein-Pour T. GGE biplot and AMMI analysis of barley yield performance in Iran. *Cereal Research Communications*, 2017, 45(3): 500-511 (doi: 10.1556/0806.45.2017.019).
 39. Sozena O., Karadavut U. Determination of genotype × environment interactions of some chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes by using different stability methods. *Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 24: 431-438.

¹Department of Breeding, Variety Maintenance and Introduction,
Maritsa Vegetable Crops Research Institute,
32 Brezovsko shosse Str., 4003 Plovdiv, Bulgaria;

Поступила в редакцию
4 мая 2022 года

²Institute of Forage Crops,

Department of Technology and Ecology of Forage Crops,

89 General Vladimir Vazov Str., 5800 Pleven, Bulgaria;

³Institute of Forage Crops,

Department of Breeding and Seed Production of Forage Crops,

89 General Vladimir Vazov Str., 5800 Pleven, Bulgaria

e-mail: viliana.vasileva@gmail.com ✉

Sel'skokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2022, V. 57, № 5, pp. 965-980

GENOTYPE-ENVIRONMENT INTERACTION AND STABILITY OF QUANTITATIVE TRAITS IN GARDEN PEA (*Pisum sativum* L.)

S. Kalapchieva¹, V. Kosev², V. Vasileva³ ✉

¹Department of Breeding, Variety Maintenance and Introduction, Maritsa Vegetable Crops Research Institute, 32 Brezovsko shosse Str., 4003 Plovdiv, Bulgaria;

²Institute of Forage Crops, Department of Technology and Ecology of Forage Crops, 89 General Vladimir Vazov Str., 5800 Pleven, Bulgaria;

³Institute of Forage Crops, Department of Breeding and Seed Production of Forage Crops, e-mail viliana.vasileva@gmail.com (✉ corresponding author)

ORCID:

Kalapchieva S. orcid.org/0000-0001-6779-4712

Vasileva V. orcid.org/0000-0001-5602-7892

Kosev V. orcid.org/0000-0002-6619-9409

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

Supported financially from the National Science Foundation of Bulgaria (grant KP-06-N26/12)

Received May 4, 2022

doi: 10.15389/agrobiol.2022.5.965eng

Abstract

Peas are among the most common and widely cultivated annual legumes. Productivity potential of most modern pea varieties is high but limited by their low homeostasis and sensitivity to abiotic stress, i.e., the varieties tend to reduce adaptability. Therefore, one of the main challenge in pea breeding is to create an optimal genotype capable of realizing the biological potential and adequately responding to changes in growing conditions. Therefore, environmental testing remains relevant. This paper is the first assessment of the breeding samples of the pea working collection (Maritsa Vegetable Crop Research Institute, Plovdiv, Bulgaria) with respect to their ability to form economically significant quantitative traits. Three sources of variability (genotype, environment, and genotype-environment interaction) were found to be statistically significant for the total number of pods, the number of productive nodes with two pods per plant, pod weight, and grain weight. In 2018-2020, the phenotypic stability of ten pea (*Pisum sativum* L.) genotypes was assessed, including four perspective lines (22/16-af, 22/16-n, B4/34-n, and 1/17-n) and six varieties (Kazino-af, Plovdiv-n, Marsy-n, Echo-af,

Shugar dwarf-n, and Vecherniza-n). The main examined quantitative traits were the number of pods per plant, the number of fertile nodes with one pod per plant, the number of fertile nodes with two pods per plant, pod length, pod width, pod weight per plant, and grain weight per plant. The effect of all factors of variation on the number of pods per plant, number of fertile nodes with two pods per plant, weight of pods per plant, and grain weight per plant is statistically significant. The strongest was the effect of the environmental factor on the manifestation of the number of pods per plant (52.20 %) and the number of fertile nodes with two pods per plant (59.00 %). The genotype factor has the largest contribution to the total variability of the weight of pods per plant (64.10 %) and grain weight per plant (67.40 %). Therefore, an effective breeding should be focusing on these traits regardless of the environmental conditions. The number of pods per plant and pod length requires more trials to give a more accurate estimate due to the superiority of the genotype \times environment interaction variance over the genotype variance. Our findings indicate that the varieties Marsy-n and Echo-af are the most valuable genotypes for the number of pods per plant. The varieties Kazino-af, Plovdiv-n and the line 1/17-ob are highly variable and form fewer pods. For pod weight, all genotypes showed good responsiveness, especially Plovdiv-n ($b_i = 2.68$), 1/17-ob ($b_i = 2.63$), and Marsy-n ($b_i = 2.18$), all three having a higher pod weight, and the Echo-af variety shows better stability ($b_i = 1.39$; $S_i^2 = 1.91$). For the grain weight per plant, the Marsy-n ($b_i = 3.08$), 1/17-ob ($b_i = 2.62$), and Plovdiv-n ($b_i = 4.02$) are highly productive but also the most variable.

Keywords: phenotypic stability, genotype, environment, yield stability, ecological plasticity.