

УДК: 633.3

А.О. Василенко^{1*}, В.І. Січкач², Л.Н. Шевченко¹, Н.О. Вус³, П.М. Солонечний¹,
С.І. Силенко⁴, Р.В. Соломонов⁵, В.І. Сердюк¹, А.В. Глянцев¹

Взаємодія генотип-середовище при екологічному випробуванні сортів гороху у системі AMMI та GGE biplot аналізів

¹Інститут рослинництва ім. В. Я. Юр'єва НААН України, Харків, Україна

²Селекціо-генетичний інститут, Одеса, Україна

³French National Institute for Agriculture, Food, and Environment (INRAE), Dijon, France

⁴Устимівська дослідна станція рослинництва Інституту рослинництва ім. В. Я. Юр'єва,
Устимівка, Полтавська обл., Україна

⁵Одеський державний аграрний університет, Одеса, Україна

*E-mail: avase2015@gmail.com

UDC: 633.3

A.O. Vasylenko^{1*}, V.I. Sichkar², L.M. Shevchenko¹, N.O. Vus³, P.M. Solonechnyi¹,
S.I. Silenko⁴, R.V. Solomonov⁵, V.I. Serdyuk¹, A.V. Glyantsev¹

AMMI and GGE Biplot Analysis of Genotype-Environment Interaction in Environmental Trials of Pea Cultivars

¹Yuriev Plant Production Institute of NAAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

²Plant Breeding and Genetic Institute, Odesa, Ukraine

³French National Institute for Agriculture, Food, and Environment (INRAE), Dijon, France

⁴Ustymivka Experimental Station of Plant Production, Yuriev Plant Production Institute

⁵Odessa State Agrarian University, Odesa, Ukraine

*E-mail: avase2015@gmail.com

Реферат: Представлені результати застосування систем AMMI та GGE biplot аналізів при для узагальнення даних екологічного випробування сортів гороху. Наведені результати розрахунків виявились не тотожними і свідчать про важливість кожного із цих алгоритмів. Так, розподіл зразків гороху за рангами (ASV) у системі AMMI моделі розмістив сорт Гайдук на першому місці, але за результатами GGE biplot аналізу найкращим («ідеальним генотипом») є сорт Оплот. Графічне представлення результатів із зазначенням мегасередовищ та сортами, що є найкращими у цих середовищах – додаткова інформація для корегування селекційних програм із створення адаптивних сортів гороху для різних зон вирощування. Окрема перевага GGE biplot полягає у можливості оцінки інформативності середовища випробування. В нашому дослідженні відрізнялись не тільки точки випробування – Одеська державна дослідна станція (Одеська обл.), Устимівська дослідна станція (Полтавська обл.) та Інститут рослинництва ім. В. Я. Юр'єва (Харківська обл.), а і кожен рік випробування у кожній точці дослідження. Таким чином, застосування систем AMMI та GGE biplot аналізів для обробки результатів екологічного випробування гороху не виключає один одного, а навпаки, надає більш розгорнуту і повну інформацію про результати дослідження.

Ключові слова: екологічне випробування, горох, AMMI, GGE biplot, сорти, урожайність

Abstract: Results of AMMI and GGE biplot analysis summarizing data of environmental trials of pea cultivars are presented. The results of these methods were not identical and indicate the importance of each of these algorithms. Thus, the distribution of pea accessions by ranks (ASV) in the AMMI model placed cv. 'Haiduk' in the first position, but according to the results of the GGE biplot analysis, cv. 'Oplot' was the best ("ideal") genotype. Graphical visualization of results marking megaenvironments and cultivars that are the best in these environments is additional information to adjust breeding programs and to create adaptable pea cultivars for different growing zones. A separate advantage of GGE biplot is that it is able to assess the informativeness of test environments. In our study, not only the trial locations (Odessa State Experimental Station [Odessa Oblast], Ustymivka Experimental Station [Poltavska Oblast] and Yuriev Plant Production

Institute [Kharkivska Oblast]) but also each year of trials at each location differed. Thus, AMMI and GGE biplot analysis, which process data of environmental trials of pea, do not exclude each other, but on the contrary, provide more detailed and complete information.

Key words: environmental trials, pea, AMMI, GGE biplot, cultivars, yield

Вступ

Проведення оцінок у різних екологічних умовах за математичною моделлю S.A. Eberhart та W.A. Russell [1] не дозволяє поруч з оцінкою матеріалу оцінити самі умови дослідження. Зручним інструментом для таких розрахунків є GGE biplot method та AMMI аналіз. Перевага GGE biplot полягає не тільки у наданні інформації про досліджувані генотипи, але й всебічній оцінці середовищ випробування [2, 3].

GGE biplot та AMMI аналіз є ефективними алгоритмами, які застосовують для оцінки результатів випробувань на багатьох культурах – соняшнику [4], гороху [5, 6], сої [7], ячменю [8] та ін. Так, проведене Bezugla та ін. випробування колекційних зразків квасолі у чотирьох різних точках вирощування в Україні: у Східній частині Лісостепу (Харківська обл.), Південній частині Лісостепу (Полтавська обл.); Поліссі (Чернігівська обл.); південному степу (Одеська обл.), дозволило за допомогою розрахунків у системі GGE biplot виділити умовний «ідеальний» генотип і оцінити інформативність точок випробування [9].

У роботі Das та ін. GGE biplot було застосовано для визначення не лише динаміки стійкості і визначення стійких до іржі (*Uromyces viciae-fabae*) генотипів гороху, а й для визначення ідеального місця для тестування. Попередньо у точках розповсюдження хвороби було відібрано з 250 зразків лише 23 перспективних генотипи, потім їх випробовували за обов'язкової інокуляції впродовж двох років поспіль у 6 точках Індії. Отримані результати підтвердили необхідність багаторічного тестування зразків саме у різних точках. Поряд з тим були виділені локації для проведення спрямованої селекції і проведено добір кращих генотипів, що дозволяє ефективно використовувати генетичні ресурси [10]. Osei та ін. застосували GGE biplot для визначення ефективності місцевих ризобій на вигні (*Vigna unguiculata* L. Walp) та арахісі (*Arachis hypogaea* L.) у різних географічних точках Гани. Було показано, що відповідь зразків на інокуляцію значно варіює залежно від місця дослідження, тобто значною виявилась взаємодія факторів середовища та інокуляції, і що саме середовище вносить 71 та 88% варіації для культур вигни та арахісу відповідно [11].

Introduction

S.A. Eberhart and W.A. Russell's mathematical model [1] used to assess data of trials in different environmental conditions allows for assessment of plant cultivars but not conditions themselves. GGE biplot analysis and AMMI are convenient tools for such assessments. The advantage of GGE biplot is not only in providing information about tested genotypes but also in comprehensive evaluation of test environments [2, 3].

GGE biplot analysis and AMMI are effective algorithms that are used to evaluate data of trials of many crops: sunflower [4], pea [5, 6], soybean [7], barley [8], etc. Thus, a trial conducted by Bezugla et al. on bean collection accessions grown in four different locations in Ukraine (eastern forest-steppe [Kharkivska Oblast], southern forest-steppe [Poltavska Oblast], woodlands [Chernihivska Oblast], and southern steppe [Odeska Oblast]) identified an "ideal" genotype and assessed the informativeness of the test locations due to application of GGE biplot analysis [9].

In a study by Das et al., GGE biplot analysis was used not only to determine resistance of pea genotypes to rust (*Uromyces viciae-fabae*) over time and to identify rust-resistant genotypes but also to select the ideal location for trials. Previously, only 23 promising genotypes were selected from 250 accessions at sites of disease spread; then they were tested upon mandatory inoculation for two consecutive years at 6 locations in India. The results confirmed the need for multi-year testing of accessions at different locations. At the same time, locations for targeted breeding and the best genotypes were selected, allowing for the efficient use of genetic resources [10]. Osei et al. used GGE biplot analysis to determine the effectiveness of local rhizobia on cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and peanut (*Arachis hypogaea* L.) at different geographical locations in Ghana. It was shown that the responses of accessions to inoculation varied significantly from location to location, that is, the environment-inoculation interaction was significant, and that the environments contributed 71% and 88% to the variations in cowpea and peanut, respectively [11].

Таким чином, проведення розрахунків у системі GGE biplot та AMMI аналіз надає важливу інформацію про взаємодію генотип-середовище, їх вплив та дозволяє проводити об'єктивну оцінку результатів екологічного випробування з різним дизайном. Зважаючи на те, що нами було проведено випробування сортів гороху у трьох локаціях із різним режимами опадів і температури, то цілком логічним було вперше в Україні застосувати цей сучасний алгоритм для аналізу отриманих даних.

Методика

Екологічне випробування проведено для семи сортів гороху селекції ІР ім. В.Я. Юр'єва – Царевич, Оплот, Отаман, Меценат, Корвет, Гайдук, Малахит. Всі сорти – безлисточкового типу, напівкарликові, середньостиглі, окрім сорту Царевич, який належить до середньоранніх.

Сорти гороху вирощували на Одеській державній дослідній станції (ОДДС, с. Хлібодарське Одеського району Одеської області; 46°29'05"пн. ш., 30°35'31"сх. д.), Устимівській дослідній станції рослинництва (УДСР Інституту рослинництва ім. В. Я. Юр'єва, Устимівка Кременчуцького району, Полтавської області, 49°18'21"пн. ш., 33°13'56" сх. д.) та на дослідному полі Інституту рослинництва (ІР НААН) ім. В. Я. Юр'єва, що розташоване у с. Елітне Харківського району Харківської області (49°59'31"пн. ш., 36°26'55"сх. д.). За зонами розташування – ОДДС розташована у Південностеповій підзоні зони Степу, УДСР – у Центральній частині, а ІР НААН – у Східній частині зони Лісостепу.

Польові досліді проведені відповідно до методики польового дослідження [12, 13] із застосуванням загальноприйнятої технології вирощування гороху. Норма висіву – 1,2 млн. схожих насінин/га, площа ділянок – 10 м².

Паралельно були проведені розрахунки у системі AMMI та GGE biplot аналізів [14].

Аналіз значення стабільності AMMI (ASV) проведено згідно з Purchase та ін. [15], де значення стабільності AMMI (ASV) не є кількісним показником стабільності, але воно кількісно визначає та розподіляє генотипи за рангом на основі їхньої стабільності врожайності. Генотипи з нижчими значеннями ASV вважаються більш стабільними, тоді як ті, що мають вищі значення ASV, вважаються менш стабільними [16]. ASV використовується для порівняння стабільності генотипів, причому нижчі значення вказують на більшу стабільність у різних середовищах. Він розраховується на основі моделі AMMI, яка

Thus, GGE biplot analysis and AMMI provide important information about genotype-environment interactions and their influence and allow for an objective assessment of data of environmental trials with different designs. Given that we conducted trials of pea cultivars at three locations with various precipitation and temperatures, it was quite logical for the first time in Ukraine to apply these modern algorithms to analyze our data.

Methods

Environmental trials were conducted on seven pea cultivars bred at the Yuriev Plant Production Institute: 'Tsarevych', 'Oplot', 'Ataman', 'Metsenat', 'Korvet', 'Haiduk', and 'Malakhit'. All cultivars are leafless, semi-dwarf, and medium-ripening, except for cv. 'Tsarevych', which is medium-early.

The pea cultivars were grown at Odessa State Experimental Station (OSES, Khlivodarske Village, Odeskyi District, Odeska Oblast; 46°29'05"N, 30°35'31"E), Ustymivka Experimental Station of Plant Production (UESPP of the Yuriev Plant Production Institute, Ustymivka, Kremenchukskyi District, Poltavska Oblast, 49°18'21"N, 33°13'56"E) and in the experimental fields of the Yuriev Plant Production Institute (YPPI NAAS) (Elitne village, Kharkivskyi District, Kharkivska Oblast, 49°59'31"N, 36°26'55"E). As to location zones, OSES is located in the south-steppe subzone of the steppe zone; UESPP – in the central part; and YPPI NAAS – in the eastern forest-steppe.

The field experiments were carried out in accordance with the field experimentation methodology [12, 13]. Pea was grown by traditional technology of pea cultivation. The seeding rate was 1.2 million germinable seeds/ha. The plot area was 10 m².

In parallel, calculations were performed by AMMI and GGE biplot analysis [14].

The AMMI stability value (ASV) was analyzed, as Purchase et al. described [15], where the ASV is not a quantitative indicator of stability, but it quantitatively determines and distributes genotypes by rank based on their yield stability. Genotypes with lower ASVs are considered more stable, while those with higher ASVs are considered less stable [16]. ASV is used to compare genotypes' stability, with lower values indicating greater stability across environments. It is calculated in an AMMI

поєднує ANOVA для коригування основних ефектів та аналіз головних компонентів (PCA) для оцінки мультиплікативних ефектів взаємодії генотипу з середовищем. ASV допомагає зрозуміти та візуалізувати складну взаємодію генотипу з середовищем, дозволяючи ідентифікувати стабільні генотипи в різних середовищах та оцінити стабільність врожайності сільськогосподарських культур. ASV можна оцінити за формулою [15].

$$ASV = \sqrt{\left[\frac{SSIPCA1}{SSIPCA2} (IPCA1 \text{ Score}) \right]^2 + (IPCA2 \text{ Score})^2}$$

де ASV – відстань від нуля на двовимірній діаграмі розсіювання балів IPCA1 (аналіз головних компонент взаємодії вісь 1) відносно балів IPCA2. Оскільки бал IPCA1 робить більший внесок у суму квадратів $G \times E$, його потрібно зважити на пропорційну різницю між балами IPCA1 та IPCA2, щоб компенсувати відносний внесок IPCA1 та IPCA2 у загальну суму квадратів $G \times E$. Потім для обчислення відстані від нуля використовується теорема Піфагора [17].

Аналіз індексу селекції генотипу (GSI) розраховувався за такою формулою [18]:

$$GSI = RASV + RY,$$

де RASV – це ранг стабільності AMMI, а RY – ранг середньої врожайності генотипів. У програмах селекції рослин використовуються два типи індексів стабільності. Перший індекс – GSI, де низьке значення GSI вказує на бажані генотипи з високим середнім значенням генотипу та стабільністю. Другий індекс – ASV, де менший бал ASV вказує на стабільніший генотип у різних середовищах [12]. Бал IPCA – це ще один параметр, який використовується для визначення адаптивності генотипу до певних середовищ. Більший бал IPCA (негативний або позитивний) вказує на більш специфічну адаптивність генотипу до певних середовищ [20]; тоді як менший бал IPCA (близький до нуля) вказує на низьку специфічність та стабільніший генотип у різних середовищах.

Для зручності ми надали кожному року і точці випробування відповідні шифри. Так, випробування у IP НААН у 2018 році – X18, у 2020 році – X20. Таким же чином для інших точок випробування: для УДС у 2018 році – Ust18 і у 2020 році – Ust 20., для ОДДС – O18 і O20 відповідно до років випробування.

model, which combines ANOVA to adjust for major effects and principal component analysis (PCA) to estimate multiplicative effects of genotype-by-environment interactions. ASV helps to understand and visualize complex genotype-environment interactions, enabling the identification of stable genotypes across environments and evaluation of crop yield stability. ASV is calculated by the following formula [15].

$$ASV = \sqrt{\left[\frac{SSIPCA1}{SSIPCA2} (IPCA1 \text{ Score}) \right]^2 + (IPCA2 \text{ Score})^2}$$

where ASV – distance from zero on a two-dimensional scatter plot of IPCA1 scores (principal component analysis of interactions, axis 1) relative to IPCA2 scores. Since the IPCA1 score contributes more to the sum of squares $G \times E$, it needs to be weighted by the proportional difference between the IPCA1 and IPCA2 scores to compensate for the relative contributions of IPCA1 and IPCA2 to the total sum of squares $G \times E$. The Pythagorean Theorem is then used to calculate the distance from zero [17].

The Genotype Selection Index (GSI) was calculated using the following formula [18]:

$$GSI = RASV + RY,$$

where RASV – AMMI stability rank and RY – mean yield rank. Two types of stability indices are used in plant breeding. The first index is the GSI, where low GSI values indicate desirable genotypes with high mean performance and stability. The second index is the ASV, where lower ASVs mean more stable genotypes across environments [12]. The IPCA score is another parameter used to determine the adaptability of a genotype to specific environments. A higher IPCA score (negative or positive) indicates a more specific adaptability of a genotype to specific environments [20]; whereas a lower IPCA score (close to zero) indicates a low specificity and a higher stability of a genotype across environments.

For convenience, we assigned each year and trial site a corresponding code. For example, the trial at YPPI NAAS in 2018 was coded as Kh18, in 2020 – as Kh20. Similarly, for other test sites: UESPP in 2018 and 2020 – Ust18 and Ust 20, respectively; OSES – O18 and O20.

Результати та обговорення

На території розташування Одеської державної дослідної станції впродовж періоду вегетації гороху 2018 та 2020 рр. опади були короткочасним і вкрай неефективними, тому рослини гороху із початку вегетаційного періоду відчували значний дефіцит вологи.

На території розташування УДС впродовж років досліджень умови для росту і розвитку рослин гороху були сприятливими – достатня кількість вологи і помірні температури повітря із нетривалими періодами з підвищеними температурами дозволили рослинам реалізувати свій генетичний потенціал і сформувані урожайність на задовільному рівні, що дало змогу об'єктивно оцінити дослідні зразки.

Гідротермічний режим вегетаційного періоду гороху 2018 та 2020 рр. в умовах Харківської області не був ні оптимальним, ні сприятливим. Рослини зазнавали значного стресу через високу денну температуру повітря. Також негативний вплив мала і відсутність достатньої кількості опадів.

В нашому дослідженні, за результатами розрахунків у системі AMMI моделі за рангом RY найкращими були сорти Гайдук (G5) та Оплот (G2) (табл. 1).

За індексом стабільності AMMI (ASV) найкращими були сорти Царевич (G1) та Гайдук (G5) із показником ASV 1 та 2 відповідно.

За сумою рангів GSI найкращим, як і у попередніх розрахунках, був сорт Гайдук. Сорти Царевич і Оплот посіли нижчі ранги, при цьому слід зауважити, що сорт Царевич, на відміну від сортів Оплот та Гайдук, є середньораннім сортом.

У нашому дослідженні, залежно від точок випробування, базові компоненти IPCA 1 (вісь першого головного компонента) та IPCA 2 (вісь другого головного компонента) разом дають від 88,93 до 89,54% загальної мінливості результатів.

Графічна візуалізація результатів GGE biplot на рис. 1 представлена у вигляді багатокутника, що поділений векторами на сектори, і концентричних або овальних фігур які розподіляють і генотипи, і середовища по принципу «хто де переміг» (which-won-where). Таким чином, програма проводить візуалізацію умов випробування і отриманих у цих умовах даних про урожайність. І якщо генотип показав високий рівень урожайності у більшості середовищ, то і, відповідно, від буде «переможцем». Так, на рис. 1 для середовища X18 та X20 (мегасередовище) найкращим був G 5 – сорт Гайдук.

Results and Discussion

On the OSES territory, rains were short and extremely ineffective during the pea growing periods in 2018 and 2020; so pea plants experienced a significant water deficit from the beginning of their vegetation.

In the years of research on the UESPP territory, the conditions for the growth and development of pea plants were favourable: sufficient wetting and moderate air temperatures with short periods of elevated temperatures allowed the plants to fulfil their genetic potentials and give satisfactory yields; hence, we could objectively evaluate the tested accessions.

In the Kharkivska Oblast, the hydrothermal regimen during the pea growing periods in 2018 and 2020 was neither optimal nor favorable. Plants were considerably stressed by high daytime air temperatures. Insufficient precipitation also had a negative impact.

In our study, according to the calculations in the AMMI model, the best cultivars by RY were 'Haiduk' (G5) and 'Oplot' (G2) (Table 1).

According to the ASV, the best cultivars were 'Tsarevych' (G1) and 'Haiduk' (G5) with RASV of 1 and 2, respectively.

According to the sum of GSI ranks, cv. 'Haiduk' turned out to be the best one, as in previous calculations. Cultivars 'Tsarevych' and 'Oplot' took lower ranks; here, it should be noted that cv. 'Tsarevych', unlike cvs. 'Oplot' and 'Haiduk', is medium-early.

In our study, depending on the test locations, the First Interaction Principal Component (IPCA 1; the axis of principal component 1) and the Second Interaction Principal Component (IPCA 2; the axis of principal component 2) together account for 88.93% to 89.54% of the total variability of the results.

The graphical visualization of the GGE biplot results in Fig. 1 is presented as a polygon, which is divided by vectors into sectors, and concentric or oval shapes, which distribute both genotypes and environments according to the "which-won-where" principle. Thus, the program visualizes the test conditions and yields harvested in these conditions. If a genotype yielded a lot in most environments, it will be the "winner". So, in Fig. 1, cv. 'Haiduk' (G5) was the best genotype for the environments Kh18 and Kh20 (megaenvironment).

Таблиця 1. Розподіл зразків гороху по рангах у системі AMMI моделі, (точки випробування IP НААН–ОДДС–УДС), 2018, 2020 рр.

Table 1. Distribution of the pea accessions by ranks in the AMMI model, (test sites: YPPI NAAS–OSES–UESPP), 2018, 2020.

Зразок / Accession		Середня урожайність по досліді / Mean yield		Головні компоненти взаємодії / Principal components		Індекс стабільності AMMI (ASV) / AMMI Stability Value (ASV)		Індекс селекції генотипу (GSI) / Genotype Selection Index (GSI)
Код / Code	Назва / Name	т/га / t/ha	Ранг (RY) / Rank (RY)	Вісь 1 (IPCA1) / Axis 1 (IPCA1)	Вісь 2 (IPCA2) / Axis 2 (IPCA2)	Показник / Value	Ранг (RASV) / Rank (RASV)	
G1	Оплот / Oplot	2,21	2	-0,36400	0,45045	0,807	5	7
G2	Царевич / Tsarevych	2,08	4	0,08646	-0,19922	0,252	1	5
G3	Отаман / Otaman	1,93	5	-0,13614	-0,45202	0,515	3	8
G4	Меценат / Mesenat	2,11	3	-0,59772	-0,11116	1,109	7	10
G5	Гайдук / Haiduk	2,23	1	0,07936	0,24918	0,287	2	3
G6	Малахит / Malakhit	1,88	7	0,54601	0,05753	1,008	6	13
G7	Корвет / Korvet	1,92	6	0,38602	0,00524	0,712	4	10

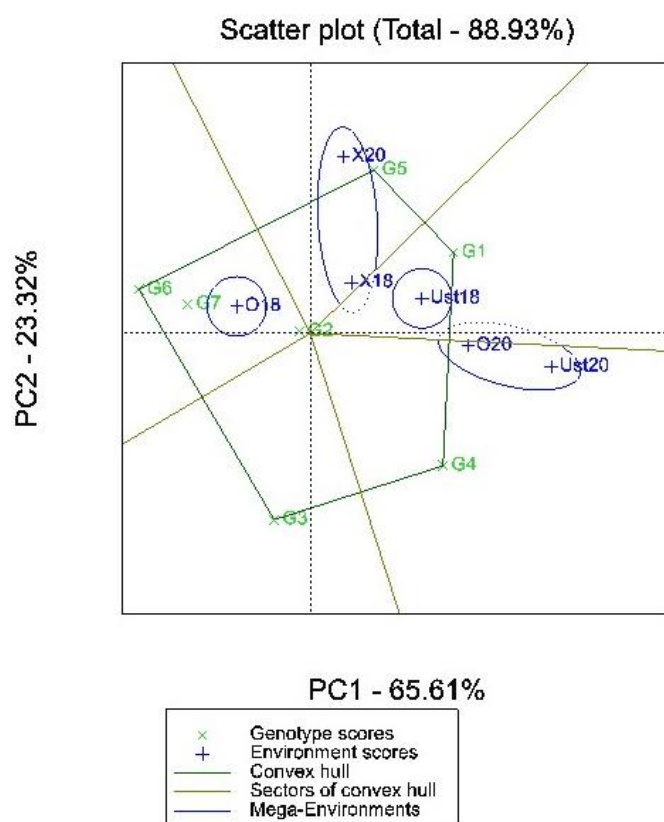


Рис. 1. GGEbiplot: «хто де переміг» (which-won-where), IP НААН–ОДДС–УДС
Fig. 1. The “which-won-where” view of the GGE biplot, YPPI NAAS–OSES–UESPP

Середовища O18 та Ust 20 сформували окреме мегасередовище без явного лідера. Тобто такий підхід виділяє найкращий генотипи для кожного мегасередовища. Полігональний вигляд дводіаграми GGE, що розділяє середовища для рекомендації відповідних генотипів для різних мегасередовищ, узгоджується з кількома дослідженнями для гороху (*Pisum sativum* L.) [21, 22, 23, 24] та інших представників родини бобових *Cajanus cajan* (L.) Millspaugh [25], *Lathyrus sativus* [26] та *Vicia faba* L. [27]. Генотипи, виявлені в таких дослідженнях, є перспективними для включення у складні стратегії селекції, спрямовані на оптимізацію стабільності взаємодії генотипу з середовищем та покращення стабільності врожайності в різних умовах навколишнього середовища [28].

Окрім урахування взаємодії генотип-середовище ще однією перевагою GGE biplot є надання характеристики середовищ досліджень або випробувань. Так, маркери середовища X20 та O20 (рис. 2) є довговекторними, але кут нахилу до вісі абсцис досить великий, що вказує на те, що у таких умовах краще проводити добори на стабільність. Mullualem та ін. [17] також зазначають, що середовища з довгими векторами мають сильнішу здатність диференціювати генотипи порівняно з середовищами з короткими векторами, такої ж думки і Yan і співавт. [29, 30]. Середовище з малим кутом до середньої осі середовища (АЕА) вважається більш репрезентативним порівняно з іншими тестовими середовищами [31].

Так, 2018 рік в умовах ІР НААН був доволі сприятливим, що відобразилось на загальній продуктивності, а 2018 рік в умовах ОДДС виявився вкрай посушливим і спекотним. Середовище X18 має невелику довжину вектору, тобто його край наближений до початку вісі координат, що характеризує його як середовище із низькою інформативністю для диференціації зразків, тобто відгук зразків гороху на умови цього року, скоріше за все, є односпрямованим. Найкращим розподільним середовищем для нашого дослідження був Us18, його вектор має невеликий кут, достатню довжину та достатньо наближеність до АЕС – середньої координат середовища (рис. 3). Тобто, роки досліджень за гідротермічним режимом у точках випробування були дійсно різноманітними для отримання об'єктивної оцінки, як потенціалу продуктивності, так і адаптивних властивостей зразків гороху.

The environments O18 and Ust20 formed a separate megaenvironment without a clear leader. That is, this approach highlights the best genotypes for each megaenvironment. The polygonal view of the GGE biplot, which separates environments to recommend appropriate genotypes for different megaenvironments, is consistent with several studies on pea (*Pisum sativum* L.) [21, 22, 23, 24] and other legumes (*Cajanus cajan* (L.) Millspaugh [25], *Lathyrus sativus* [26] and *Vicia faba* L. [27]). Genotypes identified in such studies are promising for inclusion in complex breeding strategies aimed at optimizing the stability of genotype-environment interactions and improving yield stability under different environmental conditions [28].

In addition to taking into account genotype-environment interactions, another advantage of GGE biplot analysis is the characterization of research locations or test environments. Thus, the markers of the environments Kh20 and O20 (Fig. 2) are long-vector, but their angles of inclination to the abscissa axis are quite large, indicating that it is better to select for stability in such conditions. Mullualem et al. [17] also noted that environments with longer vectors showed a stronger ability to differentiate genotypes compared to environments with shorter vectors, and Yan et al. [29, 30] shared the same opinion. Environments with smaller angles to the average environment axis (AEA) are considered more representative compared to other test environments [31].

Thus, 2018 at YPPI NAAS was quite favorable, which was reflected in the overall productivity, and 2018 at OSES turned out to be extremely dry and hot. The environment Kh18 has a short vector and its edge is close to the origin of coordinates, which characterizes it as an environment with low informativeness for the differentiation of accessions, that is, the responses of pea accessions to the conditions of this year are most likely unidirectional. The best differentiating environment in our study was Ust18, as its vector has a small angle, is sufficiently long and close to the average environment coordinate (AEC) (Fig. 3). Indeed, the study years were characterized by diverse hydrothermal regimes at the test sites, enabling us to objectively assess both the performance potentials and adaptability of the pea accessions.

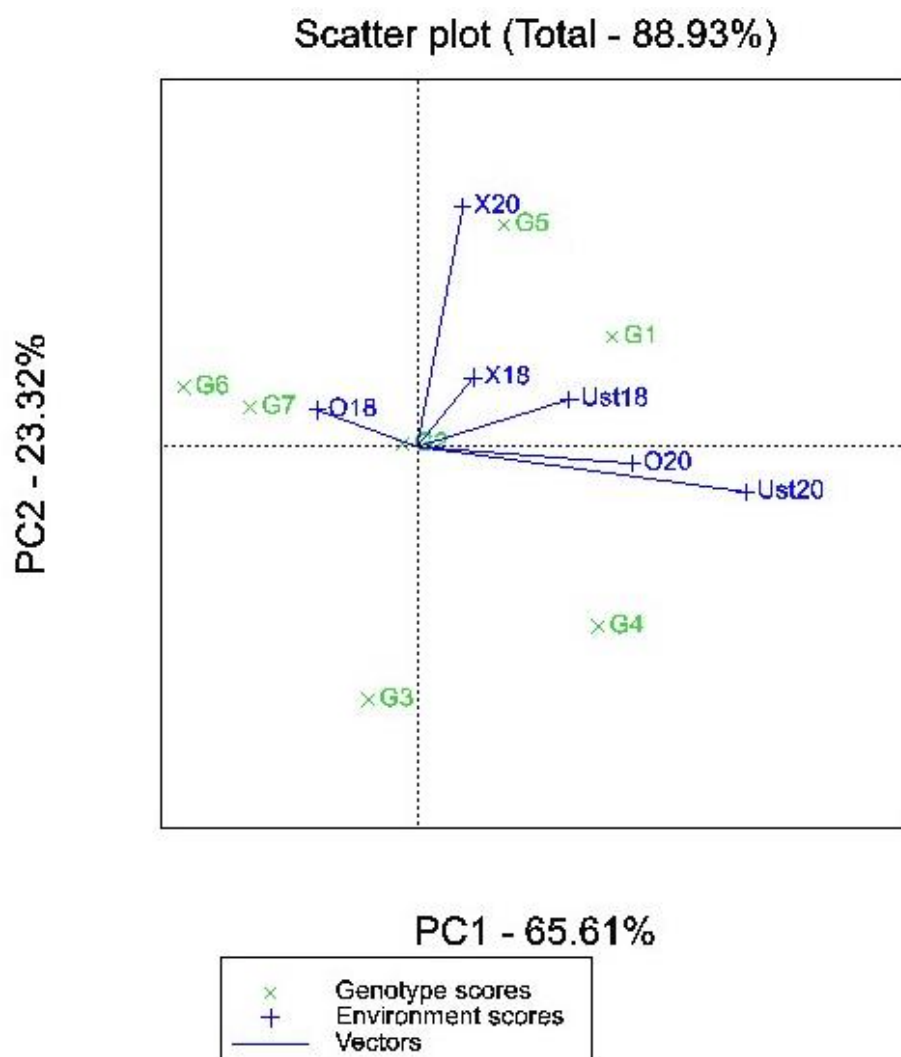


Рис. 2. GGE biplot: інформативність середовищ випробування, ІР НААН-ОДДС-УДС
Fig. 2. GGE biplot: informativeness of the test environments, YPPI NAAS-OSSES-UESPP

Таким чином, умови точок випробування у нашому дослідженні і умови років випробування впродовж вегетації гороху значно відрізнялись. Це дозволяє не тільки оцінити вже створені сорти, а й побачити перспективу існуючих селекційних програм і провести їх коригування.

Ранжування генотипів відносно «ідеального», що у системі GGEbiplot являє собою центр системи центричних кіл (рис. 3), показує, що на відміну від розрахунків AMMI, де найкращим був сорт Гайдук, найбільш наближеним до «ідеального» на рис. 3 є тільки G1 – сорт Оплот. В той же час, генотипи, що потрапили за вертикальну вісь, не показали ні значного потенціалу продуктивності, ні високої стабільності у нашому дослідженні.

Thus, the conditions at the test locations in our study and the conditions of the test years during the pea growing periods differed significantly. This allowed us not only to evaluate the existing cultivars but also to see the prospects of current breeding programs and make their adjustments.

Ranking of genotypes relative to the “ideal” one, which is in the center of the centric circles in the GGEbiplot (Fig. 3), shows that unlike AMMI calculations, where cv. ‘Haiduk’ was the best genotype, only G1 (cv. ‘Oplot’) was positioned closest to the “ideal” genotype in Fig. 3. At the same time, the genotypes that fell behind the vertical axis showed neither significant performance potential nor high stability in our study.

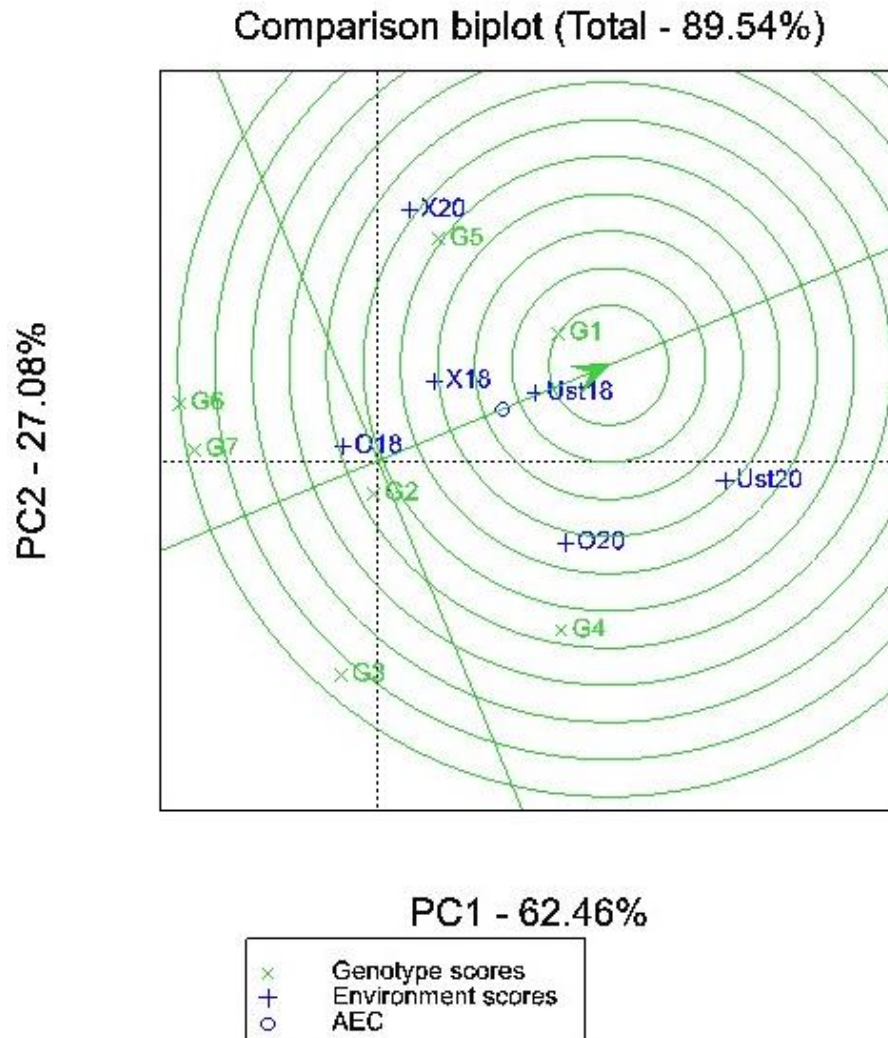


Рис. 3. GGE biplot: стабільність і урожайність зразків відносно «ідеального» генотипу, ІР НААН-ОДДС-УДС
Fig. 3. GGE biplot: yield amount and stability of the accessions relative to the “ideal” genotype, YPPI NAAS-OSSES-UESPP

На рис. 4 представлені проєкції генотипів залежно від середнього значення урожайності і виявленої стабільності.

Напрямок стрілки показує її додатний кінець і, відповідно, розподіляє генотипи за продуктивністю – ближче до стрілки більш продуктивний, а найвіддаленіший – найменш продуктивний генотип. Вертикальна вісь показує стабільність і зразки, які мають високу варіабельність показника урожайності, мають довгі вектори.

Генотип G1 (Оплот) найкращий і за рівнем урожайності, і за рівнем стабільності у випробуванні ІР НААН-ОДДС-УДС (рис. 4), а генотипи G4 (Меценат) та G5 (Гайдук), хоча і мали високий рівень урожайності, але відрізнялись нестабільним її проявом.

Fig. 4 presents projections of genotypes depending on the mean yield and stability.

The direction of the arrow shows its positive end and, accordingly, distributes genotypes by performance: more productive genotypes are closer to the arrow, while the least productive genotype is the furthest from the arrow. The vertical axis shows stability and accessions with highly variable yields have long vectors.

Genotype G1 (cv. ‘Oplot’) was the best in terms of both yield and stability in the trials at YPPI NAAS, OSSES and UESPP (Fig. 4); genotypes G4 (cv. ‘Metsenat’) and G5 (cv. ‘Haiduk’), although they produced high but unstable yields.

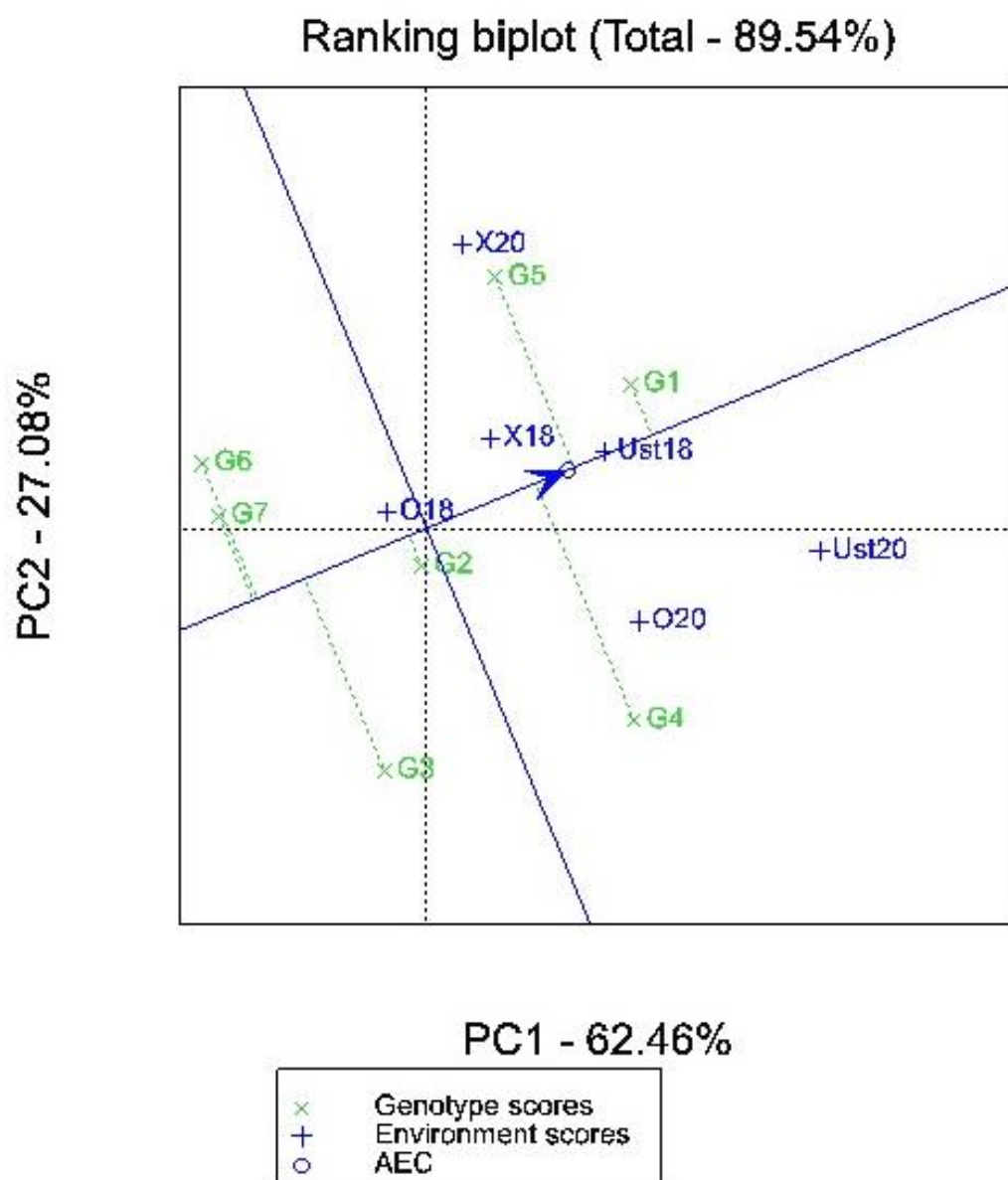


Рис. 4. GGEbiplot: середня урожайність та стабільність, ІР НААН-ОДДС-УДС
Fig. 4. GGEbiplot: mean yield and stability, YPPI NAAS-OSSES-UESPP

На рис. 5 представлений графік GGEbiplot: «ідеальне середовище». Така ж система концентричних кіл із центром у вигляді стрілки розподіляє середовища випробування за відношенням до «ідеального», як і на рис. 5, де представлено розподіл сортів і ліній гороху щодо «ідеального генотипу».

Точки Ust18 та Ust20 на рис. 5 для розрахунку для умов випробування ІР НААН-ОДДС-УДС виявились «ідеальним середовищем» порівняно з точками O18, O20, X18 та X20, які розташовані далеко від центру.

The GGEbiplot in Fig. 5 shows the “ideal environment”. The concentric circles with an arrow in the center distribute the test environments in relation to the “ideal” one, like in Fig. 3, where the pea cultivars and lines are distributed in relation to the “ideal genotype”.

The environments Ust18 and Ust20 in Fig. 5 turned out to be an “ideal environment” compared to the environments O18, O20, Kh18, and Kh20, which are located far from the center.

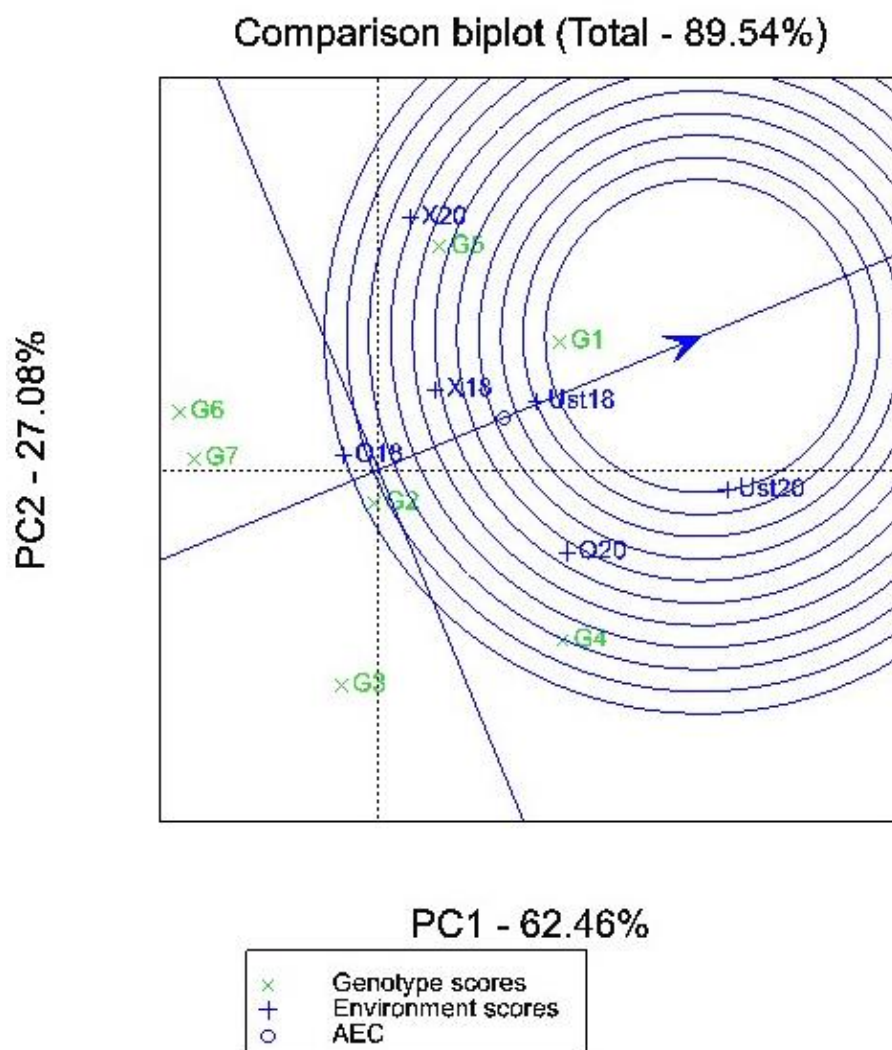


Рис. 5. GGE biplot: «ідеальне середовище», IP НААН-ОДДС-УДС
Fig. 5. GGE biplot: “ideal environment”, YPPI NAAS-OSSES-UESPP

Якщо подивитись на рівень урожайності зразків гороху, що представлений на графіках (рис. 1, 2) та у табл. 1, то можна зробити висновок, що «ідеальне середовище», то не середовище із найбільшим рівнем урожайності, а, скоріш за все, те середовище, де зразки показують односпрямовану реакцію на умови вирощування із різницею у рівні прояву показника «урожайність» між собою, що зумовлена генетичним наповненням сорту. Це наочно демонструє рис. 6 – GGEbiplot: інформативність середовища.

На цих рисунках розподіл за інформативністю представлений таким же чином, як і на рис. 4 (рівень середньої урожайності і стабільності для зразків).

Considering the pea yields in the graphs (Fig. 1, 2) and Table 1, we can conclude that the “ideal environment” is not the environment with the highest yield, but rather the environment where cultivars respond unidirectionally to growing conditions, with inter-cultivar differences in yield determined by genetic features of cultivars. This is clearly illustrated by Fig. 6.

In these figures, the distribution of the environments by informativeness is visualized in the same way as in Fig. 4 (mean yield and stability for the accessions).

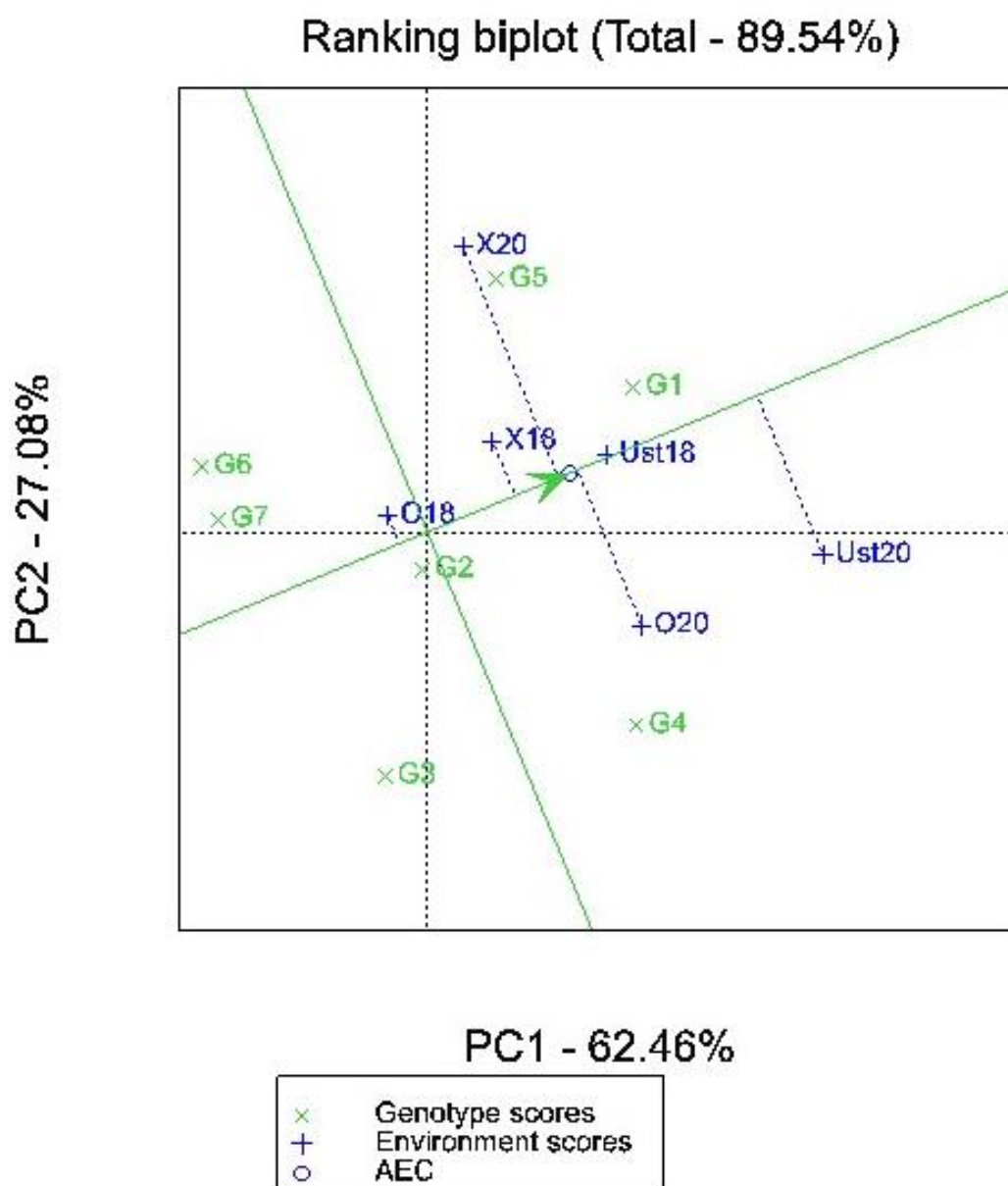


Рис. 6. GGEbiplot: інформативність середовища, ІР НААН–ОДДС–УДС
Fig. 6. GGEbiplot: informativeness of the environments, YPPI NAAS-OSSES-UESPP

Так, середовище X18 було більш інформативним, ніж X20 та O20 – довгий вектор до вісі АЕС показує різноспрямованість у цих точках (роках) реакції зразків, що проходили випробування. На рис. 6 точка Ust18 розташована безпосередньо на осі АЕС, а точка Ust20 розташована на відстані і має недовгий вектор. Найдовший вектор на цьому рисунку у точці X20, на відміну від точки X18, у якої вектор зовсім короткий. Тобто у розрахунку для ІР НААН–ОДДС–УДС найбільш інформативні точки Ust18 та X18.

The environment Kh18 was found to be more informative than Kh20 and O20: a long vector to the AEC shows the multidirectionality of the accessions' responses at these sites (years). In Fig. 6, the environment Ust18 is located right on the AEC, and the environment Ust20 is located at a distance and has a short vector. The environment Kh20 has the longest vector in this figure, unlike the environment Kh18 with a very short vector. That is, Ust18 and Kh18 are the most informative environments in the YPPI NAAS-OSSES-UESPP trials.

Висновки

З огляду на отримані результати, можна дійти висновку, що створені в Інституті рослинництва сорти гороху добре реалізують свій потенціал в широкому діапазоні зон вирощування, що свідчить про ефективність селекційного процесу.

Таким чином, екологічне випробування і досі є дієвим і інформативним дослідженням. А проведений аналіз отриманих результатів в системі алгоритмів AMMI та GGE biplot аналізів надає вичерпну інформацію про всі елементи екологічного випробування, як середовища (їх інформативність і відмінність), так і генотипи (рівень урожайності і його стабільність), а також їх взаємодію.

Conclusions

Having analyzed the results, we can conclude that the pea cultivars bred at the YPPI NAAS fulfil their potentials well in a wide range of growing zones, indicating the effectiveness of breeding algorithms.

Thus, environmental trials are still an effective and informative approach and analysis of data by AMMI and GGE biplot methods provides comprehensive information about all elements of an environmental trial, both environments (their informativeness, i.e. differentiating capacity, and differences) and genotypes (yield amount and stability), and genotype-environment interactions.

References

1. Eberhart S. A., Russell W. A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 1966. Vol. 6(1). P. 36–40.
2. Yan W., Pageau D., Frégeau-Reid J., Durand J. Assessing the representativeness and repeatability of test locations for genotype evaluation. *Crop Sci.* 2011. Vol. 51(4). P. 1603–1610. [10.2135/cropsci2011.01.0016](https://doi.org/10.2135/cropsci2011.01.0016)
3. Yang X., Soliman A. A., Hu C., Yang F., Lv M., Yu H., Wang Y., Zheng A., Dai Z., Li Q., Yang Y., Yang J., Zhang Y., Niu W., Wang L., He Y. Yield Adaptability and Stability in Field Pea Genotypes Using AMMI, GGE, and GYT Biplot Analyses. *Agriculture*. 2023. Vol. 13. 1962. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101962>
4. Ansarifard I., Mostafavi K., Khosroshahli M., Bihanta Reza M., Ramshini H. A study on genotype–environment interaction based on GGE biplot graphical method in sunflower genotypes (*Helianthus annuus* L.). *Food Sci. Nutr.* 2020. 00:1–8. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1610>.
5. Yihunie T. A., Gesesse C. A. GGE Biplot Analysis of Genotype by Environment Interaction in Field Pea (*Pisum sativum* L.) Genotypes in Northwestern Ethiopia. *J. Crop Sci. Biotechnol.* 2018. Vol. 21. P. 67–74. <https://doi.org/10.1007/s12892-017-0099-0>
6. Girgel U., Cokkizgin A. GGE BILOT analysis in wild (*Pisum sativum* L. subsp. *elatius* and subsp. *sativum*) and cultivated pea (*Pisum sativum* L.) genotypes in Northern and Southern Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2020. Vol. 18(1). P. 1237–1251. https://doi.org/10.15666/aeer/1801_12371251
7. Moraes Cunha Gonçalves G., Ferreira-Gomes R. L., Almeida Lopes Â. C., Melo Jorge Vieira P. F. Adaptability and yield stability of soybean genotypes by REML/BLUP and GGE Biplot. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. 2020. Vol. 20(2). e282920217. <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332020v20n2a33>
8. Solonechnyi P. N. AMMI and GGE biplot analysis of genotype-environment interaction of spring barley lines. *Vavilovskiy Zhurnal Genetiki i Selekcii*. 2017. Vol. 21(6). P. 657–662. <https://doi.org/10.18699/VJ17.283> [in Russian]
9. Bezugla O. M., Kobzyeva L. N., Vus N. M., Solonechnyi P. M. Environmental trials of a model population of *Phaseolus vulgaris* L. in contrast climates. *Plant Breeding and Seed Production*. 2020. Vol. 118. P. 8–21. <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2020.222257>
10. Das A., Parihar A. K., Saxena D., Singh D., Singha K. D., Kushwaha K. P. S., Chand R., Bal R. S., Chandra S., Gupta S. Deciphering genotype-by- environment interaction for targeting test environments and rust resistant genotypes in field pea (*Pisum sativum* L.). *Front. Plant Sci.* 2019. Vol. 10. 825. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00825>
11. Osei O., Abaidoo RC, Opoku A, Rouws JRC, Boddey RM, Ahiabor BDK, Rouws LFM. Native bradyrhizobium strains from ghana can enhance grain yields of field-grown cowpea and groundnut. *Front. Agron.* 2020, 2:2. <https://doi.org/10.3389/fagro.2020.00002>.
12. Methodology of state variety trials of agricultural crops. K., 2000. Issue 1. 100 p. [in Ukrainian]
13. Methodology of state variety trials of agricultural crops. K., 2001. Issue 2. 68 p. [in Ukrainian]
14. GGE biplot. 2011. URL: www.ggebiplot.com

15. Purchase J. L., Hatting H., van Deventer C. S. Genotype $\times$ environment interaction of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in South Africa: II. Stability analysis of yield performance. *South African J. Plant Soil.* 2000. Vol. 17(3). P. 101–107. <https://doi.org/10.1080/02571862.2000.10634878>
16. Amelework A. B., Bairu M. W., Marx R., Laing M., Venter S. L. Genotype $\times$ environment interaction and stability analysis of selected cassava cultivars in South Africa. *Plants.* 2023. Vol. 12(13). 2490. <https://doi.org/10.3390/plants12132490>
17. Mullualem D., Tsega A., Mengie T., Fentie D., Kassa Z., Fassil A., Wondaferew D., Gelaw T. A., Astatkie T. Genotype-by-environment interaction and stability analysis of grain yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes using AMMI and GGE biplot analyses, *Heliyon.* 2024. Vol. 10(12). e32918. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32918>
18. Farshadfar E. Incorporation of AMMI stability value and grain yield in a single non-parametric index (GSI) in bread wheat Pakistan *J. Biol. Sci.* 2008. Vol. 11(14). P. 1791-1796. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.1791.1796>
19. Pour-Aboughadareh A., Khalili M., Pocza P., Olivoto T. Stability indices to deciphering the genotype-by-environment interaction (GEI) effect: an applicable review for use in plant breeding programs *Plants.* 2022. Vol. 11 (3). 414. <https://doi.org/10.3390/plants11030414>
20. Goa Y., Mohammed H., Worku W., Urage E. Genotype by environment interaction and yield stability of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) genotypes in moisture limited areas of Southern Ethiopia *Heliyon.* 2022. Vol. 8(3). e09013. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09013>
21. Achenef G., Yilma G., Yimam K. Assessment of phenotypic stability and adaptability of elite field pea (*Pisum sativum* L.) genotypes in Arsi zone. *Ethiopia J. Agric. Food Res.* 2024. Vol. 18(1). 101427. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101427>
22. Daba S. D., Kiszona A. M., McGee R. J. Selecting high-performing and stable pea genotypes in multi-environmental trial (MET): applying AMMI, GGE-biplot, and BLUP procedures. *Plants.* 2023. Vol. 12. 2343. <https://doi.org/10.3390/plants12122343>
23. Haile GA, Tesfaye D. Response of field pea (*Pisum sativum* L.) genotypes for grain yield in a multi-environment trial in Southeastern Ethiopia. *Heliyon.* 2024. Vol. 10(15). e35233. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35233>
24. Kebede G. Y., Eritro T. A., Gutu D. T. Genotype $\times$ times environment interaction and stability analysis of advanced field pea (*Pisum sativum* L.) genotypes in Southeastern Ethiopia. *Ecol. Genet. Genom.* 2024. Vol. 33. 100302. <https://doi.org/10.1016/j.egg.2024.100302>
25. Rao P. J. M., Sandhyakishore N., Sandeep S., Neelima G., Rao P. M., Das D. M., Saritha A. Evaluation of performance and yield stability analysis based on AMMI and GGE-biplot in promising pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millspaugh] genotypes. *Legum Res.* 2022. Vol. 45(11). P. 1414–1420. <https://doi.org/10.18805/LR-4299>
26. Pourmohammad A., Vaezi B., Jozeyan A., Hassanpouraghdam M. B. GGE biplot analysis of genotype $\times$ environment interaction and forage yield stability in grass pea (*Lathyrus sativus*) genotypes. *Genetika.* 2024. Vol. 56(1). P. 75–87. <https://doi.org/10.2298/GENSR2401075P>
27. Wondaferew D., Mullualem D., Bitewlgn W., Kassa Z. Cultivating sustainable futures: multi-environment evaluation and seed yield stability of faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes by using different stability parameters in Ethiopia. *BMC Plant Biol.* 2024. Vol. 24(1). 1108. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05829-4>
28. Sharma A., Yadav R., Sheoran R., Kumar P. Evaluation of genotype $\times$ environment interactions for seed yield in field pea (*Pisum sativum* L.) genotypes using multivariate analysis model. *Euphytica* 2025, 221:58. <https://doi.org/10.1007/s10681-025-03507-6>
29. Yan W., Tinker N.A. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications *Can. J. Plant Sci.* 2006. Vol. 86(3). :P. 623-645. <https://doi.org/10.4141/P05-169>,
30. Yan W., Holland J. B. A heritability-adjusted GGE biplot for test environment evaluation. *Euphytica.* 2010. Vol. 171 (3). P. 355-369. <https://doi.org/10.1007/s10681-009-0030-5>
31. 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. Vol. 28(7). P. 1629-1641. <https://doi.org/10.1007/s00477-013-0821-z>

Надійшла до редакції 20.05.2025 р.
Received 20.05.2025