

Комплексне оцінювання селекційних ліній ячменю ярого за врожайністю, стабільністю та стійкістю до біо- та абіотичних чинників в умовах центральної частини Лісостепу України

В. М. Гудзенко*, Т. П. Поліщук, О. О. Бабій, А. А. Лисенко, Т. В. Юрченко

Миронівський інститут пшениці імені В. М. Ремесла НААН України, вул. Центральна, 68, с. Центральне, Миронівський р-н, Київська обл., 08853, Україна, *e-mail: barley22@ukr.net

Мета. Виділити перспективні селекційні лінії ячменю ярого за комплексом адаптивних ознак в умовах центральної частини Лісостепу України. **Методи.** Польові випробування, лабораторно-польові дослідження посухостійкості, статистичний та графічний аналіз експериментальних даних. **Результати.** Дисперсійним аналізом АММІ моделі встановлено, що найбільший внесок у загальну варіацію (85,78%) мали умови середовища (років досліджень). Значення генотипу становило 8,21%, а взаємодії генотип–середовище – 6,01%. Перші дві головні компоненти як АММІ, так і GGE biplot, охоплювали понад 85% взаємодії генотип–середовище. Краще поєднання врожайності та відносної стабільності за роками відповідно до GGE biplot мали селекційні лінії ячменю ярого 'Дефіцієнс 5162', 'Нутанс 5073' і 'Дефіцієнс 5161'. GYT biplot аналізом визначено, що селекційні лінії 'Дефіцієнс 5162' і 'Нутанс 5073' також суттєво переважали решту генотипів за поєднанням урожайності та низки інших ознак – маси 1000 зерен, посухостійкості, стійкості проти збудників хвороб. Селекційні лінії 'Дефіцієнс 5161', 'Нутанс 4966', 'Нутанс 4705', 'Нутанс 4816', 'Нутанс 5184', 'Нутанс 5193', які перевищували середнє значення в досліді за поєднанням врожайності та низки адаптивних ознак, можуть мати практичну цінність у селекційному процесі для створення нового вихідного матеріалу. **Висновки.** У результаті комплексного оцінювання з використанням графічних моделей АММІ, GGE biplot та GYT biplot виділено селекційні лінії ячменю ярого 'Дефіцієнс 5162' і 'Нутанс 5073' з оптимальним поєднанням урожайності, стабільності, маси 1000 зерен та стійкості до біо- та абіотичних чинників.

Ключові слова: *Hordeum vulgare* L.; взаємодія генотип–середовище; комплекс ознак; АММІ; GGE biplot; GYT biplot.

Вступ

Ячмінь (*Hordeum vulgare* L.) – одна з основних сільськогосподарських культур у світовому землеробстві, яка має широке використання в різних галузях. На основі аналізу історичних даних та порівняльних польових випробувань доведено, що збільшення рівня врожайності ячменю досягнуто, передусім, завдяки створенню і впровадженню у виробництво нових сортів [1–3]. Водночас, унаслідок безперервної мінливості умов довкілля, потреба у створенні нових сортів залишається перманентною. Збільшення амплітуди коливання погодних умов, зумовлене глобальними кліматичними змінами, останніми роками є особливо відчутним [4–6]. Прогнози

на основі різних систем моделювання вказують, що такі зміни будуть відбуватись і надалі, а в певних аспектах навіть суттєво загострюватись, що значною мірою впливатиме на врожайність основних сільськогосподарських культур, зокрема ячменю [7–10]. Отже, поряд з підвищенням потенціалу врожайності, поліпшення адаптивності створюваних сортів – одне зі стрижневих завдань селекції [11–15]. Саме тому, значну увагу вітчизняних та зарубіжних авторів приділено генотип–середовищним випробуванням та пошукам ефективних статистичних або графічних моделей для диференціювання й добору генотипів з оптимальним поєднанням урожайності та стабільності в певних умовах [16–24].

Існування генотипів з відносно широкою адаптацією є можливим, але також лише в межах певного спектру середовищ [25]. Така сукупність умов означена як цільова сукупність середовищ (target population environments) [26, 27]. Однак навіть у межах таких сукупностей середовищ (ґрунти, погодні умови тощо) специфічні для різних генотипів реакції можуть призводити до зміни рангів у рівні вияву певних ознак унаслідок взаємодії генотип–середовище [28]. Перелік

Volodymyr Hudzenko
<https://orcid.org/0000-0002-9738-1203>

Tetiana Polishchuk
<https://orcid.org/0000-0001-9358-9181>

Olha Babii
<https://orcid.org/0000-0003-3395-3732>

Anna Lysenko
<https://orcid.org/0000-0002-2575-5720>

Tetiana Yurchenko
<https://orcid.org/0000-0003-0164-4003>

ознак, що сприяють реалізації певного рівня генетичного потенціалу сорту, визначається агроекологічними умовами й чинниками, які діють на агроценоз ячменю впродовж вегетації [29–45]. Водночас комерційну цінність сорт становить лише за умови, що названі ознаки поєднані з достатнім рівнем узагальнювального інтегрального параметра – урожайності. За низької врожайності, такі генотипи можуть мати значення лише як джерела деяких ознак для використання в селекційних і генетичних дослідженнях.

Для оцінювання й добору генотипів за поєднанням урожайності та комплексу інших ознак нещодавно запропоновано новий методичний підхід – GYT (genotype by yield*trait) biplot [46]. За визначенням авторів, підґрунтям для GYT biplot є зміна парадигми, відповідно до якої генотипи слід оцінювати за поєднанням урожайності з комплексом інших цінних господарських ознак та параметрів (елементи структури врожайності, показники якості зерна, стійкість до біо- та абіотичних чинників тощо).

Мета досліджень – виділити перспективні селекційні лінії ячменю ярого за комплексом адаптивних ознак в умовах центральної частини Лісостепу України.

Матеріали та методика досліджень

Дослідження проводили впродовж 2017–2020 рр. у Миронівському інституті пшениці імені В. М. Ремесла НААН (МІП). Об'єкт – 16 перспективних селекційних ліній ячменю ярого, створених у МІП. Стандарт – сорт яч-

меню ярого ‘Взірець’ селекції Інституту рослинництва імені В. Я. Юр’єва НААН.

Польові досліді закладали в селекційній сівозміні МІП після попередника соя. Агротехніка загальноприйнята для центральної частини Лісостепу України. Сівбу проводили сівалкою СН-10 Ц за настання фізичної стиглості ґрунту (остання декада березня – перша декада квітня). Збирали комбайном Sampo 130 за настання повної стиглості зерна. Облікова площа ділянки – 10 м², повторність – чотириразова. Стійкість проти збудників хвороб та вилягання оцінювали в природних умовах за бальною шкалою відповідно до загальноприйнятої методики [47]. Посухостійкість визначали електролітичним методом [48]. Для докладнішої оцінки генотипів проводили додаткове підсушування відібраного з поля рослинного матеріалу (прапорцевих листків) до втрати ним 50% вологи. Величина інтенсивності виходу електролітів характеризує ступінь пошкодження клітинної мембрани під впливом стресу. Більше числове значення вказує на нижчу посухостійкість.

Для наочної інтерпретації взаємодії генотип–середовище й диференціації генотипів за врожайністю та стабільністю використали АММІ (Additive main effects and multiplicative interaction) і GGE (genotype by genotype–environment interaction) biplot, під час оцінювання за комплексом ознак – GYT biplot. Для побудови графічних візуалізацій використали програму GEA-R. Характеристика, порівняння та переваги АММІ, GGE

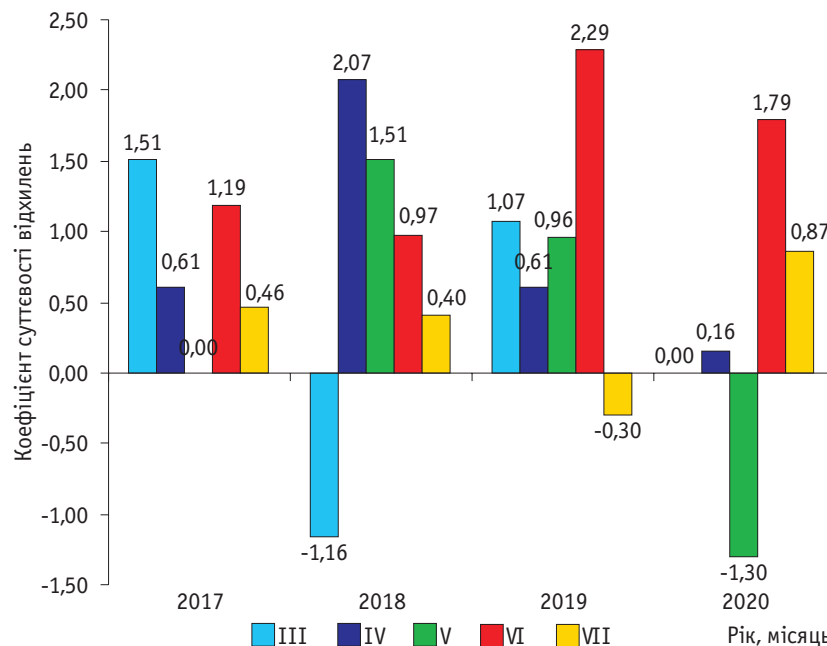


Рис. 1. Коефіцієнт суттєвості відхилень температури повітря від середнього багаторічного значення в передпосівний та вегетаційний періоди ячменю ярого (2017–2020 рр.)

biplot, GYT biplot, а також основні принципи інтерпретації експериментальних даних описано в оригінальних повідомленнях [46, 49–53].

Погодні умови в передпосівний період та впродовж вегетації різнилися за роками досліджень, а також варіювали відносно середніх багаторічних значень (за даними Агрометеостанції Миронівка), що призводило в різні роки до комбінації низки несприятливих біо- та абіотичних чинників. Зміни показників гідротермічного режиму наочно характеризує коефіцієнт суттєвості відхилення [54]. За температурою повітря коефіцієнт суттєвості відхилення фактичних метеоданих від середніх багаторічних указує на загальну тенденцію до відхилення в сторону її підвищення (рис. 1). Особливо критичними, зі значними відхиленнями, у 2017 р.

були березень і червень, у 2018-му – квітень і травень, меншою мірою червень, у 2019-му – червень, менше – березень і травень, у 2020 р. – березень і червень. За період досліджень, як виняток, суттєві відхилення середньомісячної температури повітря в бік її пониження відзначено лише в березні 2018-го і травні 2020 р. Водночас за середньомісячною сумою опадів можемо спостерігати практично прямо протилежну закономірність (рис. 2). Загальна тенденція свідчить про зменшення кількості опадів у більшості місяців упродовж років досліджень. Суттєве переважання кількості опадів над середніми багаторічними показниками спостерігали лише в березні 2018-го й травні 2020 р. Тобто в ті місяці, коли було відзначено й відчутне пониження температури повітря.

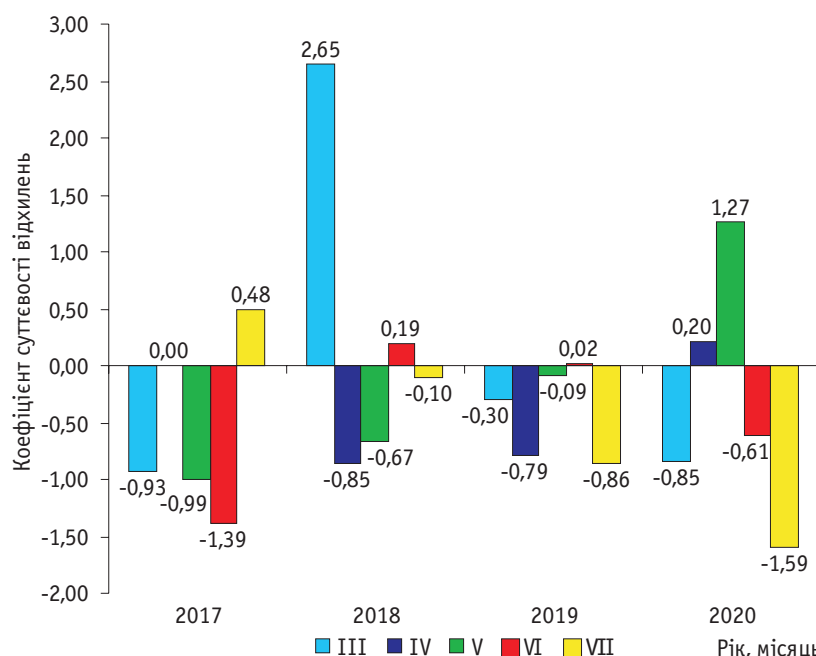


Рис. 2. Коефіцієнт суттєвості відхилення суми опадів від середнього багаторічного значення в передпосівний та вегетаційний періоди ячменю ярого (2017–2020 рр.)

Результати досліджень

У середньому за роки досліджень стандарт G1 'Взірець' за врожайністю достовірно ($HP_{0,05}$) перевищували селекційні лінії G6 'Нутанс 5073', G13 'Дефіцієнс 5162', G12 'Дефіцієнс 5161' і G3 'Нутанс 4816' (табл. 1). У межах похибки перевищили стандарт селекційні лінії G7 'Нутанс 4966', G2 'Нутанс 4705', G4 'Нутанс 4893', G17 'Нутанс 5193', G14 'Нутанс 5184', G11 'Нутанс 5159', G5 'Нутанс 4693' і G10 'Дефіцієнс 5145'. Недостовірно поступалися сорту G1 'Взірець' селекційні лінії G9 'Нутанс 5070', G16 'Нутанс 5191' і G8 'Нутанс 5061'. І лише G15 'Нутанс

5185' мала врожайність, достовірно нижчу за стандарт.

Урожайність досліджених генотипів суттєво варіювала за роками, на що вказує зміна їхньої рангової оцінки (табл. 2). Найбільший розмах варіювання (зміна на 13 рангів) відзначено для селекційних ліній G14 'Нутанс 5184' і G10 'Дефіцієнс 5145'.

Водночас числовий ранг селекційної лінії G14 'Нутанс 5184' змінювався від першого у 2017-му до 14 у 2019 р. Для селекційної лінії G10 'Дефіцієнс 5145' варіювання було від третього рангу у 2020-му до 16 рангу у 2018 і 2019 рр. Селекційна лінія G4 'Нутанс 4893' за роками мала різницю врожайності в 11

Таблиця 1

Урожайність селекційних ліній ячменю ярого, т/га

Сорт, селекційна лінія			Рік випробувань і шифр				Mean
Шифр	Назва, номер	Походження	2017	2018	2019	2020	
			E17	E18	E19	E20	
G1	'Взірець' – St	–	4,66	2,90	4,65	5,07	4,32
G2	Нутанс 4705	'Галактик' / 'Сонцедар'	4,91	3,33	4,77	4,91	4,48
G3	Нутанс 4816	'Аскольд' / 'Сонцедар'	4,76	3,06	5,52	5,43	4,69
G4	Нутанс 4893	'Sebastian' / 'Юкатан'	4,65	3,47	4,74	5,06	4,48
G5	Нутанс 4693	'Сонцедар' / 'Пам'ятний'	4,65	2,98	4,86	5,07	4,39
G6	Нутанс 5073	'Колорит' / 'Ebson'	5,09	3,54	5,51	5,68	4,96
G7	Нутанс 4966	'GBR' / 'Лучезарний'	4,82	3,40	4,69	5,22	4,53
G8	Нутанс 5061	'Philadelphia' / 'Серпанок'	4,47	2,62	4,58	4,82	4,12
G9	Нутанс 5070	'Barke' / 'Сонцедар'	4,82	2,71	4,49	4,96	4,25
G10	Дефіцієнс 5145	'Celinka' / 'Якуб'	5,09	2,70	4,23	5,48	4,38
G11	Нутанс 5159	'Vivaldi' / 'Колорит'	4,68	2,98	4,60	5,33	4,40
G12	Дефіцієнс 5161	'Beatrix' / 'Class'	4,97	3,39	5,17	5,36	4,72
G13	Дефіцієнс 5162	'Beatrix' / 'Class'	5,15	3,56	5,56	5,55	4,96
G14	Нутанс 5184	'Омський 91' / 'Триполь'	5,18	3,05	4,29	5,22	4,44
G15	Нутанс 5185	'Здобуток' / 'Севесо 0554'	4,85	2,79	3,72	4,77	4,03
G16	Нутанс 5191	'Хадар' / 'Нутанс 4149'	4,38	2,85	4,25	5,24	4,18
G17	Нутанс 5193	'Віраж' / 'KWS Aliciana'	4,94	2,88	4,96	5,09	4,47
Mean	–	–	4,83	3,07	4,74	5,19	4,46
Max	–	–	5,18	3,56	5,56	5,68	4,96
Min	–	–	4,38	2,62	3,72	4,77	4,03
R _(Max-Min)	–	–	0,80	0,94	1,84	0,91	0,92
HIP _{0,05}	–	–	0,18	0,18	0,23	0,27	0,22

Примітка. Mean, Max, Min, R_(Max-Min) – середнє, максимальне, мінімальне значення та розмах варіювання ознаки відповідно.

рангів, G16 'Нутанс 5159' – у 10, а G2 'Нутанс 4705', G3 'Нутанс 4816', G5 'Нутанс 4693' і G15 'Нутанс 5185' – у дев'ять. Таким чином, середнє значення врожайності не характеризує повною мірою здатність досліджених селекційних ліній стабільно формувати певний рівень урожайності в різні за

метеорологічними умовами роки. Ураховуючи наявність перехресної взаємодії генотип-середовище, для диференціювання генотипів застосували різні статистично-графічні моделі.

АММІ. Дисперсійний аналіз АММІ моделі вказує на переважання в загальній дисперсії

Таблиця 2

Ранжування селекційних ліній ячменю ярого за врожайністю залежно від року випробувань

Шифр	E17	E18	E19	E20	Mean	Max	Min	R _(Max-Min)
G1	13	11	10	12	13	13	10	3
G2	7	6	7	15	7	15	6	9
G3	11	7	2	4	4	11	2	9
G4	14	3	8	13	6	14	3	11
G5	15	10	6	11	11	15	6	9
G6	3	2	3	1	1	3	1	2
G7	9	4	9	8	5	9	4	5
G8	16	17	12	16	16	17	12	5
G9	10	15	13	14	14	15	10	5
G10	4	16	16	3	12	16	3	13
G11	12	9	11	6	10	12	6	6
G12	5	5	4	5	3	5	4	1
G13	2	1	1	2	2	2	1	1
G14	1	8	14	9	9	14	1	13
G15	8	14	17	17	17	17	8	9
G16	17	13	15	7	15	17	7	10
G17	6	12	5	10	8	12	5	7

Примітка. Найвищій урожайності відповідає 1 ранг, найнижчій – 17-й; Mean, Max, Min, R_(Max-Min) – середнє, максимальне, мінімальне значення та розмах варіювання рангів відповідно.

частки внеску умов середовища (85,78%) (табл. 3). Значення генотипу становило 8,21%, а взаємодії генотип–середовище – 6,01%.

Перші дві головні компоненти (Factor 1 і Factor 2) охоплюють 86,28% взаємодії генотип–середовище.

Таблиця 3

Дисперсійний аналіз АММІ моделі за врожайністю селекційних ліній ячменю ярого (2017–2020 рр.)

Фактор варіації	Сума квадратів	Кількість ступенів волі	Середній квадрат	Частка внеску у варіацію, %
Генотип	17,42	16	1,09	8,21**
Середовище	182,02	3	60,67	85,78**
Взаємодія	12,75	48	0,27	6,01**
Factor 1*	8,18	18	0,45	64,18**
Factor 2*	2,82	16	0,18	22,10**
Factor 3*	1,75	14	0,12	13,72**
Factor 4*	0,00	12	0,00	0,00
Залишки	4,85	204	0,02	0,00

Примітка. *Factor 1...4 – головні компоненти; ** – достовірно на 1%-му рівні.

АММІ1 biplot (рис. 3) відображає варіансу головних адитивних ефектів (середню врожайність) селекційних ліній (G1...G17) і років випробувань (E17...E20) на горизонтальній осі (YLD) та варіансу мультиплікативних ефектів взаємодії генотип–середовище (селекційна лінія – рік випробувань) на вертикальній осі (Factor 1). Помітно, що найнижчий рівень продуктивності (середнє значення всіх селекційних ліній у досліді) був у середовищі E18, найвищий – у E20. Продуктивність у E17 і E19 була відносно близькою, однак на умови цих років різні селекційні лінії реагували по-різному, на що вказує різнонаправленість векторів середовищ.

Сильно зміщеними в бік вектора середовища E17 були селекційні лінії G10 ‘Дефіцієнс 5145’, G14 ‘Нутанс 5184’, G15 ‘Нутанс 5185’,

середовища E19 – G3 ‘Нутанс 4816’, і меншою мірою – G13 ‘Дефіцієнс 5162’ та G6 ‘Нутанс 5073’. Така закономірність підтверджується й АММІ2 biplot, який відображає мультиплікативні ефекти взаємодії генотип–середовище в площині перших двох головних компонент (Factor 1 і Factor 2) (рис. 4).

GGE biplot. Перші дві головні компоненти GGE biplot пояснюють 85,02% взаємодії генотип–середовище (рис. 5). Найвищу диференціювальну здатність мали умови середовища E19, найнижчу – E20. Середовища E17 і E19 були найвіддаленішими одне від одного, а також характеризувалися нижчою репрезентативністю. Схожими між собою були E18 і E20, які також мали вищу, порівняно з E17 і E19, репрезентативність. Таким чином, середови-

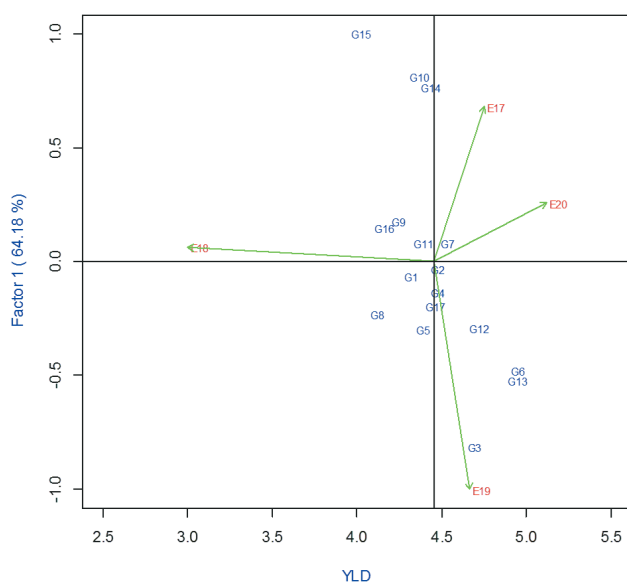


Рис. 3. АММІ1 biplot – дисперсія селекційних ліній ячменю ярого й років випробувань у просторі: середня врожайність (YLD) – головна компонента 1 (Factor 1) (2017–2020 рр.)

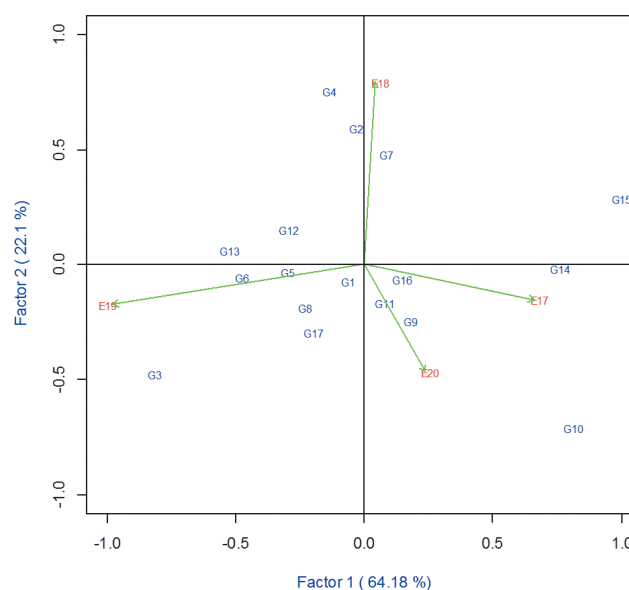


Рис. 4. АММІ2 biplot – мультиплікативні ефекти взаємодії генотип–середовище й дисперсія селекційних ліній ячменю ярого та років випробувань у просторі перших двох головних компонент (2017–2020 рр.)

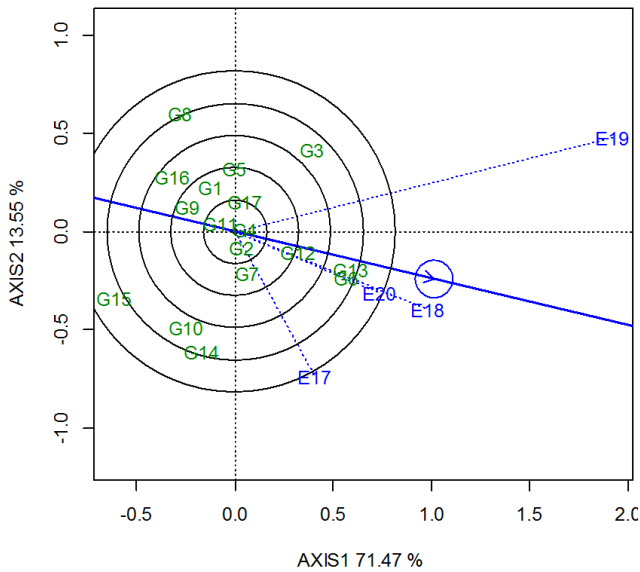


Рис. 5. GGE biplot диференціальної здатності та репрезентативності середовищ (2017–2020 рр.)

ще E18 характеризувався відносно кращим поєднанням репрезентативності та диференціальної здатності. GGE biplot «хто-де-переміг» дає змогу візуалізувати реакцію селекційних ліній на умови середовища (років випробування) (рис. 6). Помітно, що сукупність середовищ E18, E19 і E20 утворили одне мегасередовище, у якому розмістилися селекційні лінії G6 'Нутанс 5073', G13 'Дефіцієнс 5162', G3 'Нутанс 4816', G12 'Дефіцієнс 5161' і G4 'Нутанс 4893'. Суттєвою перевагою в цьому мегасередовищі характеризувалися селекційні лінії G6 'Нутанс 5073' і G13 'Дефіцієнс 5162'. Селекційна лінія G3 'Нутанс 4816' мала сильну специфічну реакцію на умови E19. На лінії, що розмежує сформоване мегасередовище з вузьким сектором, розташовано селек-

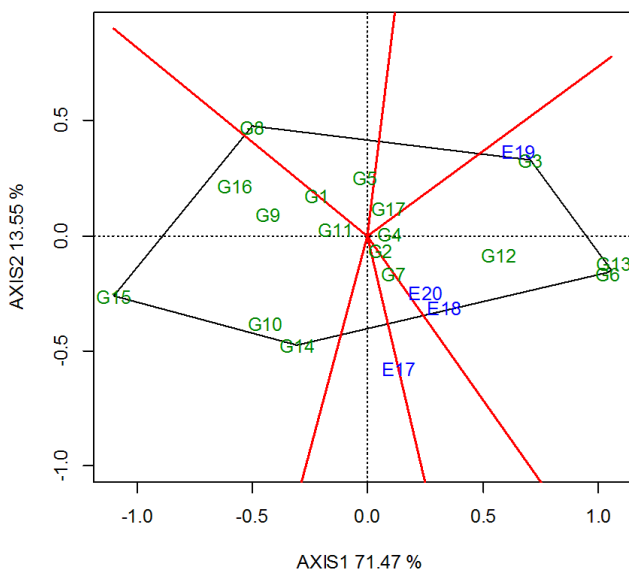


Рис. 6. GGE biplot «хто-де-переміг» (2017–2020 рр.)

ційні лінії G2 'Нутанс 4705' і G7 'Нутанс 4966'. На іншій розмежувальній лінії цього сектора знаходиться середовище E17.

Характеристика селекційних ліній за поєднанням середньої врожайності та стабільності також указує на значну перевагу за середньою врожайністю селекційних ліній G6 'Нутанс 5073' і G13 'Дефіцієнс 5162' (рис. 7). Однак, вони дещо сильніше реагували на умови середовища E19, порівняно із селекційними лініями G12 'Дефіцієнс 5161', G7 'Нутанс 4966', G4 'Нутанс 4893', G2 'Нутанс 4705', G17 'Нутанс 5193'. Сильну специфічну адаптованість до умов середовища E19 підтверджено для селекційної лінії G3 'Нутанс 4816'. Для названої вище групи селекційних ліній характерною була вища ніж середня продуктивність, виражена через одиниці головних компонент. Решта селекційних ліній та стандарт поступалися середньому для вибірки генотипів значенню продуктивності. Серед них сильною реакцією на умови E17 характеризувалися селекційні лінії G14 'Нутанс 5184', G10 'Дефіцієнс 5145' і G15 'Нутанс 5185'. Це вказує на те, що порівняно високий рівень урожайності цих генотипів у 2017 р. (E17), на основі якого вони були залучені до випробувань, не було підтверджено в наступні роки.

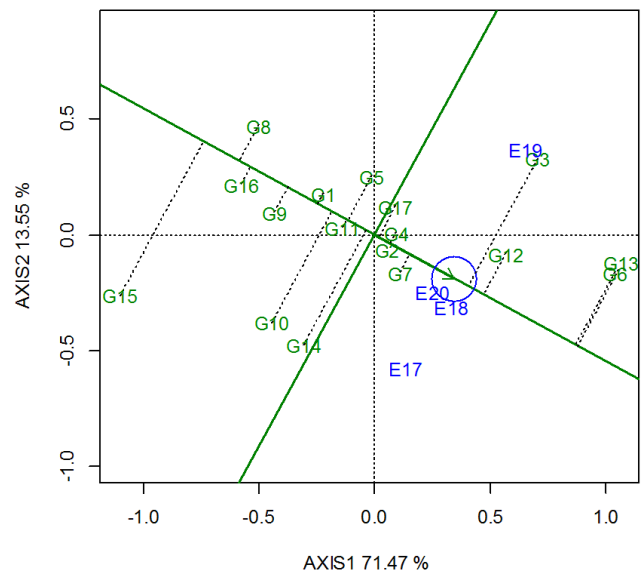


Рис. 7. GGE biplot середньосередовищна координація селекційних ліній ячменю ярого за середньою врожайністю та стабільністю (2017–2020 рр.)

Ранжування відносно «ідеального генотипу» вказує на наближеність до нього селекційних ліній G6 'Нутанс 5073', G13 'Дефіцієнс 5162' і G12 'Дефіцієнс 5161' (рис. 8). Хоча повної відповідності розташування названих генотипів із центром концентричних кіл не було.

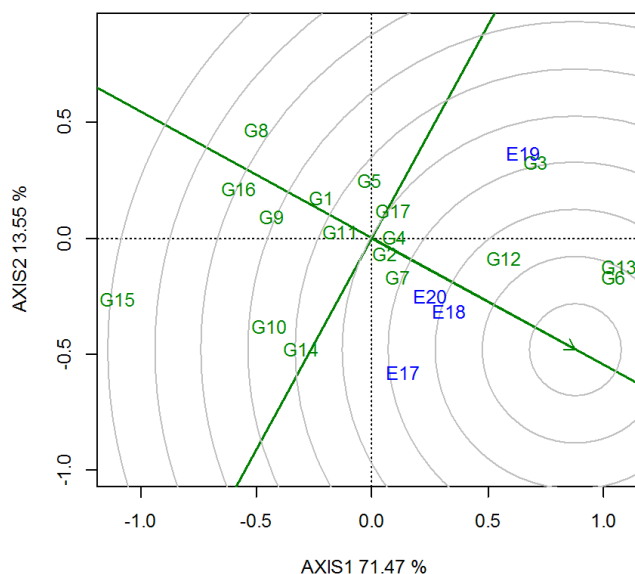


Рис. 8. GGE biplot ранжування селекційних ліній ячменю ярого відносно «ідеального» генотипу (2017–2020 рр.)

GYT biplot. Для комплексної характеристики селекційних ліній, окрім урожайності, урахували посухостійкість, визначену електролітичним методом, стійкість проти хвороб, а також масу 1000 зерен, яка є важливою господарською, технологічною та комерційною ознакою. Стійкість до вилягання досліджених селекційних ліній в усі роки

досліджень була на рівні дев'яти балів, тому дані за ознакою не наведено, а також не включено в подальший статистичний аналіз. У таблиці 4 наведено середні значення комплексу ознак у селекційних ліній ячменю ярого за 2017–2020 рр.

На першому етапі GYT biplot аналізу експериментальні дані за низкою ознак модифікували через їх сполучення з урожайністю. Якщо «ліпшим» є більше числове значення ознаки, використовували множення врожайності на ознаку, а якщо бажаним є менше числове значення (у нашому випадку вихід електролітів) – ділення. На основі проміжної GYT таблиці (не наведено) отримали індексні стандартизовані значення шляхом віднімання даних сполучення врожайність*ознака конкретного генотипу від середнього значення в досліді з подальшим діленням на стандартне відхилення для всієї вибірки (табл. 5). За низкою індексних показників визначено загальний (середній) GYT index, який характеризує комплексну оцінку кожного генотипу.

На основі даних таблиці 5 проведено графічний аналіз. Принципи побудови графіків GYT biplot ті ж самі, що й для GGE biplot, лише з тією різницею, що термін «середовище» замінено на комбінацію «врожайність*ознака». На рисунку 9 помітно, що в

Таблиця 4

Характеристика селекційних ліній ячменю ярого за комплексом ознак (2017–2020 рр.)

Шифр	YLD	TKW	LE	PM	SB	NB	PH
G1	4,32±0,11	44,1±1,61	63,0±2,22	7,5±0,14	7,0±0,20	6,8±0,13	7,0±0,20
G2	4,48±0,15	43,9±1,70	64,0±1,21	6,8±0,13	7,5±0,14	8,0±0,00	7,8±0,13
G3	4,69±0,17	43,7±1,62	69,5±1,90	6,5±0,15	7,5±0,10	7,0±0,20	7,3±0,13
G4	4,48±0,17	42,3±1,47	70,5±1,34	6,8±0,13	7,5±0,20	7,3±0,10	7,3±0,15
G5	4,39±0,14	43,9±1,61	53,5±1,67	7,5±0,10	6,8±0,30	7,0±0,25	6,3±0,23
G6	4,96±0,12	46,5±1,44	43,3±0,49	7,5±0,14	7,5±0,14	7,8±0,13	6,8±0,13
G7	4,53±0,16	45,2±1,43	46,7±1,46	7,5±0,14	7,3±0,13	8,0±0,00	7,3±0,13
G8	4,12±0,19	45,6±1,47	52,8±1,34	7,5±0,15	6,5±0,20	6,5±0,32	6,5±0,20
G9	4,25±0,16	48,1±1,59	60,4±1,37	7,5±0,14	7,3±0,13	6,5±0,32	7,3±0,15
G10	4,38±0,13	41,5±1,46	47,8±1,65	6,5±0,20	7,3±0,15	7,3±0,13	7,3±0,13
G11	4,40±0,10	43,4±1,76	74,4±2,09	7,5±0,14	6,5±0,25	6,8±0,20	6,5±0,20
G12	4,72±0,12	48,2±1,63	70,9±2,85	8,3±0,10	7,5±0,14	7,8±0,13	7,5±0,14
G13	4,96±0,16	47,5±1,43	39,0±0,21	9,0±0,00	8,0±0,10	8,0±0,10	7,8±0,13
G14	4,44±0,14	50,3±1,05	46,9±1,05	6,3±0,13	7,5±0,14	8,0±0,00	6,5±0,14
G15	4,03±0,10	47,5±1,55	75,6±2,07	7,5±0,14	6,5±0,14	6,0±0,20	7,0±0,10
G16	4,18±0,15	44,6±1,73	58,6±2,34	7,0±0,10	7,5±0,14	6,8±0,31	7,3±0,13
G17	4,47±0,15	46,0±1,59	40,4±1,72	7,0±0,15	7,3±0,13	7,0±0,20	7,3±0,13
Mean	4,46	45,4	57,5	7,3	7,2	7,2	7,1
Max	4,96	50,3	75,6	9,0	8,0	8,0	7,8
Min	4,03	41,5	39,0	6,3	6,5	6,0	6,3
R _(Max-Min)	0,92	8,8	36,6	2,8	1,5	2,0	1,5
σ	0,26	2,3	12,2	0,7	0,4	0,6	0,4

Примітка. YLD – урожайність, т/га; TKW – маса 1000 зерен, г; LE – витік електролітів, %; PM – стійкість проти борошнистої роси, бал; SB – стійкість проти темно-бурої плямистості, бал; NB – стійкість проти сітчастої плямистості, бал; PH – стійкість проти карликової іржі, бал; Mean, Max, Min, R_(Max-Min) – середнє, максимальне, мінімальне значення ознаки і розмах варіювання, відповідно; σ – стандартне відхилення.

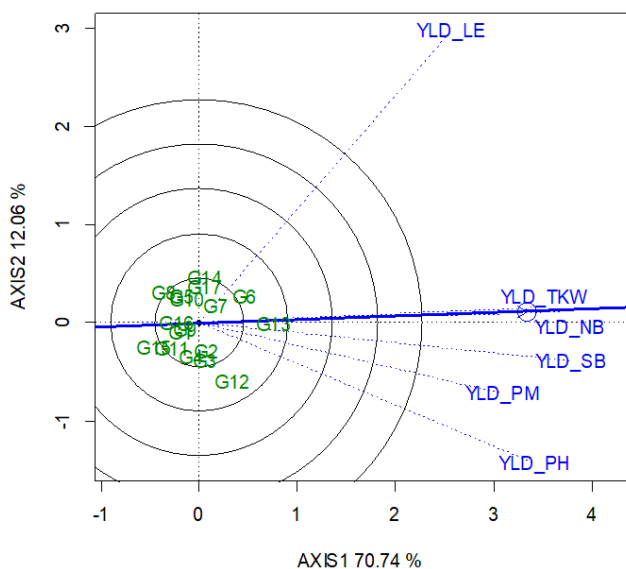
Таблиця 5

Індексні стандартизовані значення сполучення врожайності та інших ознак у селекційних ліній ячменю ярого (2017–2020 рр.)

Шифр	YLD_TKW	YLD_LE	YLD_PM	YLD_SB	YLD_NB	YLD_PH	GYT index
G1	-0,72	-0,51	-0,04	-0,58	-0,69	-0,43	-0,49
G2	-0,36	-0,49	-0,55	0,38	0,84	1,01	0,14
G3	0,16	-0,79	-0,49	0,84	0,16	0,79	0,11
G4	-0,77	-0,97	-0,55	0,38	0,07	0,29	-0,26
G5	-0,59	0,22	0,08	-0,75	-0,33	-1,32	-0,45
G6	1,65	1,50	1,09	1,40	1,43	0,60	1,28
G7	0,13	0,85	0,34	0,17	0,94	0,41	0,47
G8	-0,87	0,07	-0,39	-1,56	-1,23	-1,53	-0,92
G9	0,11	-0,37	-0,17	-0,42	-1,05	-0,25	-0,36
G10	-1,25	0,63	-0,98	-0,15	-0,10	0,05	-0,30
G11	-0,70	-1,29	0,10	-1,05	-0,57	-0,96	-0,75
G12	1,48	-0,88	1,51	0,90	1,02	1,23	0,88
G13	1,95	1,85	2,84	2,11	1,72	2,19	2,11
G14	1,21	0,74	-1,15	0,29	0,76	-0,88	0,16
G15	-0,65	-1,53	-0,55	-1,73	-1,83	-1,07	-1,23
G16	-0,95	-0,29	-0,78	-0,26	-0,91	-0,40	-0,60
G17	0,18	1,25	-0,31	0,04	-0,21	0,26	0,20

Примітка. YLD_TKW – поєднання врожайності й маси 1000 зерен; YLD_LE – поєднання врожайності й посухостійкості; YLD_PM – поєднання врожайності й стійкості проти борошнистої роси; YLD_SB – поєднання врожайності й стійкості проти темно-бурої плямистості; YLD_NB – поєднання врожайності й стійкості проти сітчастої плямистості; YLD_PH – поєднання врожайності й стійкості проти карликової іржі; GYT index – загальний індекс генотипу за поєднанням урожайності з іншими ознаками.

цьому разі практично всі поєднання врожайності та ознак мали досить високу диференціювальну здатність, на що вказує довжина векторів. Водночас найменш репрезентативними були поєднання ознак урожайності та посухостійкості (YLD_LE), а також урожайності й стійкості проти карликової іржі (YLD_PH). YLD_LE і YLD_PH



Примітка. Тут і на рисунках 10–12 шифрування генотипів відповідають значенням, наведеним у таблиці 1, позначення поєднання врожайності й ознак – у таблиці 5.

Рис. 9. GYT biplot диференціювальної здатності та репрезентативності за поєднанням урожайності з іншими ознаками (2017–2020 рр.)

водночас були й найвіддаленішими одне від одного. Як високою репрезентативністю, так і диференціювальною здатністю, характеризувалися поєднання врожайності й маси 1000 зерен (YLD_TKW) та врожайності й стійкості проти сітчастої плямистості (YLD_NB).

Як впливає з даних рисунка 10, селекційні лінії G13 'Дефіцієнс 5162', G12 'Дефіцієнс 5161', G6 'Нутанс 5073', а також G7 'Нутанс 4966', потрапили до одного сектора (мегасередовища), де також були й більшість поєднань ознак. На межі цього мегасередовища розташовано селекційні лінії G2 'Нутанс

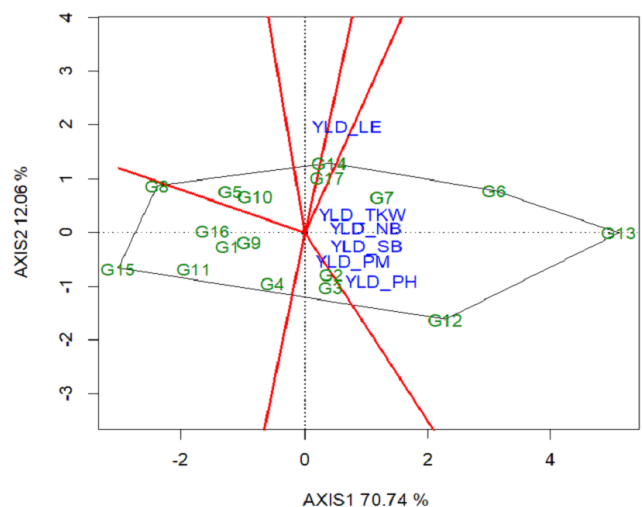


Рис. 10. GYT biplot «хто-де-переміг» за поєднанням урожайності з іншими ознаками (2017–2020 рр.)

4705' і G3 'Нутанс 4816'. Поєднання YLD_LE потрапило до вузького сектора з лише двома генотипами – G14 'Нутанс 5184' і G17 'Нутанс 5193'.

GYT biplot за рівнем вияву поєднання ознак і стабільністю (рис. 11) указує, що середнє значення в досліді за комплексом досліджених поєднань ознак (в одиницях головних компонент) переважали селекційні лінії G13 'Дефіцієнс 5162', G6 'Нутанс 5073', G12 'Дефіцієнс 5161', G7 'Нутанс 4966', G2 'Нутанс 4705', G3 'Нутанс 4816', G14 'Нутанс 5184', G17 'Нутанс 5193'. Решта селекційних ліній і стандарт їм поступалися, навіть попри те, що для стандарту G1 'Взірець' та селекційних ліній G9 'Нутанс 5070', G16 'Нутанс 5191' характерною була висока стабільність.

Найоптимальніше поєднання високого рівня вияву комплексу ознак та стабільності

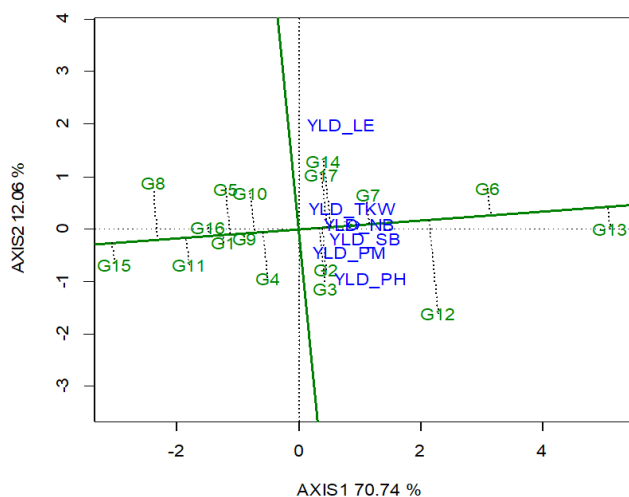


Рис. 11. GYT biplot за рівнем вияву поєднання врожайності з іншими ознаками та стабільністю селекційних ліній ячменю ярого (2017–2020 рр.)

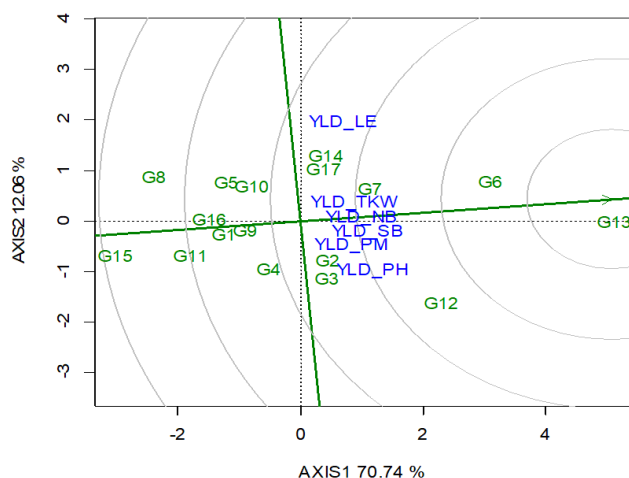


Рис. 12. GYT biplot ранжування селекційних ліній ячменю ярого за поєднанням урожайності та інших ознак щодо «ідеального генотипу» (2017–2020 рр.)

мала селекційна лінія G13 'Дефіцієнс 5162'. Про це свідчить її локалізація в центрі центричних кіл, де теоретично мусить бути «ідеальний генотип» для дослідженої вибірки селекційних ліній (рис. 12). Дещо поступалась їй селекційна лінія G6 'Нутанс 5073', яка розмістилася в наступному колі.

Висновки

У результаті комплексного оцінювання з використанням графічних моделей АММІ, GGE biplot та GYT biplot виділено селекційні лінії ячменю ярого 'Дефіцієнс 5162' і 'Нутанс 5073' з оптимальним поєднанням урожайності, стабільності, маси 1000 зерен, посухостійкості та стійкості проти основних збудників хвороб.

Практичну цінність для залучення в селекційний процес також можуть мати селекційні лінії 'Дефіцієнс 5161', 'Нутанс 4966', 'Нутанс 4705', 'Нутанс 4816', 'Нутанс 5184', 'Нутанс 5193', які переважали середнє значення в досліді за поєднанням урожайності та низки адаптивних ознак.

Використана література

- Psota V., Hartmann J., Sejkorova S. et al. 50 Years of progress in quality of malting barley grown in the Czech Republic. *J. Inst. Brew.* 2009. Vol. 115, Iss. 4. P. 279–291. doi: 10.1002/j.2050-0416.2009.tb00382.x
- Mackay I. J., Horwell A., Garner J. et al. Reanalysis of the historical series of UK variety trials to quantify the contributions of genetic and environmental factors to trends and variability in yield over time. *Theor. Appl. Genet.* 2011. Vol. 122, Iss. 1. P. 225–238. doi: 10.1007/s00122-010-1438-y
- Laidig F., Piepho H.-P., Rentel D. et al. Breeding progress, genotypic and environmental variation and correlation of quality traits in malting barley in German official variety trials between 1983 and 2015. *Theor. Appl. Genet.* 2017. Vol. 130, Iss. 11. P. 2411–2429. doi: 10.1007/s00122-017-2967-4
- Smith P., Gregory P. J. Climate change and sustainable food production. *Proc. Nutr. Soc.* 2013. Vol. 72, Iss. 1. P. 21–28. doi: 10.1017/S0029665112002832
- Moore F. C., Lobell D. B. The fingerprint of climate trends on European crop yields. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2015. Vol. 112, Iss. 9. P. 2670–2675. doi: 10.1073/pnas.1409606112
- Hakala K., Jauhiainen L., Rajala A. A. et al. Different responses to weather events may change the cultivation balance of spring barley and oats in the future. *Field Crops Res.* 2020. Vol. 259. Art. 107956. doi: 10.1016/j.fcr.2020.107956
- Rötter R. P., Palosuo T., Kersebaum K. C. et al. Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: A comparison of nine crop models. *Field Crops Res.* 2012. Vol. 133. P. 23–36. doi: 10.1016/j.fcr.2012.03.016
- Alemayehu F. R., Frenck G., van der Linden L. et al. Can barley (*Hordeum vulgare* L. s.l.) adapt to fast climate changes? A controlled selection experiment. *Genet. Resour. Crop. Evol.* 2014. Vol. 61, Iss. 1. P. 151–161. doi: 10.1007/s10722-013-0021-1
- Ingvordsen C. H., Backes G., Lyngkjær M. F. et al. Significant decrease in yield under future climate conditions: stability and production of 138 spring barley accessions. *Eur. J. Agron.* 2015. Vol. 63. P. 105–113. doi: 10.1016/j.eja.2014.12.003
- Yawson D. O., Ball T., Adu M. O. et al. Simulated regional yields of spring barley in the United Kingdom under projected climate change. *Climate.* 2016. Vol. 4. Art. 54. doi: 10.3390/cli4040054

11. Tambussi E.A., Nogués S., Ferrio P. et al. Does higher yield potential improve barley performance in Mediterranean conditions? A case study. *Field Crops Res.* 2005. Vol. 91, Iss. 2–3. P. 149–160. doi: 10.1016/j.fcr.2004.06.002
12. Araus J. L., Slafer G. A., Royo C., Serret M. D. Breeding for yield potential and stress adaptation in cereals. *Crit. Rev. Plant Sci.* 2008. Vol. 27, Iss. 6. P. 377–412. doi: 10.1080/07352680802467736
13. Dawson I. K., Russell J., Powell W. et al. Barley: a translational model for adaptation to climate change. *New Phytol.* 2015. Vol. 206, Iss. 3. P. 913–931. doi: 10.1111/nph.13266
14. Macholdt J., Honermeier B. Impact of climate change on cultivar choice: adaptation strategies of farmers and advisors in German cereal production. *Agronomy.* 2016. Vol. 6, Iss. 3. Art. 40. doi: 10.3390/agronomy6030040
15. Gilliham M., Able J. A., Roy S. J. Translating knowledge about abiotic stress tolerance to breeding programmes. *Plant J.* 2017. Vol. 90, Iss. 5. P. 898–917. doi: 10.1111/tpj.13456
16. Mühleisen J., Piepho H.-P., Maurer H. P. et al. Exploitation of yield stability in barley. *Theor. Appl. Genet.* 2014. Vol. 127, Iss. 9. P. 1949–1962. doi: 10.1007/s00122-014-2351-6
17. Pržulj N., Miroslavljević M., Čanak P. et al. Evaluation of spring barley performance by biplot analysis. *Cereal Res. Commun.* 2015. Vol. 43, Iss. 4. P. 692–703. doi: 10.1556/0806.43.2015.018
18. Solonechnyi P., Vasko N., Naumov A. et al. GGE biplot analysis of genotype by environment interaction of spring barley varieties. *Zemdirbyste-Agriculture.* 2015. Vol. 102, Iss. 4. P. 431–436. doi: 10.13080/z-a.2015.102.055
19. Vaezi B., Pour-Aboughadareh A., Mohammadi R. et al. GGE biplot and AMMI analysis of barley yield performance in Iran. *Cereal Res. Commun.* 2017. Vol. 45, Iss. 3. P. 500–511. doi: 10.1556/0806.45.2017.019
20. Solonechnyi P., Kozachenko M., Vasko N. et al. AMMI and GGE biplot analysis of yield performance of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties in multi environment trials. *Agriculture and Forestry.* 2018. Vol. 64, Iss. 1. P. 121–132. doi: 10.17707/AgricultForest.64.1.15
21. Al-Ghzawi A. L. A., Al-Ajlouni Z. I., Al Sane K. O. et al. Yield stability and adaptation of four spring barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars under rainfed conditions. *Res. Crops.* 2019. Vol. 20, Iss. 1. P. 10–18. doi: 10.31830/2348-7542.2019.002
22. Kendal E., Karaman M., Tekdal S., Doğan S. Analysis of promising barley (*Hordeum vulgare* L.) lines performance by AMMI and GGE biplot in multiple traits and environment. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 2019. Vol. 17, Iss. 2. P. 5219–5233. doi: 10.15666/aeer/1702_52195233
23. Verma A., Kumar V., Kharab A. S., Singh G. P. AMMI model to estimate G×E for grain yield of dual purpose barley genotypes. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 2019. Vol. 8, Iss. 5. P. 1–7. doi: 10.20546/ijcmas.2019.805.001
24. Al-Sayaydeh R., Al-Bawalize A., Al-Ajlouni Z. et al. Agronomic evaluation and yield performance of selected barley (*Hordeum vulgare* L.) landraces from Jordan. *Int. J. Agron.* 2019. Art. 9575081. doi: 10.1155/2019/9575081
25. Ceccarelli S. Wide adaptation. How wide? *Euphytica.* 1989. Vol. 40, Iss. 3. P. 197–205. doi: 10.1007/BF00024512
26. Chenu K. Characterizing the crop environment – nature, significance and applications. *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy* / V. O. Sadras, D. F. Calderini (Eds). London, UK : Academic Press. 2015. P. 321–348. doi: 10.1016/B978-0-12-417104-6.00013-3
27. Bustos-Korts D., Malosetti M., Chenu K. et al. From QTLs to adaptation landscapes: using genotype-to-phenotype models to characterize G×E over time. *Front. Plant Sci.* 2019. Vol. 10. Art. 1540. doi: 10.3389/fpls.2019.01540
28. Chenu K., Deihimfard R., Chapman S. C. Large-scale characterization of drought pattern: a continent-wide modeling approach applied to the Australian wheatbelt – spatial and temporal trends. *New Phytol.* 2013. Vol. 198, Iss. 3. P. 801–820. doi: 10.1111/nph.12192
29. Ceccarelli S., Grando S. Selection environment and environmental sensitivity in barley. *Euphytica.* 1991. Vol. 57, Iss. 2. P. 157–167. doi: 10.1007/BF00023074
30. Ceccarelli S., Grando S. Environment of selection and type of germ-plasm in barley breeding for stress conditions. *Euphytica.* 1991. Vol. 57, Iss. 3. P. 207–219. doi: 10.1007/BF00039667
31. Ceccarelli S., Grando S., Hamblin J. Relationship between barley grain yield measured in low- and high-yielding environments. *Euphytica.* 1992. Vol. 64, Iss. 1–2. P. 49–58. doi: 10.1007/BF00023537
32. Oosterom E. J. van, Acevedo E. Adaptation of barley (*Hordeum vulgare* L.) to harsh Mediterranean environments III. Plant ideotype and grain yield. *Euphytica.* 1992. Vol. 62, Iss. 1. P. 29–38. doi: 10.1007/BF00036084
33. Ceccarelli S. Specific adaptation and breeding for marginal conditions. *Euphytica.* 1994. Vol. 77, Iss. 3. P. 205–219. doi: 10.1007/BF02262633
34. Ceccarelli S. Adaptation to low/high input cultivation. *Euphytica.* 1996. Vol. 92, Iss. 1–2. P. 203–214. doi: 10.1007/BF00022846
35. Ceccarelli S., Grando S., Impiglia A. Choice of selection strategy in breeding barley for stress environments. *Euphytica.* 1998. Vol. 103, Iss. 3. P. 307–318. doi: 10.1023/A:1018647001429
36. Teulat B., Merah O., Souyris I., This D. QTLs for agronomic traits from a Mediterranean barley progeny grown in several environments. *Theor. Appl. Genet.* 2001. Vol. 103, Iss. 5. P. 774–787. doi: 10.1007/s001220100619
37. Ceccarelli S., Grando S., Baum M. Participatory plant breeding in water-limited environment. *Exp. Agric.* 2007. Vol. 43, Iss. 4. P. 411–435. doi: 10.1017/S0014479707005327
38. Teulat B., Zoumarou-Wallis N., Rötter B. et al. QTL for relative water content in field-grown barley and their stability across Mediterranean environments. *Theor. Appl. Genet.* 2003. Vol. 108, Iss. 1. P. 181–188. doi: 10.1007/s00122-003-1417-7
39. Garcia del Moral L. F., Garcia del Moral M. B., Molina-Cano J. L., Slafer G. A. Yield stability and development in two- and six-rowed winter barleys under Mediterranean conditions. *Field Crops Res.* 2003. Vol. 81, Iss. 2–3. P. 109–119. doi: 10.1016/S0378-4290(02)00215-0
40. Baum M., Grando S., Backes G. et al. QTLs for agronomic traits in the Mediterranean environment identified in recombinant inbred lines of the cross 'Arta' × *H. spontaneum* 41-1. *Theor. Appl. Genet.* 2003. Vol. 107, Iss. 7. P. 1215–1225. doi: 10.1007/s00122-003-1357-2
41. Korff M. von, Grando S., Del Greco A. et al. Quantitative trait loci associated with adaptation to Mediterranean dryland conditions in barley. *Theor. Appl. Genet.* 2008. Vol. 117, Iss. 5. P. 653–669. doi: 10.1007/s00122-008-0787-2
42. Comadran J., Russell J. R., Eeuwijk F. A. van et al. Mapping adaptation of barley to droughted environments. *Euphytica.* 2008. Vol. 161, Iss. 1–2. P. 35–45. doi: 10.1007/s10681-007-9508-1
43. Comadran J., Russell J. R., Booth A. et al. Mixed model association scans of multi-environmental trial data reveal major loci controlling yield and yield related traits in *Hordeum vulgare* in Mediterranean environments. *Theor. Appl. Genet.* 2011. Vol. 122, Iss. 7. P. 1363–1373. doi: 10.1007/s00122-011-1537-4
44. Mohammadi R., Mahmoodi K. N., Haghparast R. et al. Identifying superior rainfed barley genotypes in farmers' fields using participatory varietal selection. *J. Crop Sci. Biotech.* 2011. Vol. 14, Iss. 4. P. 281–288. doi: 10.1007/s12892-010-0106-8
45. Tondelli A., Francia E., Visoni A. et al. QTLs for barley yield adaptation to Mediterranean environments in the 'Nure' × 'Tremois' biparental population. *Euphytica.* 2014. Vol. 197, Iss. 1. P. 73–86. doi: 10.1007/s10681-013-1053-5
46. Yan W., Frégeau-Reid J. Genotype by yield*trait (GYT) biplot: a novel approach for genotype selection based on multiple traits. *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8. Art. 8242. doi: 10.1038/s41598-018-26688-8
47. Бабаянц Л., Мештерхази А., Вехтер Ф. и др. Методы селекции и оценки устойчивости пшеницы и ячменя к болезням в странах-членах СЭВ. Прага, 1988. 321 с.

48. Дорофеев В. Ф., Руденко М. И., Удачин Р. А. Засухоустойчивые пшеницы (методические указания). Ленинград : ВИР, 1974. 186 с.
49. Yan W., Tinker N. A. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications. *Can. J. Plant Sci.* 2006. Vol. 86, Iss. 3. P. 623–645. doi: 10.4141/P05-169
50. Yan W., Kang M. S., Ma B. et al. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Sci.* 2007. Vol. 47, Iss. 2. P. 643–653. doi: 10.2135/cropsci2006.06.0374
51. Gauch H. G., Piepo H.-P., Annicchiarico P. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: further consideration. *Crop Sci.* 2008. Vol. 48, Iss. 3. P. 866–889. doi: 10.2135/cropsci2007.09.0513
52. 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, Iss. 7. P. 1629–1641. doi: 10.1007/s00477-013-0821
53. Hongyu K., Garcia-Pena M., de Araujo L. B., dos Santos Dias C. T. Statistical analysis of yield trials by AMMI analysis of genotype × environment interaction. *Biometrical Letters.* 2014. Vol. 51, Iss. 2. P. 89–102. doi: 10.2478/bile-2014-0007
54. Каленська С. М., Риженко А. С. Оцінювання впливу погодних умов за вирощування соняшнику (*Heliantus annuus* L.) у північній частині Лівобережного Лісостепу. *Plant Var. Stud. Prot.* 2020. Т 16, № 2. С. 162–172. doi: 10.21498/2518-1017.16.2.2020.209229
- ## References
1. Psota, V., Hartmann, J., Sejkorova, S., Louckova, T., & Vejrazka, K. (2009). 50 Years of progress in quality of malting barley grown in the Czech Republic. *J. Inst. Brew.*, 115(4), 279–291. doi: 10.1002/j.2050-0416.2009.tb00382.x
2. Mackay, I. J., Horwell, A., Garner, J., White, J., McKee, J., & Philpott, H. R. (2011). Reanalysis of the historical series of UK variety trials to quantify the contributions of genetic and environmental factors to trends and variability in yield over time. *Theor. Appl. Genet.*, 122(1), 225–238. doi: 10.1007/s00122-010-1438-y
3. Laidig, F., Piepho, H.-P., Rentel, D., Drobek, T., & Meyer, U. (2017). Breeding progress, genotypic and environmental variation and correlation of quality traits in malting barley in German official variety trials between 1983 and 2015. *Theor. Appl. Genet.*, 130(11), 2411–2429. doi: 10.1007/s00122-017-2967-4
4. Smith, P., & Gregory, P. J. (2013). Climate change and sustainable food production. *Proc. Nutr. Soc.*, 72(1), 21–28. doi: 10.1017/S0029665112002832
5. Moore, F. C., & Lobell, D. B. (2015). The fingerprint of climate trends on European crop yields. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 112(9), 2670–2675. doi: 10.1073/pnas.1409606112
6. Hakala, K., Jauhiainen, L., Rajala, A. A., Jalli, M., Kujala, M., & Laine, A. (2020). Different responses to weather events may change the cultivation balance of spring barley and oats in the future. *Field Crops Res.*, 259, 107956. doi: 10.1016/j.fcr.2020.107956
7. Rötter, R. P., Palosuo, T., Kersebaum, K. C., Angulo, C., Bindi, M., Ewert, F., ... Trnka, M. (2012). Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: A comparison of nine crop models. *Field Crops Res.*, 133, 23–36. doi: 10.1016/j.fcr.2012.03.016
8. Alemayehu, F. R., Frenck, G., van der Linden, L., Mikkelsen, T. N., & Jørgensen, R. B. (2014). Can barley (*Hordeum vulgare* L. s.l.) adapt to fast climate changes? A controlled selection experiment. *Genet. Resour. Crop. Evol.*, 61(1), 151–161. doi: 10.1007/s10722-013-0021-1
9. Ingvordsen, C. H., Backes, G. Ø., Lyngkjær, M. F., Peltonen-Sainio, P., Jensen, J. D., Jalli, M., ... Jørgensen, R. B. (2015). Significant decrease in yield under future climate conditions: stability and production of 138 spring barley accessions. *Eur. J. Agron.*, 63, 105–113. doi: 10.1016/j.eja.2014.12.003
10. Yawson, D. O., Ball, T., Adu, M. O., Mohan, S., Mulhollan, B. J., & White, P. J. (2016). Simulated regional yields of spring barley in the United Kingdom under projected climate change. *Climate*, 4, 54. doi: 10.3390/cli4040054
11. Tambussi, E. A., Nogués, S., Ferrio, P., Voltas, J., & Araus, J. L. (2005). Does higher yield potential improve barley performance in Mediterranean conditions? A case study. *Field Crops Res.*, 91(2–3), 149–160. doi: 10.1016/j.fcr.2004.06.002
12. Araus, J. L., Stafer, G. A., Royo, C., & Serret, M. D. (2008). Breeding for yield potential and stress adaptation in cereals. *Crit. Rev. Plant Sci.*, 27(6), 377–412. doi: 10.1080/07352680802467736
13. Dawson, I. K., Russell, J., Powell, W., Steffenson, B., Thomas, W. T. B., & Waugh, R. (2015). Barley: a translational model for adaptation to climate change. *New Phytol.*, 206(3), 913–931. doi: 10.1111/nph.13266
14. Macholdt, J., & Honermeier, B. (2016). Impact of climate change on cultivar choice: adaptation strategies of farmers and advisors in German cereal production. *Agronomy*, 6(3), 40. doi: 10.3390/agronomy6030040
15. Gilliam, M., Able, J. A., & Roy, S. J. (2017). Translating knowledge about abiotic stress tolerance to breeding programmes. *Plant J.*, 90(5), 898–917. doi: 10.1111/tpj.13456
16. Mühleisen, J., Piepho, H.-P., Maurer, H. P., Zhao, Y. S., & Reif, J. C. (2014). Exploitation of yield stability in barley. *Theor. Appl. Genet.*, 127(9), 1949–1962. doi: 10.1007/s00122-014-2351-6
17. Pržulj, N., Mirošavjević, M., Čanak, P., Zorić, M., & Bočanski, J. (2015). Evaluation of spring barley performance by biplot analysis. *Cereal Res. Commun.*, 43(4), 692–703. doi: 10.1556/0806.43.2015.018
18. Solonechnyi, P., Vasko, N., Naumov, A., Solonechnaya, O., Vazhenina, O., Bondareva, O., & Logvinenko, Y. (2015). GGE biplot analysis of genotype by environment interaction of spring barley varieties. *Zemdirbyste-Agriculture*, 102(4), 431–436. doi: 10.13080/z-a.2015.102.055
19. Vaezi, B., Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Armion, M., Mehraban, A., Hossein-Pour, T., & Dorji, M. (2017). GGE biplot and AMMI analysis of barley yield performance in Iran. *Cereal Res. Commun.*, 45(3), 500–511. doi: 10.1556/0806.45.2017.019
20. Solonechnyi, P., Kozachenko, M., Vasko, N., Gudzenko, V., Ishenko, V., Kozulets, G., ... Vinukov, A. (2018). AMMI and GGE biplot analysis of yield performance of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties in multi environment trials. *Agriculture and Forestry*, 64(1), 121–132. doi: 10.17707/AgricultForest.64.1.15
21. Al-Ghazawi, A. L. A., Al-Ajlouni, Z. I., Al Sane, K. O., Bsoul, E. Y., Musallam, I., Khalaf, Y. B., ... Al-Saqqar, H. (2019). Yield stability and adaptation of four spring barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars under rainfed conditions. *Res. Crops*, 20(1), 10–18. doi: 10.31830/2348-7542.2019.002
22. Kendal, E., Karaman, M., Tekdal, S., & Doğan, S. (2019). Analysis of promising barley (*Hordeum vulgare* L.) lines performance by AMMI and GGE biplot in multiple traits and environment. *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 17(2), 5219–5233. doi: 10.15666/aeer/1702_52195233
23. Verma, A., Kumar, V., Kharab, A. S., & Singh, G. P. (2019). AMMI model to estimate G×E for grain yield of dual purpose barley genotypes. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, 8(5), 1–7. doi: 10.20546/ijcm.2019.805.001
24. Al-Sayaydeh, R., Al-Bawalize, A., Al-Ajlouni, Z., Akash, M. W., Abu-Elenein, J., & Al-Abdallat, A. M. (2019). Agronomic evaluation and yield performance of selected barley (*Hordeum vulgare* L.) landraces from Jordan. *Int. J. Agron.*, 219, 9575081. doi: 10.1155/2019/9575081
25. Ceccarelli, S. (1989). Wide adaptation. How wide? *Euphytica*, 40(3), 197–205. doi: 10.1007/BF00024512
26. Chenu, K. (2015). Characterizing the crop environment – nature, significance and applications. In V. O. Sadras, & D. F. Calderini (Eds), *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy* (pp. 321–348). London, UK: Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-417104-6.00013-3
27. Bustos-Korts, D., Malosetti, M., Chenu, K., Chapman, S., Boer, M. P., Zheng, B., & Eeuwijk, F. A. van (2019). From QTLs to adaptation

- landscapes: using genotype-to-phenotype models to characterize G×E over time. *Front. Plant Sci.*, 10, 1540. doi: 10.3389/fpls.2019.01540
28. Chenu, K., Dehifard, R., & Chapman, S. C. (2013). Large-scale characterization of drought pattern: a continent-wide modeling approach applied to the Australian wheatbelt – spatial and temporal trends. *New Phytol.*, 198(3), 801–820. doi: 10.1111/nph.12192
 29. Ceccarelli, S., & Grando, S. (1991). Selection environment and environmental sensitivity in barley. *Euphytica*, 57(2), 157–167. doi: 10.1007/BF00023074
 30. Ceccarelli, S., & Grando, S. (1991). Environment of selection and type of germplasm in barley breeding for stress conditions. *Euphytica*, 57(3), 207–219. doi: 10.1007/BF00039667
 31. Ceccarelli, S., Grando, S., & Hamblin, J. (1992). Relationship between barley grain yield measured in low- and high-yielding environments. *Euphytica*, 64(1–2), 49–58. doi: 10.1007/BF00023537
 32. Oosterom, E. J. van, & Acevedo, E. (1992). Adaptation of barley (*Hordeum vulgare* L.) to harsh Mediterranean environments III. Plant ideotype and grain yield. *Euphytica*, 62(1), 29–38. doi: 10.1007/BF00036084
 33. Ceccarelli, S. (1994). Specific adaptation and breeding for marginal conditions. *Euphytica*, 77(3), 205–219. doi: 10.1007/BF02262633
 34. Ceccarelli, S. (1996). Adaptation to low/high input cultivation. *Euphytica*, 92(1–2), 203–214. doi: 10.1007/BF00022846
 35. Ceccarelli, S., Grando, S., & Impiglia, A. (1998). Choice of selection strategy in breeding barley for stress environments. *Euphytica*, 103(3), 307–318. doi: 10.1023/A:1018647001429
 36. Teulat, B., Merah, O., Souyris, I., & This, D. (2001). QTLs for agronomic traits from a Mediterranean barley progeny grown in several environments. *Theor. Appl. Genet.*, 103(5), 774–787. doi: 10.1007/s001220100619
 37. Ceccarelli, S., Grando, S., & Baum, M. (2007). Participatory plant breeding in water-limited environment. *Exp. Agric.*, 43(4), 411–435. doi: 10.1017/S0014479707005327
 38. Teulat, B., Zoumarou-Wallis, N., Rötter, B., Salem, M. B., Bahri, H., & This, D. (2003). QTL for relative water content in field-grown barley and their stability across Mediterranean environments. *Theor. Appl. Genet.*, 108(1), 181–188. doi: 10.1007/s00122-003-1417-7
 39. Garcia del Moral, L. F., Garcia del Moral, M. B., Molina-Cano, J. L., & Slafer, G. A. (2003). Yield stability and development in two- and six-rowed winter barleys under Mediterranean conditions. *Field Crops Res.*, 81(2–3), 109–119. doi: 10.1016/S0378-4290(02)00215-0
 40. Baum, M., Grando, S., Backes, G., Jahoor, A., Sabbagh, A., & Ceccarelli, S. (2003). QTLs for agronomic traits in the Mediterranean environment identified in recombinant inbred lines of the cross 'Arta' × *H. spontaneum* 41-1. *Theor. Appl. Genet.*, 107(7), 1215–1225. doi: 10.1007/s00122-003-1357-2
 41. Korff, M. von, Grando, S., Del Greco, A., This, D., Baum, M., & Ceccarelli, S. (2008). Quantitative trait loci associated with adaptation to Mediterranean dryland conditions in barley. *Theor. Appl. Genet.*, 117(5), 653–669. doi: 10.1007/s00122-008-0787-2
 42. Comadran, J., Russell, J. R., Eeuwijk, F. A. van, Ceccarelli, S., Grando, S., Baum, M., ... Thomas, W. T. B. (2008). Mapping adaptation of barley to droughted environments. *Euphytica*, 161(1–2), 35–45. doi: 10.1007/s10681-007-9508-1
 43. Comadran, J., Russell, J. R., Booth, A., Pswarayi, A., Ceccarelli, S., Grando, S., ... Thomas, W. T. B., Romagosa, I. (2011). Mixed model association scans of multi-environmental trial data reveal major loci controlling yield and yield related traits in *Hordeum vulgare* in Mediterranean environments. *Theor. Appl. Genet.*, 122(7), 1363–1373. doi: 10.1007/s00122-011-1537-4
 44. Mohammadi, R., Mahmoodi, K. N., Haghparast, R., Grando, S., Rahmanian, M., & Ceccarelli, S. (2011). Identifying superior rainfed barley genotypes in farmers' fields using participatory varietal selection. *J. Crop Sci. Biotech.*, 14(4), 281–288. doi: 10.1007/s12892-010-0106-8
 45. Tondelli, A., Francia, E., Visioni, A., Comadran, J., Mastrangelo, A. M., Akar, T., ... Pecchioni, N. (2014). QTLs for barley yield adaptation to Mediterranean environments in the 'Nure' × 'Tremois' biparental population. *Euphytica*, 197(1), 73–86. doi: 10.1007/s10681-013-1053-5
 46. Yan, W., & Frégeau-Reid, J. (2018). Genotype by yield*trait (GYT) biplot: a novel approach for genotype selection based on multiple traits. *Sci. Rep.*, 8, 8242. doi: 10.1038/s41598-018-26688-8
 47. Babayants, L. T., Mesterhazy, A., Wachter, F., Neklesa, N., Dubinina, L., Omel'chenko, L., Klechkovskaya, E., Slyusarenko, A., & Bartosh, P. (1988). *Metody selektsii i otsenki ustoychivosti pshenitsy i yachmenya k bolezniam v stranakh-chlenakh SEV* [Methods of breeding and evaluation of wheat and barley resistance to diseases in the CMEA member countries]. Prague: N.p. [in Russian]
 48. Dorofeev, V. F., Rudenko, M. I., & Udachin, R. A. (1974). *Zasukhoustoychivyye pshenitsy (metodicheskiye ukazaniya)* [Drought-tolerant wheat (guidelines)]. Leningrad: VIR. [in Russian]
 49. Yan, W., & Tinker, N. A. (2006). Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications. *Can. J. Plant Sci.*, 86(3), 623–645. doi: 10.4141/P05-169
 50. Yan, W., Kang, M. S., Ma, B., Woods, S., & Cornelius, P. L. (2007). GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Sci.*, 47(2), 643–653. doi: 10.2135/cropsci2006.06.0374
 51. Gauch, H. G., Piepo, H.-P., & Annicchiarico, P. (2008). Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: further consideration. *Crop Sci.*, 48(3), 866–889. doi: 10.2135/cropsci2007.09.0513
 52. Frutos, E., Galindo, M. P., & Leiva, V. (2014). An interactive biplot implementation in R for modeling genotype-by-environment interaction. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 28(7), 1629–1641. doi: 10.1007/s00477-013-0821
 53. Hongyu, K., Garcia-Pena, M., Araujo, L. B. de, & Santos Dias, C. T. dos. (2014). Statistical analysis of yield trials by AMMI analysis of genotype × environment interaction. *Biometrical Letters*, 51(2), 89–102. doi: 10.2478/bile-2014-0007
 54. Kalenska, S. M., & Ryzenko, A. S. (2020). Evaluation of weather conditions for growing sunflower (*Heliantus annuus* L.) in the northern part of the Left-bank Forest Steppe of Ukraine. *Plant Var. Stud. Prot.*, 16(2), 162–172. doi: 10.21498/2518-1017.16.2.2020.209229

UDC 633.16:631.527

Hudzenko, V. M.*, **Polischuk, T. P.**, **Babii, O. O.**, **Lysenko, A. A.**, & **Yurchenko, T. V.** (2021). Comprehensive evaluation of spring barley breeding lines in yield, stability and tolerance to biotic and abiotic factors under condition of the central part of the Ukrainian Forest-Steppe. *Plant Varieties Studying and Protection*, 17(1), 30–42. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.17.1.2021.228206>

*The V. M. Remeslo Myronivka Institute of Wheat of NAAS of Ukraine, 68 Tsentralna St., Tsentralne, Myronivka district, Kyiv region, 08853, Ukraine, *e-mail: barley22@ukr.net*

Purpose. Identification of spring barley promising breeding lines with combination of adaptive traits under conditions of the central part of the Ukrainian Forest-Steppe. **Methods.** Field trial, laboratory-field analysis of drought tolerance, statistical and graphical analysis of experimental data. **Results.** The analysis of variance of the AMMI model showed that the largest contribution to the general variation (85.78%) had environmental conditions (years of research). The value of the genotype was 8.21%, and the genotype by environment interaction was 6.01%. The first and second principal components of both AMMI and GGE biplot explained more than 85% of the genotype-environment interaction. Spring barley breeding lines 'Deficiens 5162', 'Nutans 5073' and 'Deficiens 5161' had the superior combination of yield performance and relative stability through the years according to GGE biplot. With GYT biplot analysis it has been determined that the breeding

lines 'Deficiens 5162' and 'Nutans 5073' also significantly predominated over the other genotypes in terms of combination of yield performance and a number of other traits – 1000 kernels weight, drought tolerance, resistance to pathogens. Breeding lines 'Deficiens 5161', 'Nutans 4966', 'Nutans 4705', 'Nutans 4816', 'Nutans 5184', 'Nutans 5193', which exceeded the mean value in the trial in terms of combination of yield performance and a number of adaptive traits may have practical significance in the breeding process for creation of new initial material. **Conclusions.** As a result of the complex evaluation when using AMMI, GGE biplot and GYT biplot graphical models the breeding lines 'Deficiens 5162' and 'Nutans 5073' with the optimal combination of yield, stability, thousand kernel weight and tolerance to abiotic and biotic environmental factors have been identified.

Keywords: *Hordeum vulgare* L.; genotype by environment interaction; complex of traits; AMMI; GGE biplot; GYT biplot.

Надійшла / Received 14.01.2021

Погоджено до друку / Accepted 24.02.2021