

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
МИРОНІВСЬКИЙ ІНСТИТУТ ПШЕНИЦІ ІМЕНІ В. М. РЕМЕСЛА

**МЕТОД ПОЛЬОВОГО ФЕНОТИПУВАННЯ
СЕЛЕКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ПШЕНИЦІ М'ЯКОЇ
ОЗИМОЇ З ВИКОРИСТАННЯМ NDVI ІНДЕКСУ В
УМОВАХ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ**

Методичні рекомендації

Центральне, 2023

УДК: 633.111.1«324»: 631.527:575.21:528.8(292.485:477)

Розглянуто та затверджено до друку

Вченою радою Миронівського інституту пшениці імені В.М. Ремесла НААН
України, протокол № 10 від 10.09.2023 року

Рецензенти:

Волощук О. П. – доктор сільськогосподарських наук, професор, головний науковий співробітник відділу селекції сільськогосподарських культур Інституту сільського господарства Карпатського регіону НААН України;

Пикало С. В. – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник відділу біотехнології, генетики і фізіології Миронівського інституту пшениці імені В. М. Ремесла НААН України.

Авторський колектив : Демидов О.°А., Топко Р. І., Вологдіна Г. Б., Гуменюк О.°В., Ковалишина Г. М. Метод польового фенотипування селекційного матеріалу пшениці м'якої озимої з використанням NDVI індексу в умовах Лісостепу України. *Методичні рекомендації*. Київ : Компринт, 2023. 44 с.

Методичні рекомендації присвячені теоретичному обґрунтуванню та новому розв'язанню актуального наукового завдання з польового фенотипування селекційного матеріалу пшениці м'якої озимої в умовах Лісостепу України.

Наукові методичні рекомендації адресовані науковцям, аспірантам, докторантам, викладачам навчальних закладів, студентам ЗВО та фахівцям агропромислових підприємств і різних форм власності.

За довідками звертатися:

Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла НААН України

Адреса: 08853, вул. Центральна 68, корп. 2, с. Центральне Обухівського району Київської області; факс (04574)–74–446, тел. (04574)–74–135

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ДИСТАНЦІЙНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВИСОКОВОРОЖАЙНИХ ГЕНОТИПІВ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ ШЛЯХОМ ОЦІНКИ ВІДБИВНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОСІВІВ (З ВИКОРИСТАННЯМ NDVI-ІНДЕКСУ ТА БПЛА).....	6
2. СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА ДАНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	10
3. ТЕХНІЧНІ УМОВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ПОЛЬОВОГО ФЕНОТИПУВАННЯ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ.....	12
4. ЗБІР ТА ОЦІНКА ПОЛЬОВОЇ СПЕКТРАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	14
5. РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ПОЛЬОВОГО ФЕНОТИПУВАННЯ В СЕЛЕКЦІЙНОМУ ПРОЦЕСІ	20
5.1 Погодні умови вегетаційних років 2018/2019-2020/2021 рр.....	20
5.2 Оцінка генотипів пшениці м'якої озимої за даними дистанційного зондування та агрономічними ознаками, пов'язаними з урожайністю...	23
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	40

ВСТУП

У сучасних умовах різкого збільшення доступних і високоякісних супутникових матеріалів дистанційне вивчення продуктивності рослин набуває особливої актуальності. Розробка методів дистанційного зондування озимих культур, які враховують особливості їх фенологічного розвитку, дозволила на сьогодні створити досить ефективні алгоритми їх автоматизованого розпізнавання та оцінки стану на основі супутникового моніторингу сезонної динаміки спектрально - відбивних характеристик посівів [1].

Необхідні дослідження, що дозволять розробити нові та удосконалити існуючі способи моніторингу стану рослин сільськогосподарських культур і оцінки їх продуктивності з використанням найбільш відомого вегетаційного індексу NDVI, який розраховується за супутниковими даними й за допомогою регресійних моделей пов'язується з урожайністю посівів. Величина NDVI корелює з площею асиміляційної поверхні рослин і вмістом в ній хлорофілу, а отже, тісно залежить від продуктивності сільськогосподарських культур, котра є функцією потенційної ефективності їх фотосинтетичного апарату [2]. Саме тому зростає увага до можливостей вивчення продуктивності рослин за допомогою супутникових даних.

Одержані на основі вегетаційних індексів відносні характеристики властивостей рослинності інтерпретують з урахуванням наземних даних, одержаних в умовах конкретних польових досліджень [3].

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), як нова транспортна парадигма, що активно розвивається, можуть бути оснащені мультиспектральними камерами, які застосовують для моніторингу стану рослин із застосуванням інфрачервоного спектра, що дозволяє визначити зміни задовго до того, як вони проявлять себе у видимому спектрі [4]. Блоки знімків, отриманих з БПЛА, або дронів, мають відмінну детальність, яскравість і контраст.

Плюсами застосування дронів є рентабельність, можливість зйомки з невеликих висот та поблизу об'єктів, оперативне отримання знімків високої роздільної здатності [5].

Пшениця озима є основною сільськогосподарською культурою в Україні, яка займає перше місце за посівними площами (6,4–6,8 млн. га щорічно) не лише серед злакових, а й серед усього переліку сільськогосподарських культур в Україні. Згідно огляду світового ринку пшениці, який в жовтні 2021 р. опублікувало Міністерство сільського господарства США, врожайність

пшениці в Україні зростала вибуховими темпами – за 20 (1996–2016) років середня величина показника зросла на 44 % [6]. Значною мірою на це вплинула селекція: створення сучасних сортів пшениці озимої стало поштовхом до інтенсифікації технологій вирощування, що сприяло підвищенню рівня врожайності культури.

Щоб прогодувати кілька мільярдів людей, які живуть на планеті, виробництво високоякісної їжі має збільшуватися з меншими витратами, але це досягнення буде особливо складним перед викликами глобальних екологічних змін. Селекціонери повинні зосередитися на ознаках з найбільшим потенціалом для підвищення врожайності. Отже, для прискорення селекції необхідно розробити нові технології шляхом удосконалення методів генотипування і фенотипування та збільшити наявне генетичне різноманіття в зародковій плазмі. Ці технології мають бути економічно доступними та легко поширюватися, що забезпечить високу ефективність від їх впровадження в країнах, що розвиваються [7].

У процесі селекції рослин рівень прояву цінних господарських ознак наближується до їхніх теоретичних максимумів, при цьому показник ефективності перетворення світла, який в основному визначається фотосинтезом, залишається єдиною значною перспективою для його покращення [8].

Впровадження сучасних дистанційних методів польової оцінки генотипів пшениці озимої є невід'ємною частиною підвищення ефективності селекційного процесу. Створення, адаптування та використання інноваційних технологій скринінгу в селекції стає все більш популярним та дозволяє селекціонеру ширше та об'єктивніше оцінювати вихідні форми та новостворений матеріал. Розробка та впровадження польового спектрального аналізу як одного із методів фенотипування рослин дозволяє збільшити обсяг досліджуваних селекційних зразків. Дані спектральної оцінки (показники NDVI-індексу) рослин пшениці озимої в комплексі з результатами біометричного аналізу дають можливість визначити реакцію генотипу на стресові чинники навколишнього середовища, рівень якої залежить від таких адаптивних властивостей (як морозостійкість, посухостійкість, стійкість проти збудників хвороб тощо). Застосування на ранніх етапах селекції пшениці озимої комплексного методу дистанційної польової оцінки дозволить покращити якість підбору вихідних форм.

1. МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ДИСТАНЦІЙНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВИСОКОВОЖАЙНИХ ГЕНОТИПІВ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ ЧЕРЕЗ ОЦІНКУ ВІДБИВНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОСІВІВ (З ВИКОРИСТАННЯМ NDVI-ІНДЕКСУ ТА БПЛА)

Фенотипування рослин є важливим етапом в ідентифікації батьків для використання в селекційних програмах створення покращених сортів [9]. У цьому контексті для використання у селекційних програмах фенотипування викликає інтерес безпілотний літальний апарат (БПЛА) як недорогий, швидкий, доступний та ефективний польовий інструмент для збору даних щодо ряду особливостей сільськогосподарських культур [10]. Є переваги використання БПЛА для отримання даних з високою просторовою та часовою роздільною здатністю [11], зокрема з невеликих ділянок [12, 13] навіть окремих рослин [14].

Оснащені відповідними датчиками, БПЛА можуть зібрати масив даних про відбивну здатність в електромагнітному спектрі для отримання важливої інформації та оцінки агрономічних та фізіологічних ознак рослин, яка базується на спектральних індексах рослинності. Такі вимірювання використовували як непрямий підхід для оцінки ряду параметрів, таких як індекс площі листя (LAI) [15], частка перехопленого фотосинтетично активного випромінювання [16], біомаса [10, 17, 18], висота рослин [10, 19], оцінка хвороб [20], температура стеблостою [21], дефіцит води [22], покриття посіву [10], статус росту і розвитку [23, 24], урожайність [25–27]. БПЛА можна використати для високопродуктивних вимірювань при вивченні окремих агрономічних і фізіологічних ознак рослин для оцінки генотипів, вибору батьківських форм і оцінки потомств у великому масштабі в програмах селекції пшениці [28].

Проте практично відсутня інформація про можливість використання спектральних вегетаційних індексів для оцінки генетичного потенціалу та цінності матеріалу пшениці за інтегральними ознаками. Фенотипові значення, які зазвичай використовуються при одночасному відборі, не завжди відповідають генетичній перевазі.

Методичні підходи до оцінки спектральних характеристик сільськогосподарських культур, є застарілими, бо засновані на фактичних даних ще радянського періоду (як аерофотозйомка, так й космічні знімки) [5]. У основі методу польового фенотипування зразків пшениці озимої лежить вимірювання показника кількості фотосинтетичної активної біомаси – нормалізованого відносного індексу рослинності NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) кожного окремо взятого генотипу пшениці озимої впродовж вегетації, що дає можливість отримати комплексну оцінку рослин та визначити їх реакцію на зміни навколишнього середовища.

NDVI-індекс – один з найпоширеніших і використовуваних індексів для оцінки рослинного покриву. Відомо, що пігмент листя хлорофіл поглинає видиме світло в спектральній області активного випромінювання (від 400 до 700 нм), яке рослини використовують як джерело енергії в процесі фотосинтезу. Структура клітин листя, навпаки, сильно відбиває ближнє інфрачервоне світло (від 700 до 1100 нм), оскільки енергія фотонів з довжиною хвилі більше ніж 700 нанометрів є занадто великою для синтезу органічних молекул. Значне поглинання на цих довжинах хвиль призведе лише до перегрівання рослини та можливого пошкодження тканин [29]. Здорова рослинність поглинає більшу частину видимого світла, яке потрапляє на неї, й відбиває велику частину ближнього інфрачервоного світла. Чим більша біомаса рослини, тим більше рівень відбиття на ці довжини хвиль світла.

Величину NDVI-індексу розраховували за формулою [30]:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red});$$

де Red і NIR означають значення спектрального відбиття, отримані відповідно в червоній (видимій) і ближній інфрачервоній областях. Обчислення NDVI для певного пікселя завжди дає число в діапазоні від -1 до +1. Значення індексу, близьке до нуля, дає відсутність рослинності (зеленого листя), а до +1 (0,8–0,9) – вказує на найвищу можливу щільність зеленого листя [31]. Використання не простого відношення, а нормалізованої різниці між мінімумом і максимумом відображень збільшує точність вимірювання, дозволяє зменшити

вплив таких явищ як відмінності в освітленості знімка, хмарності, серпанку, поглинання радіації атмосферою та ін.

На величину індексу впливає тип рослинності, зімкнутість рослин, стан, експозиція та кут нахилу поверхні. Тому будь-які вегетаційні індекси не забезпечують абсолютних кількісних показників властивостей рослинності, а їхні значення залежать від великої кількості чинників (просторового розрізнення, умов зйомки, стану атмосфери тощо). Для зеленої рослинності значення цього індексу зазвичай змінюється від 0,2 до 0,8 прямо пропорційно збільшенню зеленої фітомаси, що характеризує стан вологозабезпеченості посівів [32]. Зернові культури мають швидке зростання індексу від періоду куцїння до фази колосїння, що пов'язано з динамікою накопичення надземної біомаси.

Дослідження виконані впродовж 2018/19 –2020/21 вегетаційних років у селекційній сівозміні лабораторії селекції озимої пшениці Миронівського інституту пшениці імені В. М. Ремесла НААН України (МІП). Сівбу проводили в два строки: 2018 р. – 25 вересня та 5 жовтня; 2019 і 2020 р. – 5 і 15 жовтня, попередник – соя. Розміщення ділянок систематичне, повторність чотириразова, облікова площа – 10 м². Норма висіву – 5 млн схожих насінин на 1 га. За стандарт використовували сорт Подолянка. Матеріалом для досліджень слугували останні селекційні розробки МІП – сорти та селекційні лінії пшениці м'якої озимої. Дослідження проводили відповідно до «Методики польового дослідження» [33], фенологічні спостереження та обліки – відповідно до «Методики Державного сортовипробування» [34].

Спектральні обліки проводили три рази впродовж вегетаційного періоду: перший – під час припинення осінньої вегетації (ЧПОВ), другий – під час відновлення весняної вегетації (ЧВВВ) і третій – в фазу цвітіння - початок наливу зерна (рис. 1).

Проведення спектральної польової оцінки під час припинення осінньої вегетації дає комплексне уявлення про ступінь та інтенсивність розвитку рослин пшениці озимої в першій половині вегетації й накопичення продуктів

фотосинтезу для вдалого проходження періоду зимового спокою, про наявність хвороб, характерних для даного періоду вегетації (септоріоз, борошниста роса, кореневі та прикореневі гнилі), та пошкодження шкідниками.



Рис. 1. Спектральні фотографії дослідних ділянок пшениці озимої, зроблені в NIR спектрі в різні періоди вегетації

На час відновлення весняної вегетації можна оцінити наслідки перезимівлі, рівень морозо-зимостійкості досліджуваних генотипів, швидкість відновлення вегетаційних процесів, стійкість до зворотніх короткотривалих знижень температури повітря, ураженість хворобами (снігова та оливкова пліснява, септоріоз, борошниста роса, кореневі та прикореневі гнилі), пошкодження шкідниками.

Здатність рослин пшениці озимої накопичувати значну кількість хлорофілу та продуктів фотосинтезу в прапорцевому та підпрапорцевому листках, а також у верхній частині стебла та елементах колосу позитивно впливає на рівень врожайності. Тому третя оцінка проводилась у період цвітіння - початок наливу зерна. Останні дослідження підтверджують тісні кореляційні зв'язки між показниками NDVI індексу, отриманого під час цвітіння пшениці озимої, та рівнем урожайності [35]. Спектральна оцінка дає можливість спрогнозувати рівень продуктивності, стійкості до хвороб (фузаріоз колосу, септоріоз листя, види іржі, піренофороз, борошниста роса), пошкодження шкідниками.

2. СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА ДАНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дисперсійний, кореляційний аналіз та аналіз головних компонентів (PC) агрономічних ознак сортів і селекційних ліній пшениці м'якої озимої проводили за допомогою пакетів Statistica 10.0 та IBM SPSS Statistics 27.

Аналіз АММІ [36, 37] проводили відповідно до моделі $Y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \sum \lambda_k \gamma_{ik} \alpha_{jk} + r_{ij} + \epsilon_{ij}$, де: Y_{ij} – урожайність зерна генотипу i в середовищі j ; μ – загальне середнє; g_i – фіксований ефект i -го генотипу; e_j – фіксований вплив середовища j ; λ_k – k -е сингулярне значення матриці взаємодії; γ_{ik} – k -й сингулярний вектор i -го генотипу; α_{jk} – k -й сингулярний вектор j -го середовища; r_{ij} – нев'язка моделі; ϵ_{ij} – залишкова випадкова похибка.

Аналіз GGE-biplot дозволяє графічно візуалізувати матрицю даних. Він розглядає основний ефект генотипу разом із взаємодією генотип–середовище. Така методологія описується моделлю [38]: $Y_{ij} - \mu - \beta_j = \lambda_1 \xi_{1i} \eta_{1j} + \lambda_2 \xi_{2i} \eta_{2j} + \epsilon_{ij}$, де: Y_{ij} – урожайність зерна i -го генотипу в середовищі j ; μ – загальне середнє; β_j – вплив середовища j ; λ_1 і λ_2 – власні значення, пов'язані з PC1 і PC2 відповідно; ξ_{1i} і ξ_{2i} – бали за осями PC1 та PC2 відповідно для i -го генотипу; η_{1j} і η_{2j} – оцінки для осей PC1 і PC2 відповідно, для середовища j та ϵ_{ij} – залишкова випадкова помилка. Ці аналізи було виконано за допомогою програмного забезпечення GEA-R версії 4.1 [39].

Генотипові значення були передбачені за методологією REML/BLUP у програмному забезпеченні Meta-R версія 6.0 [40]: $y = Xr + Zg + Wi + e$, де y – вектор даних; r – вектор ефектів реплікації (фіксований ефект); g – вектор генотипових ефектів (випадковий ефект) ($g \sim N(0, \sigma^2 g)$), де $\sigma^2 g$ – матриця генотипових дисперсій; i – вектор GEI (випадковий ефект); e – вектор (випадкових) помилок ($e \sim N(0, \sigma^2 e)$), де $\sigma^2 e$ – матриця залишкової дисперсії. X , Z та W відповідає матрицям інцидентності для r , g та i відповідно.

Оцінено селекційний приріст (selection gain – SG) за дослідженими показниками за виразом: $SG = SD * h^2$, де SD – диференціал відбору, визначений різницею між середнім вибраних генотипів (X_s) і загальним

спостережуваним середнім (X_0), а h^2 – спадковість. Відносний селекційний приріст ($SG\%$) визначається як $SG\% = (SG/X_0) * 100$.

Щоб отримати оцінку генетичних переваг для кожної ознаки з метою вибору кращих генотипів, було використано три різні індекси: індекс підсумовування рангів I_j [41], індекс дистанції між генотипом та ідеотипом D_{ii}'' [42], індекс Z [43].

Для визначення індексу підсумовування рангів I_j генотипи класифікували за ознаками, завжди приймаючи критерій класифікації найкращого генотипу зі значенням 1 і так далі для кожної ознаки, причому, залежно від характеру цих ознак, як 1 класифікують генотипи, які мали найвищі або ж найнижчі середні значення. Після отримання класифікаційних значень для кожного генотипу, його індекси розраховували наступним чином: $I_j = \sum n_{ij}$, де I_j є індексом для генотипу j , а n_{ij} – класифікаційним рангом ознаки i для генотипу j . Генотип з найнижчим I_j вважався кращим.

У якості критерію індексу дистанції генотип–ідеотип використано евклідову відстань між i генотипом та i' ідеотипом: $D_{ii}'' = \sqrt{\sum d_{ij}^2}$, де D_{ii}'' є евклідовою відстанню між i генотипом та i' ідеотипом, а d_{ij} є стандартним відхиленням між середнім значенням ознаки j , виміряним у i генотипі (x_{ij}), та значенням, присвоєним ідеотипу в цій ознаці.

Індекс Z було визначено за рівнянням $Z_{ij} = (y_{ij} - \bar{y}_j) / \sigma_j$, де y_{ij} — ознака j , що спостерігається для генотипу i , \bar{y}_j — загальне середнє значення ознаки j , а σ_j — стандартне відхилення ознаки j . Оскільки Z_{ij} може приймати як позитивні, так і негативні значення, щоб уникнути негативних значень, до нього було додано число три. У всіх трьох індексах був прийнятий тиск відбору 25 %.

3. ТЕХНІЧНІ УМОВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ПОЛЬОВОГО ФЕНОТИПУВАННЯ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ

Спектральний польовий аналіз проводили за допомогою БПЛА DJI Mavic zoom 2, який є носієм мультиспектральної камери Parrot Sequoia, що дає можливість фіксувати зображення в діапазоні 550–810 нм. Для формування ортофотоплану використовували програмне забезпечення Pix4Dmapper (ПК) та Pix4Dcapture, яке дозволяє побудувати карту-завдання польового обльоту дрона. Слід відмітити, що це окремий клас програм автоматизованої фотограмметричної обробки матеріалів аерофотозйомки. Процес обробки знімків повністю автоматизований і може проходити взагалі без втручання користувача. Фотофіксацію проводили мультиспектральною камерою на висоті 30 м над рівнем досліджуваного об'єкту з метою підвищення якості ортофотоплану, з перекриттям знімків 80 % і з проміжком часу в дві секунди.

Вимірювання проводиться безпосередньо на отриманому ортофотоплані за допомогою відповідного програмного забезпечення. Еталоном виступає сорт стандарт Подолянка.

Поточні погодні умови для проведення обліку мають бути наступними:

1). Швидкість вітру, в т. ч. і пориви, не повинні перевищувати 5 м/с на висоті польоту (30 м над рівнем облікового об'єкту), щоб БПЛА просувався рівномірно над досліджуваною ділянкою за завданням програмою Pix4Dcapture маршрутом. Це важливо для зниження енерговитрат: системи стабілізації польоту БПЛА витрачають додаткову енергію заряду батареї для вирівнювання та утримання дрону на завданому маршруті.

2). Проведення обліків в період опадів (дощ, сніг) не рекомендується більшістю виробників БПЛА, в т. ч. і DJI, оскільки потрапляння вологи в електромотори може вивести з ладу пристрій.

3). Освітлення в період проведення обліків має бути постійним, значна хмарність (не повинна перевищувати 5 %), димка вносять огріхи, спричиняють різний рівень відбиття сонячного випромінювання на фотографіях. Хоч період обльоту досліджуваної площі в 1000 кв. м. становить в

середньому 10–15 хв., а датчик сонячної інсоляції в комплекті з мультиспектральною камерою нівелює зміну рівня освітлення, краще мати максимально вирівняний ступінь освітленості.

4). Температурний режим, допустимий для проведення польових спектральних обліків, має бути в межах від +1 °С до +30 °С. Зниження температури повітря до від’ємних значень може пришвидшити падіння заряду акумулятора як самого БПЛА, так і безпосередньо мультиспектральної камери.

5). Доступність постійної GPS мережі є необхідною умовою, оскільки кожна зроблена фотографія має локаційні координати що потрібно для об’єктивного формування ортофотоплану. Навігаційна система, що вбудована в сам БПЛА, також має в режимі автоматичного польоту керувати дроном по завданому в Pix4Dcapture маршруту.

4. ЗБІР ТА ОЦІНКА ПОЛЬОВОЇ СПЕКТРАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Для проведення польового обліку зі збору спектральних даних необхідно створити в мобільному додатку з програмного забезпечення (ПЗ) Pix4Dcapture карти завдання обльоту БПЛА за наступним алгоритмом.

1. За координатами в системі GPS знайти поле, де розміщено дослід (рис. 2).

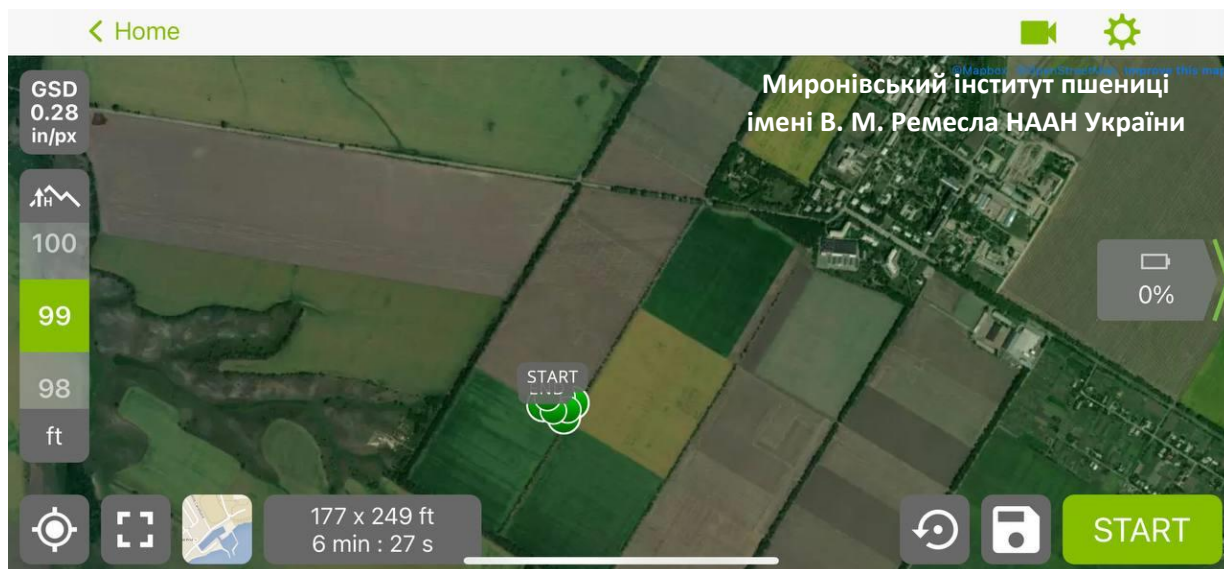


Рис. 2. Загальний вигляд на моніторі виділеної карти завдань БПЛА

2. Виділити контури дослідів. У центрі виділеної зони, в залежності від висоти польоту, створити лінії маршруту, за яким буде рухатиметься БПЛА. Оскільки лінзи камери мають опуклу форму, бажано щоб крайні проходи дрону були за межами облікових ділянок для більш якісного формування ортофотоплану. У вікні зліва вибрати висоту польоту 99 футів, що дорівнює 30,2 м (рис. 3).



Рис. 3. Планування маршруту для роботи БПЛА

3. Завдати параметри руху дрону на маршруті: кут нахилу камери – 90 °, переднє та бічне перекриття – 90 %, швидкість руху БПЛА – середня 4–5 м/с (рис. 4).

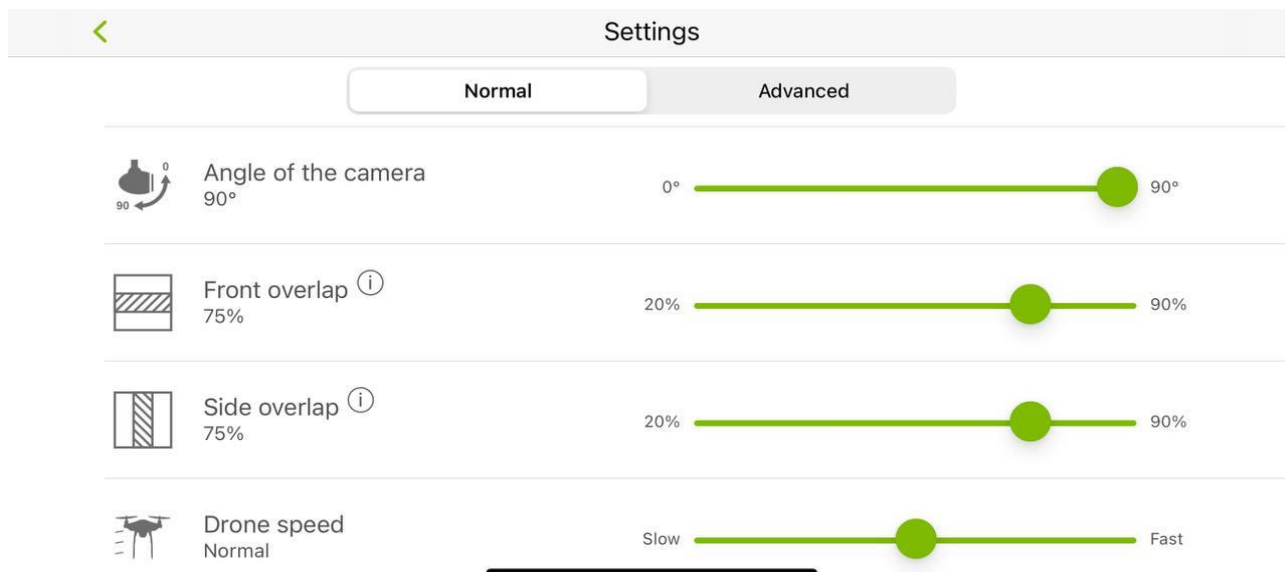


Рис. 4. Параметри руху БПЛА по заданому маршруту

4. Провести підготовчі роботи зі збору й налаштуванню дрону в режимі польоту, на БПЛА встановити мультиспектральну камеру (рис. 5).



Рис. 5. Технічні компоненти для проведення польового спектрального аналізу

Примітка: 1 – планшет для запуску й налаштування мультиспектральної камери; 2 – пульт керування БПЛА та мобільний телефон для роботи в ПЗ Pix4Dcapture; 3 – акумулятор для мультиспектральної камери; 4 – мультиспектральна камера Parrot Sequoia; 5 – БПЛА (дрон) DJI Mavic zoom 2.

5. Камеру Sequoia Parrot підключити до живлення, провести налаштування параметрів через Wi-Fi з'єднання. Обрати опцію «збереження на SD карту / пристрій», запустити процес фотографування (одразу чотири фото кожного спектру) з періодичністю в дві секунди.

6. Провести обліт БПЛА з використанням ПЗ Pix4Dcapture (рис. 6 А), після чого безпечно приземлити дрон і перевірити якість зроблених спектральних знімків (рис. 6 В).



А



В

Рис. 6. Проведення спектральних знімків та завершення роботи БПЛА

7. З використанням ПЗ Pix4Dmapper на ПК створити новий проект, завантажити мультиспектральні фотографії та запустити процес формування мультиспектрального ортофотоплану (рис. 7–9).



Рис. 7. Автоматичне нанесення мультиспектральних фотографій на мапу з урахуванням GPS координат

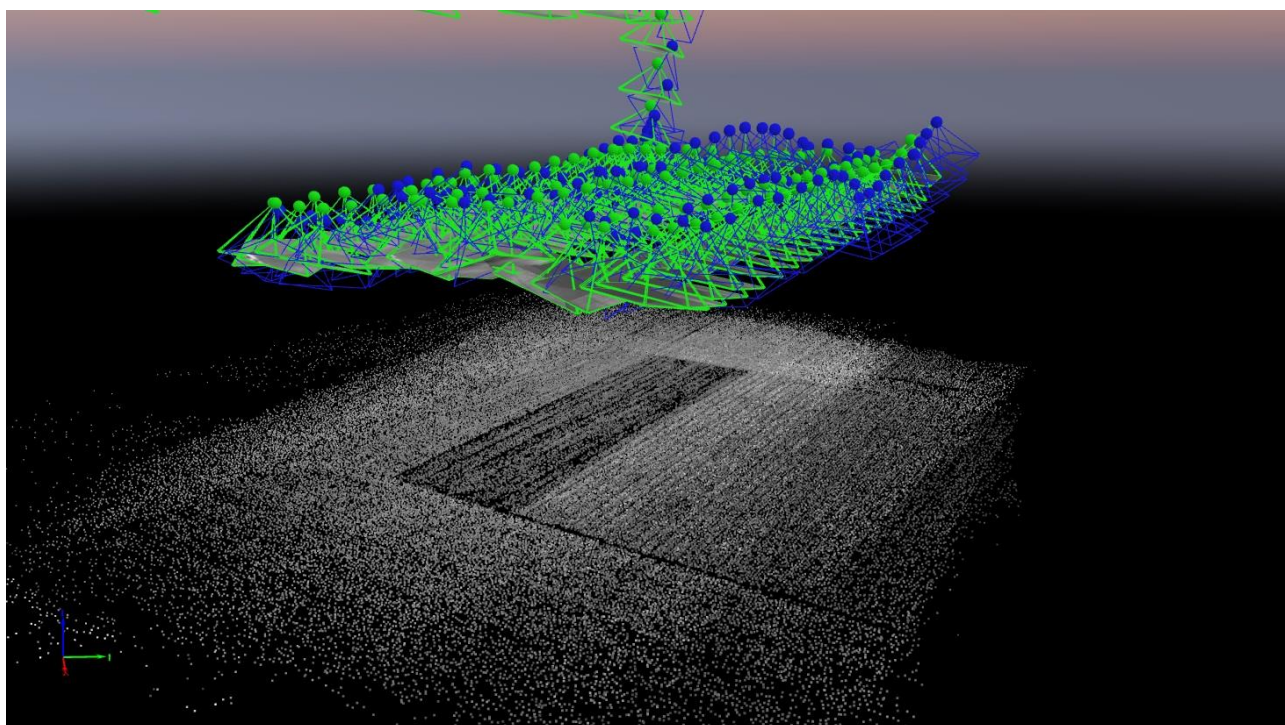


Рис. 8. Процес автоматичного моделювання мультиспектрального ортофотоплану

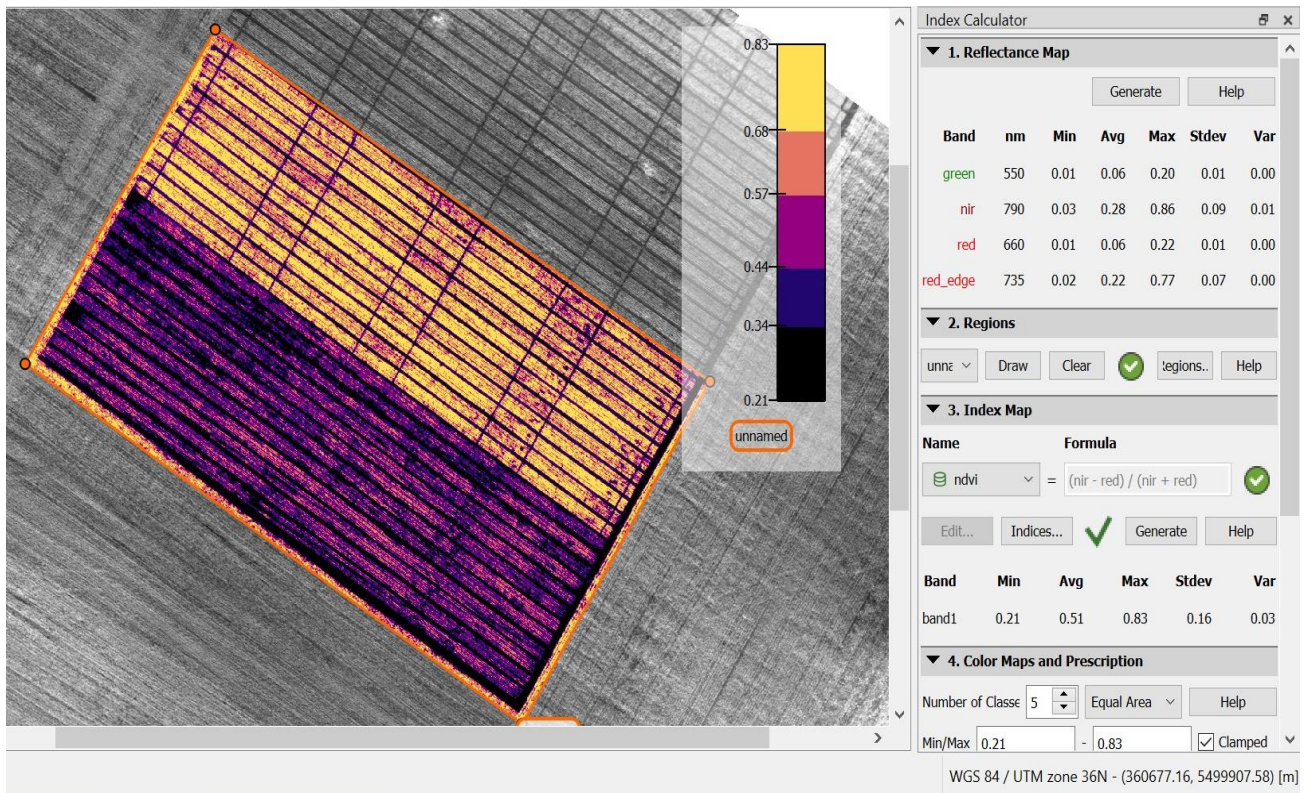


Рис. 9. Результати спектральної оцінки сортів і селекційних ліній пшениці озимої в період ЧВВВ 2021 р.

8. Провести облік значення NDVI-індексу для кожного генотипу з використанням закріпленої в ПЗ Pix4Dmapper облікової рамки. На рисунку 10 наведений приклад визначення середнього значення (Avg) вегетаційного індексу в період ЧПОВ 2021 р. для сорту Подолянка (в обліковій рамці). За допомогою ПЗ формуються карти: відбиття, кольорова та визначення середнього значення NDVI-індексу.

9. Визначити середнє значення NDVI-індексу для кожного генотипу (8 варіантів), дані зафіксувати.

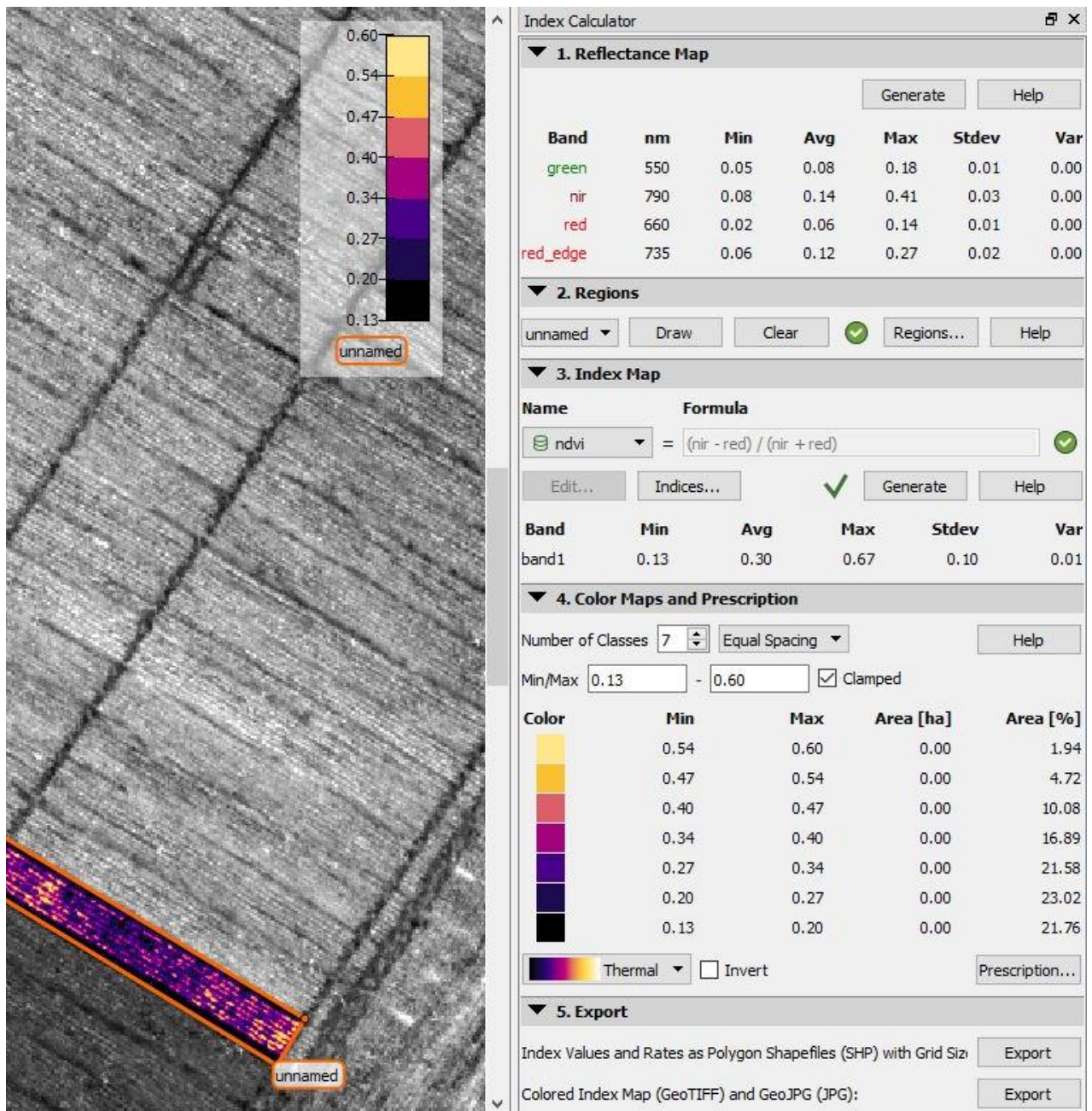


Рис. 10. Схема розташування ділянки сорту-стандарту Подолянка (перша повторність, I строк сіви) на дослідному полі № 4 селекційної сівозміни МП і шлях визначення середнього значення NDVI-індексу, 2021 р.

5. РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ПОЛЬОВОГО ФЕНОТИПУВАННЯ В СЕЛЕКЦІЙНОМУ ПРОЦЕСІ

5.1 Погодні умови вегетаційних років 2018/2019-2020/2021 рр.

Одержані за три роки досліджень результати свідчать про те, що онтогенетичні зміни NDVI-індексу посівів пшениці озимої мали певні особливості та залежали від генотипу, погодних умов року, строку сівби. За гідротермічним режимом 2018/2019 р. був найбільш оптимальним для росту та розвитку пшениці озимої. Осінній період 2018 р. був надмірно вологий (ГТК = 1,76), а за температурним режимом у вересні - жовтні – дуже теплим: середня температура повітря становила 16,6 °С і 10,6 °С відповідно (середній багаторічний показник – 14,2 °С і 8,3 °С). У листопаді середня місячна температура була нижчою від кліматичної норми на 1,1 °С. Сумарно від сівби І строку до ЧПОВ, випало 45,3 мм опадів, що сприяло розвитку рослин пшениці озимої (рис. 11).

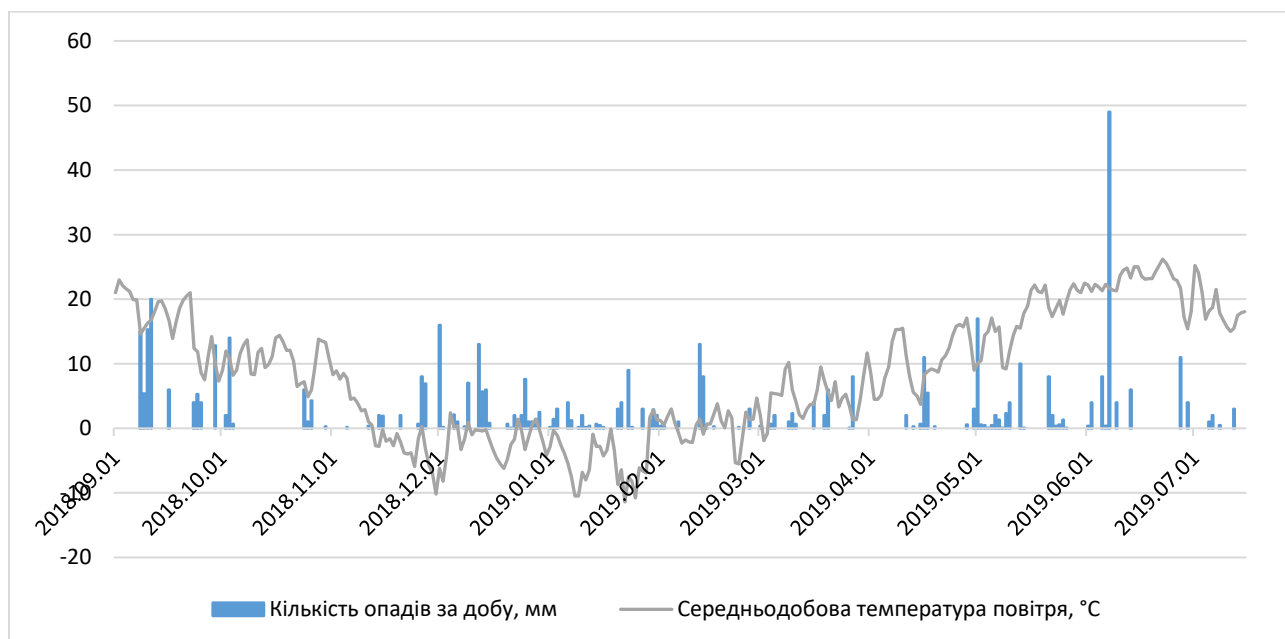


Рис. 11. Гідротермічний режим 2018/2019 вегетаційного року

Період зимового спокою був оптимальним, не відмічали короткочасного відновлення ростових процесів. ЧВВВ в 2019 р. був раннім (4 березня), відмічали поступове наростання температури повітря без суттєвих знижень. Кількість опадів від ЧВВВ до початку цвітіння становила 172,9 мм (один дощ

зливового характеру – 49 мм), а від початку цвітіння до кінця дозрівання – 21,5 мм. Загалом весняно - літній період був задовільним і сприятливим для формування високої врожайності зерна пшениці озимої. Середньодобова температура повітря в літній період становила 21,3 °С без повітряної та ґрунтової посухи.

Погодні умови 2019/2020 вегетаційного року були найбільш несприятливими для росту та розвитку пшениці озимої (рис. 12).

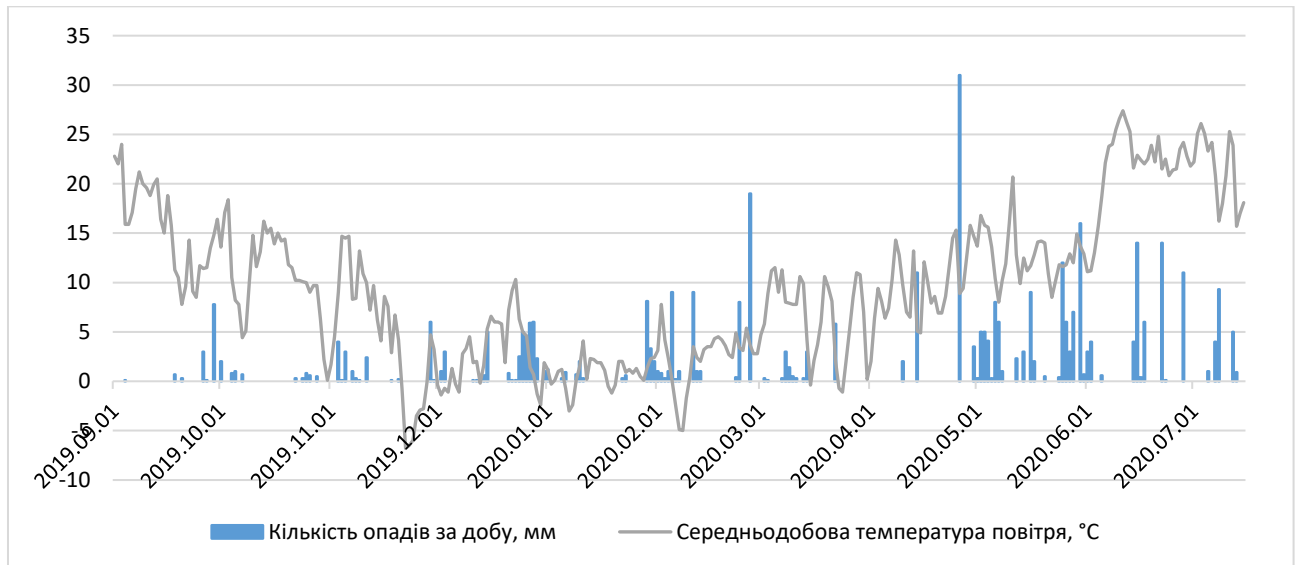


Рис. 12. Гідротермічний режим 2019/2020 вегетаційного року

З початку вересня 2019 р. і до сівби I строку випало 1,1 мм опадів у вигляді непродуктивних дощів, що не дало можливості провести якісну підготовку ґрунту та отримати рівномірні дружні сходи. За період сівба - сходи до ЧПОВ було зафіксовано 28,9 мм опадів (з яких один продуктивний дощ – 7,8 мм), інші опади через екстремальну посуху не змогли проникнути на глибину загортання насіння. Наслідком осінньої ґрунтової посухи було суттєве зрідження посівів і незадовільний стан розвитку рослин пшениці озимої (в межах 10–13 фази за шкалою ВВСН). Зимовий період 2019/2020 вегетаційного року був аномально теплим і безсніжним. Середньодобова температура повітря коливалася в межах 0 °С з незначним пониженням до -5 °С. На момент ЧВВВ відбулося суттєве зниження густоти стояння пшениці озимої, спричинене вимерзанням недорозвинених і незагартованих рослин. Від ЧВВВ до настання

цвітіння пшениці озимої сумарна кількість опадів склала 186,1 мм, з яких продуктивних було п'ять: 11 мм – 14.04.2020, 31 мм – 26.04, 12 мм – 25.05, 16 мм – 30.05 і 14 мм – 15.06. Від настання фази цвітіння до кінця дозрівання пшениці озимої було зафіксовано ще 51,3 мм опадів, що були представлені трьома продуктивними дощами, а саме: 14 мм – 22.06.2020, 11 мм – 28.06 і 9,3 мм – 08.07. Весняно - літній період 2020 р. можна охарактеризувати як аномально жаркий. Впродовж червня денна температура повітря трималась позначки 32–35 °С. Цвітіння пшениці проходило в суху, жарку погоду із значним дефіцитом ґрунтової вологи, що мало суттєвий негативний вплив на формування маси 1000 зерен і врожайності, яка були мінімальною за період досліджень.

Погодні умови 2020/2021 вегетаційного року були оптимальними для росту та розвитку рослин пшениці озимої як в осінній, так і у весняно - літній періоди (рис. 13).

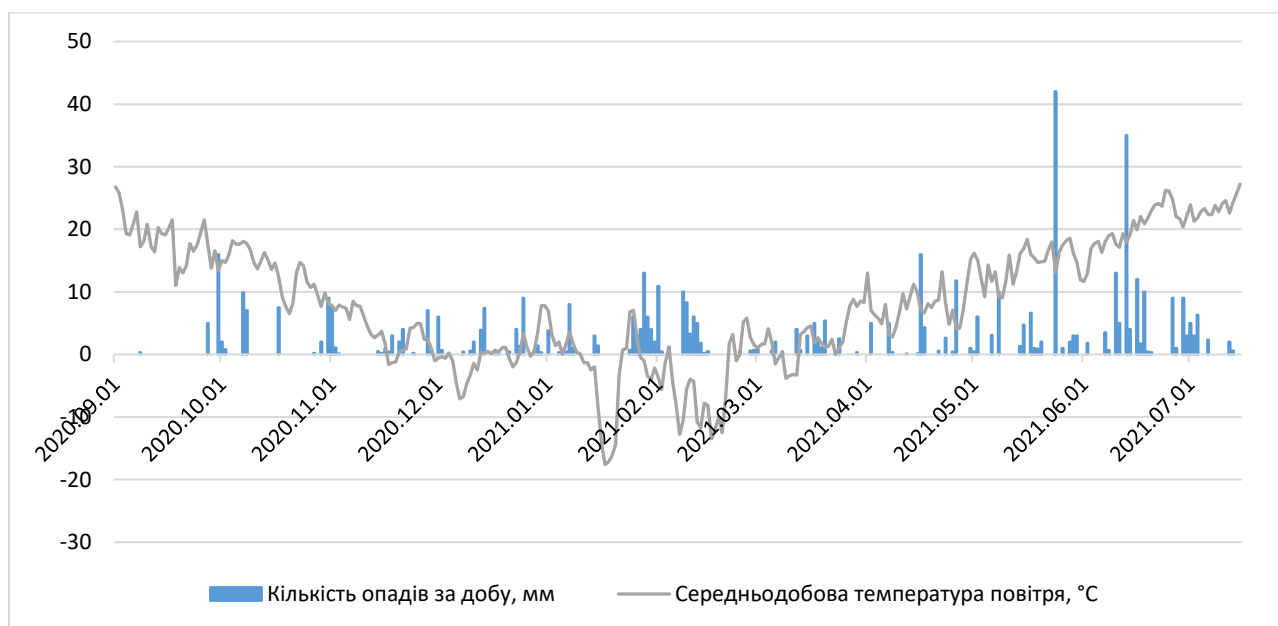


Рис. 13. Гідротермічний режим 2020/2021 вегетаційного року

Від першого строку сівби і до припинення осінньої вегетації (10.11.2020) випало 68,3 мм опадів. Осінь була найтеплішою за період досліджень, сума активних температур повітря від сівби до ЧПОВ становила 584,8 °С, в той час як у 2019 р. – 581,9 °С, а в 2018 р. – 427,3 °С. Тепла й волога погода в першій

половині вегетації сприяла розвитку рослин пшениці озимої: на момент переходу в зимовий спокій фаза 21–23 за міжнародною шкалою BBCH. Зимовий період у 2020/2021 вегетаційному році протікав нормально, декілька разів було зафіксовано аномальне, короткочасне наростання середньодобових температур повітря понад 5 °С, що не мало негативних наслідків для озимини. ЧВВВ був найпізнішим (26.03.2021). Рослини сортів та селекційних ліній пшениці озимої сформували значну біомасу, що вплинуло на рівень NDVI-індексу на момент цвітіння. Від моменту відновлення весняної вегетації й до настання цвітіння випало 221,9 мм опадів. Температурний режим цього періоду був плавно наростаючим, без весняних приморозків. Весняно - літні погодні умови 2021 р. були задовільними. Сума активних температур повітря в період цвітіння - дозрівання становила 1333,4 °С.

Погодні умови істотно вплинули на значення NDVI-індексу досліджуваних сортів та селекційних ліній пшениці озимої.

5.2 Оцінка генотипів пшениці м'якої озимої за даними дистанційного зондування та агрономічними ознаками, пов'язаними з урожайністю

Дисперсійний аналіз показав суттєвий вплив усіх факторів експерименту (рік, строк сівби, генотип) і їх взаємодій. Середні значення ознак за факторами дослідіу наведено в табл. 1.

Регресійна залежність між показниками вегетаційних індексів і врожайністю зерна дозволяє передбачити останню. У нашому дослідженні сила кореляцій між БПЛА-NDVI та врожайністю була порівняною з тією, про яку повідомляли інші автори. Hassan M.A. et al. [19] дійшли висновку, що мультиспектральний датчик, встановлений на БПЛА, є надійною платформою для вимірювання NDVI для прогнозування біомаси пшениці та врожайності.

Прості лінійні регресії та прості множинні регресії не забезпечували прийнятної точності передбачення. Включення до моделі множинної регресії всіх досліджуваних 288 кейсів (12 сортів*2 строки сівби* 3 роки досліджень* 4 повторення) та 42 параметрів (морфо-біологічні параметри, елементи структури

врожайності, інтегральні параметри погоди та навколишнього середовища) дало можливість підвищити точність прогнозу. Покрокова множинна регресія забезпечила точність у 20 % похибки.

При цьому слід зазначити, що прості моделі стосуються тільки досліджуваного набору даних.

Таблиця 1. Середні значення ознак за факторами досліду, 2018–2021 рр.

Сорт, лінія	Код*	Ознаки**								
		Yield	NDVI _{sv}	NDVI _{rv}	NDVI _{an}	PH	GpE	WKE	MoK	DVP
МПП Ассоль	A	5,96	0,390	0,482	0,668	101,59	44,03	1,90	42,63	214,5
Балада МИР	B	5,46	0,390	0,500	0,670	103,03	43,47	1,99	45,25	212,3
Грація МИР	G	5,25	0,383	0,482	0,602	98,69	42,14	1,89	44,98	213,7
EP 55023	E	4,02	0,398	0,483	0,618	87,28	44,03	1,89	42,61	205,2
МПП Ювілейна	U	5,41	0,383	0,487	0,605	98,52	41,34	1,62	39,29	212,5
МПП Лада	L	5,66	0,397	0,492	0,663	95,81	43,76	1,94	44,57	214,7
МПП Дніпрянка	D	6,02	0,383	0,498	0,583	102,84	41,75	1,81	42,94	212,8
Подольянка St	P	5,39	0,383	0,475	0,645	102,53	40,19	1,72	43,01	213,3
ЛЮТ 55198	L98	5,83	0,377	0,488	0,737	102,43	45,73	2,11	46,34	211,2
ЛЮТ 37519	L19	5,27	0,402	0,503	0,770	89,91	43,86	1,79	40,22	211,3
ЛЮТ 60049	L49	5,67	0,370	0,480	0,672	94,04	41,87	1,80	42,96	211,3
ЛЮТ 60107	L107	5,82	0,387	0,457	0,630	102,32	41,47	1,84	44,32	212,2
Середні значення за факторами										
Рік	2019	7,70	0,340	0,641	0,685	99,5	45,5	2,16	46,8	216,1
	2020	2,29	0,235	0,240	0,518	87,8	49,5	1,34	38,2	198,3
	2021	6,53	0,586	0,576	0,763	108,4	33,0	2,06	40,1	222,5
Строк посіву	1	5,57	0,458	0,539	0,693	101,1	42,6	1,87	42,4	217,6
	2	5,45	0,316	0,432	0,618	95,8	42,9	0,00	41,1	206,9

Примітка: * – код генотипу та ознак введені через несприйняття програмним забезпеченням кирилических символів; МИР – миронівська, EP – Еритроспермум і ЛЮТ – Лютеценс. ** – Yield – урожай (т/га), NDVI_{sv} – індекс NDVI на час припинення вегетації (безрозмірна величина), NDVI_{rv} – індекс NDVI на час відновлення вегетації, NDVI_{an} – індекс NDVI на час цвітіння, PH – висота рослин (см), GpE – кількість зерен у колосі (шт.), WKE – маса зерна з колоса (г), MoK – середня маса зернівки (мг) або TgW – маса 1000 зерен (г), DVP – тривалість періоду сходи–колосіння (діб).

Коефіцієнти детермінації регресій між передбаченими й спостережуваними значеннями (R^2) і похибки (середня абсолютна похибка (MAE), середня квадратична помилка (MSE), середня абсолютна відсоткова помилка (MAPE), яка власне визначає точність) наведені в табл. 2.

Проте, на нашу думку, точності передбачення (>20 % похибки навіть для множинної покрокової регресії) очевидно недостатньо для надійного добору більш продуктивних генотипів серед групи дуже близьких за параметрами генотипів у кінцевих ланках селекційного процесу, а на початкових може призвести до втрати цінних генотипів. Значно підвищити точність прогнозу може використання алгоритмів глибинного навчання [44].

Таблиця 2. Коефіцієнти детермінації регресійних моделей передбачення врожайності сортів і селекційних ліній пшениці м'якої озимої за вегетаційними індексами на час припинення вегетації (NDVIsv), її відновленні (NDVIrv), цвітіння (NDVIan) та іншими показниками

Регресії	Фактори впливу (предиктори моделі) ¹	R ²	MAE	RMSE	MAPE
Прості лінійні регресії	NDVIrv	0,38	1,93	0,91	39,20
	NDVIan	0,64	1,24	0,83	32,20
Множинні лінійні регресії	NDVIrv+NDVIan	0,69	1,23	0,81	28,20
	NDVIsv+NDVIrv+NDVIan	0,78	1,14	0,80	25,20
Множинна покрокова	PtC, AMS, NDVIan, NDVIsv, NDVIrv, DVP, SDI, PH, GDD, MoK, GpE, SPP, WKE	0,80	0,75	0,73	20,20
Множинна хребтова з навчанням	NDVIsv, NDVIrv, NDVIan, SPP, DVP, MoK, GpE	0,84	0,64	0,66	12,17
Багатошаровий перцептон	NDVIsv, NDVIrv, NDVIan, NDVIsu, MoK, PH, DVP, SPP, GDD	0,98	0,23	0,19	6,68
Регресія випадкових лісів	NDVIrv, NDVIan, NDVIsu, MoK, PH, SpL, DVP, SPP, GDD	0,95	0,38	0,25	10,66
Регресія опорних векторів	NDVIsv, NDVIrv, NDVIan, SPP, DVP, MoK, GpE, GDD	0,96	0,36	0,23	9,45

Примітка: * наведені суттєві предиктори, позначення відповідають табл. 1.

Ці методи можна використовувати для підбору моделі регресії, коли в даних є мультиколінеарність (значна скорельованість параметрів) і після навчання й виключення несуттєвих у моделі залишились лише суттєві предиктори (прогнозні змінні), у тому числі пов'язані з умовами середовища (сума опадів, сума ефективних температур повітря та тривалість вегетаційного періоду).

Використали хребтову множинну регресію, регресію випадкових лісів (random forest), регресію опорних векторів та багат шаровий перцептон (послідовна штучна нейронна мережа, яка складається з одного вхідного рівня, одного прихованого шару та одного вихідного рівня). Методи регуляризації та оцінки важливості параметрів дають можливість виключати несуттєві предиктори з моделі. Різні моделі включали, окрім індексу NDVI, виміряного в різні періоди, різні набори предикторів, окрім зазначених у таблиці 1: сума ефективних температур від до цвітіння – GDD, сума опадів – SPP, довжина колоса – SpL, індекс щільності колосу – SDI (кількість колосків на одиницю довжини колоса). Цільовою функцією є урожай (Yield). Використані моделі складніші для розуміння та інтерпретації, вони є нелінійними, проте перевагою моделей з навчанням є теоретична можливість використовувати їх для оцінювання нових наборів даних. Такі підходи останнім часом знаходять все ширше застосування. Отримані моделі не обов'язково є найкращими, проте вони показують тісний зв'язок між урожайністю та спектральними характеристиками посіву, які, імовірно, можна використовувати в селекційних програмах для добору кращих генотипів.

Враховуючи це, важливо дослідити можливість одночасного генетичного поліпшення пшениці м'якої озимої за урожайністю, показником NDVI_{an} (який відображає цілий набір біофізичних та фізіологічних показників, зокрема, це індекс листової поверхні, частка фізіологічно активної перехопленої радіації, загальна біомаса, ефективність засвоєння і накопичення азоту тощо) і агрономічно важливими ознаками, такими як кількість зерен у колосі, маса зернівки (маса 1000 зерен) і, принаймні, без збільшення висоти рослин і тривалості вегетаційного періоду. При доборі за фоновією ознакою, у якості якої в даному контексті можуть виступати вегетаційні індекси, важливо, щоб генетично обумовлена варіація такої ознаки була більшою від генетичної варіації цільової ознаки, якою є врожайність зерна, і мати високу успадкованість.

Аналіз АММІ дозволяє ідентифікувати високопродуктивні лінії,

адаптовані до конкретних середовищ. У подальшому аналізі вплив року, строку посіву і їх взаємодія об'єднали у фактор середовища (E), вплив взаємодії генотипу і факторів середовища об'єднали у фактор GEI (Genotype Environment Interaction) і виокремлювали фактор генотипу (G). Дані про врожайність зерна 12 досліджуваних генотипів протягом трьох послідовних років при двох строках посіву (шість тестових середовищ) були оброблені з використанням комбінованому аналізу ANOVA та АММІ після підтвердження однорідності дисперсій. Середні квадрати комбінованого дисперсійного аналізу показали, що середовища (об'єднано роки і строки посіву), генотипи і взаємодії (GEI) показали значні варіації на 0,1% рівні ($p < 0.001$) за врожайністю зерна та іншими ознаками (табл. 3).

Таблиця 3. Аналіз адитивних основних ефектів і мультиплікативної взаємодії (АММІ) врожайності зерна та інших ознак 12 генотипів пшениці озимої в шести тестових середовищах протягом вегетаційних сезонів 2018–2021 рр., % від загального варіювання

Джерело варіювання	Урожай, Yield	NDVI _{rv}	NDVI _{an}	Висота рослин PH	Маса зернівки МоК	Кількість зерен в колосі GrE
Середовище E	44,76	67,14	47,42	60,19	83,03	79,22
Генотип G	17,13	13,47	21,58	19,73	8,56	12,75
GEI	32,41	17,18	29,47	18,16	1,42	5,59
PC1*	36,89	75,54	56,80	54,70	46,18	51,80
PC2	33,55	13,11	31,02	23,29	39,81	25,34
PC3	13,45	5,89	5,74	15,07	7,12	13,38
PC4	9,77	4,45	5,24	4,17	6,38	6,98
PC5	6,34	1,01	1,20	2,77	0,51	2,49
PC6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Залишок R	5,70	2,20	1,53	1,91	7,00	2,44

Примітка: * головний компонент (PC)

Генотипи внесли значну частку загальної варіації (8,6-21,6%), тоді як навколишнє середовище та GEI внесли 8,6–21,6 і 1,42–32,4% відповідно. Крім того, аналіз показав, що GEI значною мірою пояснюється першими чотирма PC. Серед них PC1 (перший головний компонент) вніс 36,4–75,5% у загальний GEI,

а другий, третій і четвертий – відповідно менше. Вибір найкращих ліній повинен здійснюватися на основі оцінок продуктивності, а також широкої адаптивності [37]. Стабільні генотипи забезпечують стабільну врожайність без особливих коливань щороку.

Водночас загальновідомо, що селекціонери віддають перевагу сорту з найвищою врожайністю і середньою стабільністю, а не високостабільному генотипу з урожайністю вище чи на рівні середньої. Тому вибір генотипу просто на основі середньої врожайності зерна під час оціночних випробувань може ввести в оману щодо вибору генотипу, який може не зберігатися протягом тривалого часу через його низьку стабільність.

Аналіз головних компонентів (РСА) багатовимірною аналізу дозволяє легше зрозуміти ефекти та зв'язки між різними ознаками і з'ясовує генотипові відмінності між набором заданих ознак. Головні компоненти є ортогональними, тобто кореляція між ними дорівнює нулю. Кут між векторами ознак показує кореляцію між ними – чим гостріший кут, тим сильніша позитивна кореляція, і чим такий кут більший, тим слабша кореляція. Кут 90° відповідає нульовій кореляції, кути більші 90° (до 180°) відповідають негативним (від'ємним) кореляціям. Перші два головні компоненти (РС) пояснюють 57,4% загальної варіації. РС1 пояснює 44,5% загальної дисперсії, а РС2 пояснює 18,3% загальної дисперсії (рис. 3). Фенологічні ознаки SPP і DVP продемонстрували сильну позитивну кореляцію, за якою йшла їх слабша позитивна кореляція з PH. Сильно скорельованими виявились урожай і NDVI_{rv} та NDVI_{an}, тоді як NDVI_{sv} мав слабшу кореляцію з урожаєм зерна. GrE продемонструвала негативну кореляцію з більшістю ознак. Слабшу кореляцію спостерігали між TgW та іншими ознаками. Це показує принципову можливість добору за NDVI на збільшення продуктивності. Аналіз основних компонентів показав відсутність чіткої структури серед досліджуваних кейсів, і це було очікувано, оскільки популяція була з одного розсадника. Проте певна стратифікація все ж спостерігалась, що, як і результати ANOVA (див. табл. 3) свідчить про значну взаємодію генотипу і середовища ($G \times E$). Така взаємодія значно ускладнює

процес селекції, особливо за ознаками, які мають складну полігенну структуру, і вимагає проведення багатосередовищних випробувань для достовірної оцінки перспективних генотипів, при цьому ідентифікація високоурожайних і стабільних генотипів дуже важлива для селекціонера, щоб сорт могли довше використовувати у виробничих умовах.

GGE-біplot дозволяє візуалізувати селекційні лінії щодо продуктивності та стабільності. Аналіз біплоту GGE згідно з [45, 46] показав, що для урожайності на горизонтальну вісь (PC1) припадало 56,8% загальної варіації (основним був вплив генотипів), тоді як на вертикальну вісь (PC 2) припадало 31,02% (стабільність), для показника NDVI_{an} – 38,9 і 33,6% відповідно (рис. 14). Вісь середніх координат середовища (AEC) — це лінія зі стрілкою, яка проходить від початку біплота до середнього середовища, зображеного пунктирним колом.

Пряма лінія зі стрілкою, яка проходить через початок біплота, називається середньою координатою середовища (AEC), вона вказує на лінії з найкращою продуктивністю. Лінія генотипу, перпендикулярна до осі AEC, представляє мінливість з точки зору стабільності. Таким чином, біplot розташував показники врожайності наступним чином: МП Дніпрянка > МП Ассоль > ЛЮТ 60107 > ЛЮТ 55198 > ЛЮТ 60049 > МП Лада, тобто сорти і лінії правіше від початку координат (значення адаптивної норми) відрізнялись за продуктивністю у порядку зменшення проекції на вектор AEC (рис. 15 А).

Практично аналогічним чином спостерігалось ранжування за показником NDVI – ЛЮТ 37519 > ЛЮТ 55198 > ЛЮТ 60049 > МП Лада > МП > Дніпрянка (рис. 15 В), винятком були лінія ЛЮТ 37519 і сорт МП Ассоль. Аналізуючи характер цього біплота, слід зазначити, що в цілому характер розташування генотипів за урожаєм і показником NDVI_{an} співпадав, відрізняючись в деяких нюансах, які, можливо пов'язані з генетично обумовленими особливостями реутилізації надземної біомаси в урожай зерна, адже NDVI є одним з індикаторів її накопичення.

Вісь, перпендикулярна АЕС, відображала стабільність урожайності генотипу (лінії). Стабільність урожайності генотипів вважається сильнішою, якщо довжина лінії, перпендикулярної горизонтальній осі АЕС, була коротшою. Генотипи МП Дніпрянка, МП Ассоль були найбільш стабільними та високопродуктивними, оскільки вони були найдалшими від центра з найкоротшою довжиною вектора. Найдовші вектори середовища серед тестових робіт його найбільш «дискримінаційним» з потенціалом для розрізнення різних генотипів.

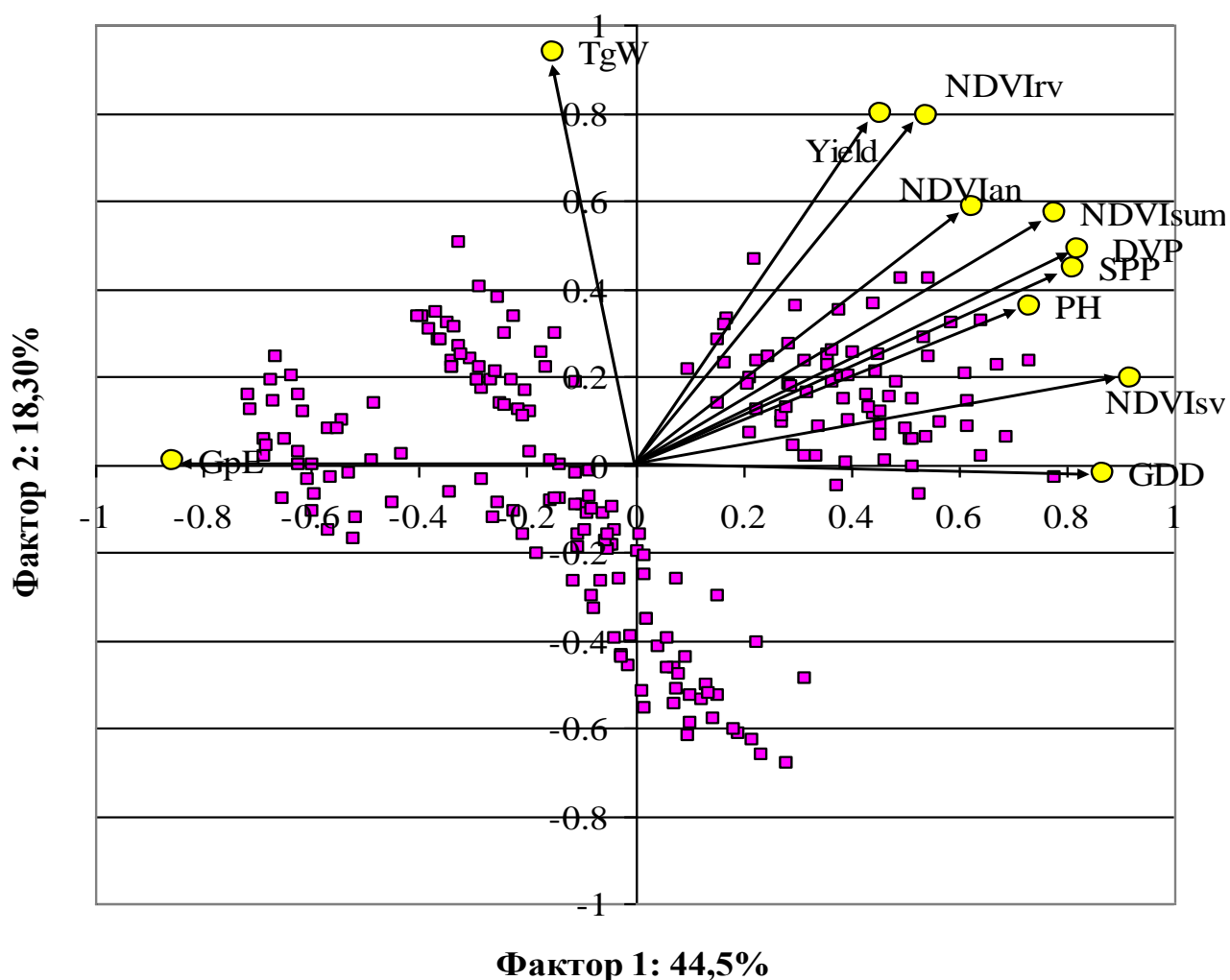
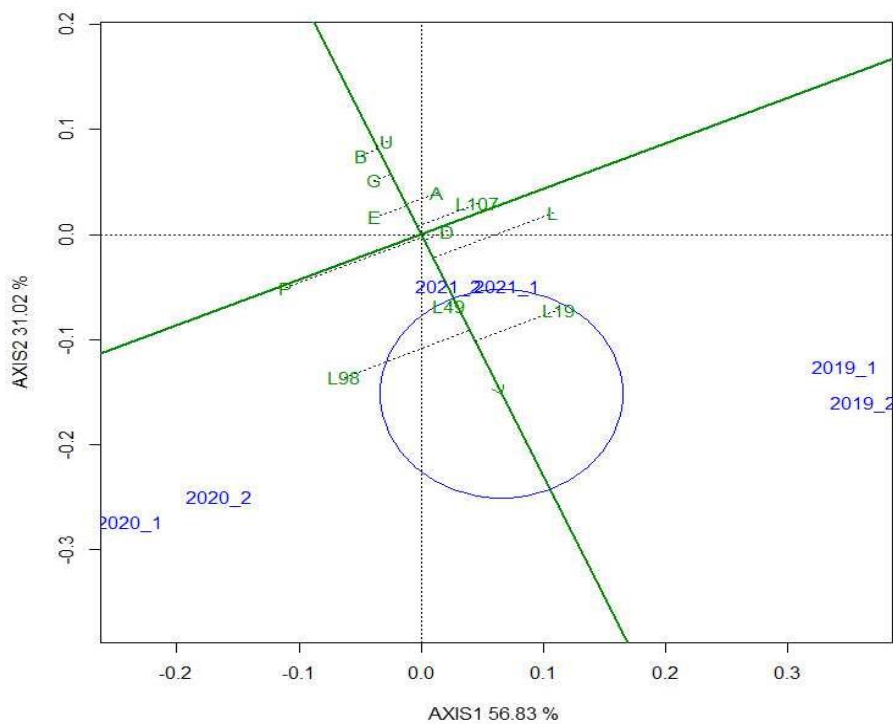


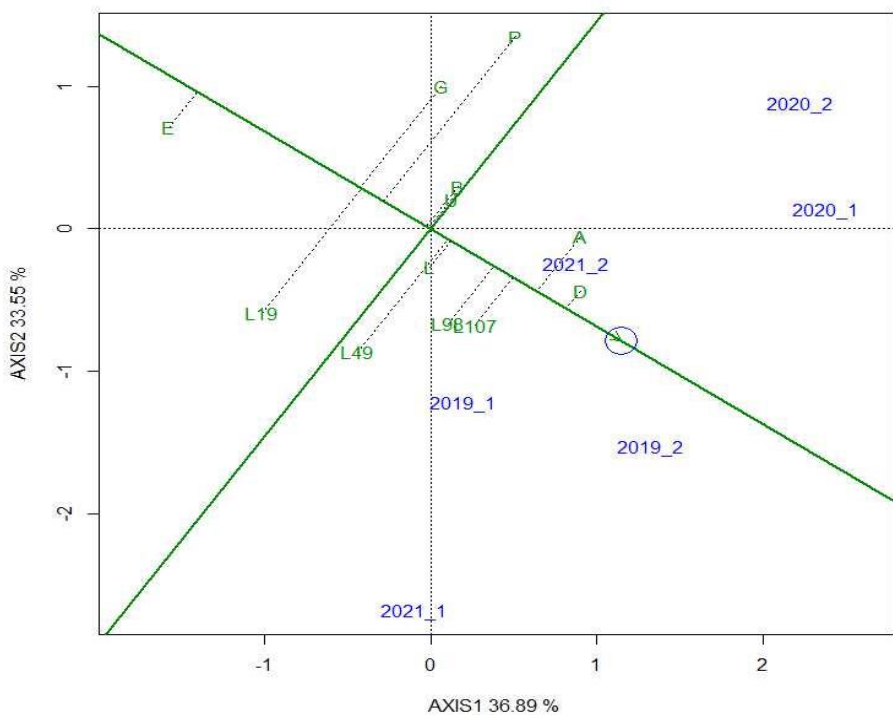
Рис. 14. Діаграма основних компонентів і асоціації генотипів пшениці з агрономічними ознаками.

Умовні позначення відповідають табл.1. Крім того, SPP – сума опадів від сходів до колосіння, GDD – сума ефективних температур (>5°C) від сходів до колосіння.



NDVI при цвітінні (NDVIan)

A



Урожай зерна

B

Рис. 15. Біплотний графік за координатою середнього середовища (АЕС), що показує середню врожайність і стабільність 12 генотипів (А – NDVIan, В – урожай зерна), оцінених у 2018-2021 рр.

Порівняльний аналіз стабільності і урожайності за GGE-biplot показав, що сорт Дніпрянка був найстабільнішим, а також одним з найкращих за врожайністю у різних досліджуваних середовищах. Подібним чином лінії ЛЮТ 60107 і ЛЮТ 55198 також мали вищу середню врожайність і стабільність, порівняно з іншими лініями, отже, їх можна використовувати як високопродуктивні в різних середовищах. Ці лінії можна також рекомендувати для подальшої реєстрації у якості сортів.

Стабільність генотипів за показником NDVI_{an} виявилась дещо вищою порівняно з урожайністю, проте загалом характер ранжування зберігався. Таким чином, проведений аналіз головних компонент, АММІ та GGE-biplot аналіз показав принципову можливість опосередкованої оцінки та вибору генотипів за урожайність на основі спектральних вегетаційних індексів.

Розкладання фенотипової дисперсії на її компоненти, генотипову дисперсію та дисперсію середовища дозволило оцінити величину мінливості, зумовленої генотиповими особливостями, і таким чином оцінити такі параметри, як успадкованість (h^2g), генетична дисперсія (V_g), залишкова дисперсія (V_e), фенотипова дисперсія (V_p), дисперсія взаємодії генотип \times середовище V_{GEL} , селекційна точність, генотиповий коефіцієнт варіації CV_g , коефіцієнт залишкової варіації CV_e , і перевірити, для яких ознак є більший внесок через генотипову дисперсію. Висока успадкованість була оцінена для всіх досліджуваних ознак, представлених у таблиці 4.

Таке розкладання компонентів дисперсії є важливими для селекціонерів, оскільки вони допомагають у проведенні селекційних програм, спрямованих на отримання кращого результату. Високі значення коефіцієнта генетичної дисперсії (CV_g) та успадкованості значення бажані для пошуку кращої генетичної конституції, оскільки ці змінна кількісно визначає величину генетичної варіації, доступної для відбору. Для більшості оцінюваних ознак спостерігалось переважання генетичної варіації у фенотиповій дисперсії. Оцінки успадкованості ознак коливалися від 0,23 (GrE) до 0,76 (NDVI_{an}),

оцінка за допомогою тесту максимальної правдоподібності (LRT) також підтвердила суттєвий вплив генотипів на більшість ознак.

Таблиця 4. Компоненти дисперсії та генетичні параметри 12 генотипів пшениці для 10 ознак МП, 2018-2021 рр.

Компоненти дисперсії *	Ознаки									
	Yield	NDVIsv	NDVlrv	NDVlan	PH	SpL	SpN	GpE	MoK	WKE
h^2g	0,62	0,39	0,69	0,76	0,63	0,48	0,41	0,23	0,67	0,50
V_g	0,16	0,0001	0,0004	0,0035	14,72	0,14	0,16	0,77	4,31	0,01
V_{GEI}	0,36	0,0004	0,0006	0,0043	34,14	0,44	0,90	9,94	7,84	0,03
V_e	0,55	0,0245	0,0112	0,0018	35,55	0,44	1,01	50,02	13,31	0,21
V_r	0,08	0,0006	0,0004	0,0004	0,31	0,01	0,04	0,78	1,52	0,00
V_p	1,15	0,026	0,013	0,010	84,72	1,03	2,11	61,50	26,97	0,26
μ	7,15	0,52	0,60	0,71	103,7	9,3	17,0	39,2	44,3	1,7
$CV_g\%$	5,58	2,16	3,39	8,33	3,70	4,02	2,34	2,24	4,69	5,42
$CV_e\%$	10,33	30,18	17,69	6,00	5,75	7,11	5,93	18,05	8,24	26,37
$CV_p\%$	4,06	4,63	3,17	2,90	0,54	1,22	1,20	2,25	2,78	2,84
$CV_r\%$	15,03	30,85	18,77	14,08	8,88	10,94	8,57	20,02	11,73	29,10
p_g	0,036	0,330	0,011	0,002	0,030	0,052	0,269	0,079	0,014	0,087
$p_{G \times E}$	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
p_e	0,000	0,000	0,000	0,034	0,002	0,036	0,050	0,001	0,081	0,000
LSD	0,75	0,03	0,04	0,09	7,08	0,81	0,90	2,24	3,66	0,20
LRT**	43,94	6,48	22,51	69,86	53,83	3,05	2,58	1,14	14,37	1,48

Примітка: Умовні позначення ознак відповідають табл. 1.

* h^2g – успадкованість у широкому розумінні; V_g – варіанса генотипу; V_{GEI} – варіанса $G \times E$; V_e – варіанса середовища; V_r – залишкова дисперсія; V_p – фенотипова варіанса; μ – генеральне середнє; $CV_g\%$, $CV_e\%$, $CV_p\%$, $CV_r\%$ – генотиповий, середовищний, фенотиповий та залишковий коефіцієнти варіації відповідно; p_g – значущість генотипу; p_e – значущість середовища; $p_{G \times E}$ – значущість взаємодії $G \times E$; LSD – найменша суттєва різниця; LTR – тесту максимальної правдоподібності. ** $\chi^2_{1\%} = 6.63$, $\chi^2_{5\%} = 3.84$

Таким чином, наявність генетичної мінливості цих ознак дає змогу відібрати кращі генотипи за фенотипами. Висока успадкованість свідчить про те, що такий фенотип здебільшого зумовлений генотипом, варіації успадковуються наступним поколінням, і добір на основі фенотипової варіації буде ефективним для покращення врожаю в майбутньому.

Проте для подальшого використання виділеного матеріалу у селекційному процесі важливо прогнозувати генетичну цінність, усуваючи вплив навколишнього середовища. Змішані моделі та багатофакторний аналіз є потужними інструментами для відбору кращих генотипів у програмах селекції рослин, зокрема метод BLUP (найкращий лінійний неупереджений прогноз)

використовували для прогнозування генетичних цінностей та визначення потенціалу генотипів пшениці для генетичного вдосконалення рослин завдяки відбору багатьох ознак [36, 37]. Значення, передбачені за допомогою методології BLUP для досліджених ознак, вказують на бажані генотипові значення ліній і сортів, оскільки вони демонструють перевагу по відношенню до середнього значення і до стандарту і таким чином можна виділити кращі лінії. Результати такого аналізу для урожаю зерна і величини показника NDVI_{an} представлені на рис. 16 В. За прогнозованими генетичними значеннями урожайності генотипи розташувались у такому порядку: МП Дніпрянка>МП Ассоль>ЛЮТ 55198> ЛЮТ 60107> МП Лада (рис. 16 А), інші (за винятком лінії EP 55023) від стандарту Подолянка не відрізнялись.

За прогнозованими генетичними значеннями NDVI_{an} порядок генотипів був наступним: МП Ассоль>МП Дніпрянка>ЛЮТ 55198>EP 55023> МП Лада, інші (за виключенням МП Ювілейна) від стандарту не відрізнялись. Важливо, що ТОП-3 в обох випадках були сорти МП Ассоль, МП Дніпрянка і лінія ЛЮТ 55198, що свідчить про перспективність використання показника NDVI як фонові ознаки для добору високопродуктивних генотипів. Однак методів аналізу за однією ознакою і аналізу середнього значення, регресії та відхилення від регресії може бути недостатньо для оцінки продуктивності і стабільності за багатьма ознакам і середовищами. Тому дані аналізують за індексом стабільності багатьох ознак, як, наприклад, середньозважене значення суми абсолютних балів, запропонованих Olivoto та ін. [47], або рейтингом адаптивності сорту у багатьох середовищах, як запропоновано зокрема В.А. Власенком [48].

Індекс підсумовування рангів I_j [41] є аналогом попереднього, з тією різницею, що він застосовується для прогнозованих генетичних значень. За індексом I_j, індексом дистанції між генотипом і ідеотипом D_{ii}" [42], та індексом Z [43] на основі передбачуваних значень кращих генотипів, які переважають стандарт, було розраховано селекційний приріст (selection gain – SG) за всіма показниками і відсоток селекційного приросту (SG%). Слід зазначити, що

індекс Z, запропонований Mendes F.F. et al. [43], є аналогом індексу відхилення від адаптивної норми, запропонованого П.П. Літуном та ін. [49], і також відрізняється лише застосуванням до прогнозованих генотипових значень ознак.

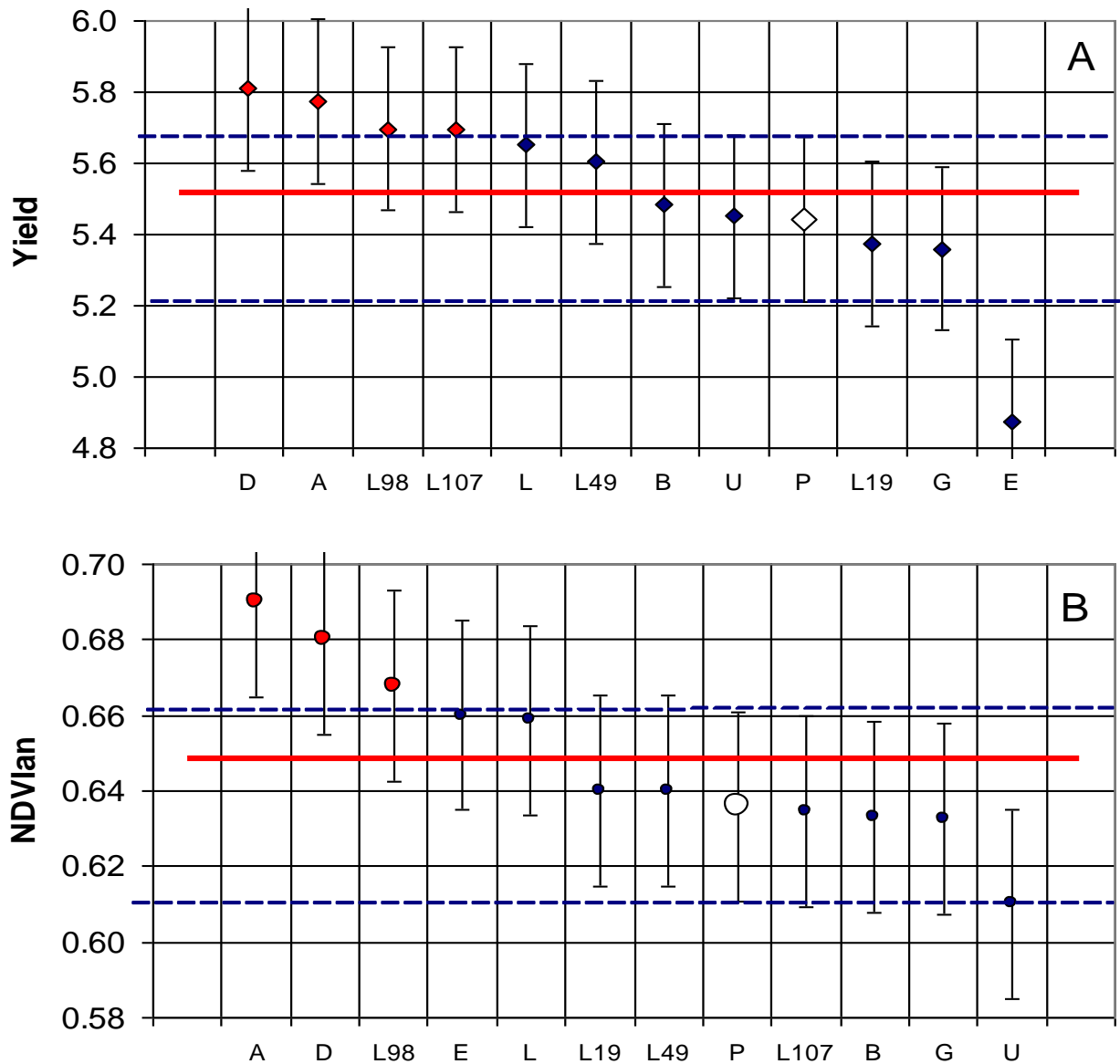


Рис. 16. Прогнозовані генетичні значення (найкращий лінійний неупереджений прогноз – BLUP) 12 генотипів озимої пшениці для ознак: урожай (Yield, т/га) та NDVian

Примітка: Червоні (сприятливі) і сині (несприятливі) крапки представляють генотипові значення вище а:бо нижче загального середнього (червона лінія), білі крапки представляють стандарт (Подольська). Стовпчики являють собою довірчий інтервал генотипового значення. Синім пуктиром виділено довірчий інтервал для порівняння зі стандартом.

Результати такої оцінки представлено у таблиці 5. Звертає на себе увагу те, що різні індекси дають дещо різні прогнозовані значення селекційних приростів, оскільки набір відібраних генотипів відрізняється. Добір за індексом I_j забезпечив найбільшу суму оцінок SG% (14,3 %) порівняно з іншими моделями добору. Проте представлені генотипи, відібрані за цим індексом, мають середнє значення висоти рослин на 1,6 см більше, що, очевидно, є несприятливим для програм селекції пшениці.

Відбір за NDVI забезпечив очікуваний приріст урожайності, співставний з безпосереднім добором на продуктивність, однак інші показники мали менше селекційне зрушення. Можливо також, що для більш точної оцінки потрібне включення певних вагових коефіцієнтів для різних ознак, оскільки в цільову ознаку (урожай зерна) вони мають різний вклад.

Очевидно, це потребує додаткового вивчення, зокрема відсутність однакового SG% серед усіх ознак у сприятливому напрямку відбору можна пояснити існуванням лінійного зв'язку між ознаками. Якщо природа цього зв'язку зумовлена генетичними чинниками, він може бути порушений внаслідок рекомбіногенезу.

Більш інформативним може бути індекс Z (індекс відхилення від адаптивної норми). На основі зваженого значення цього індексу за всіма ознаками чи за їх групою можна виявити ті, за якими генотипи можуть бути класифіковані як бажані чи небажані в багатьох середовищах.

На рис. 17 представлена оцінка генотипів за значенням індексу Z при відборі генотипів тільки за продуктивністю (рис. 17A), за індексами NDVI (рис. 17B), морфо-біометричними ознаками (рис. 17 C) та за комплексом ознак (рис. 17 D).

При цьому при відборі за урожайністю виділились генотипи МП Ассоль, МП Дніпрянка, ЛЮТ 55198, ЛЮТ 37519, ЛЮТ 60049, ЛЮТ 60107; при відборі за показниками NDVI – МП Лада, МП Дніпрянка, ЛЮТ 37519, ЛЮТ 60049, ЛЮТ 60107; за морфо-біометричними ознаками – МП Ассоль, Балада МИР, ЛЮТ 55198; за комплексом ознак – МП Ассоль, Балада МИР, МП Лада, МП

Дніпрянка, ЛЮТ 55198 , ЛЮТ 37519. Селекційні лінії, які знаходяться близько до кола, потребують подальшого дослідження на предмет стабільності, оскільки їх продуктивність близька до адаптивної норми.

Таблиця 5. Оцінки загальних середніх значень (\bar{X}_o), середніх значень відібраних генотипів (\bar{X}_s), селекційного диференціалу (SD), успадкованості (h^2), селекційного приросту (SG) та його частки в % (SG%) при одночасному відборі для кращих генотипів озимої пшениці за шістьма ознаками

Ознака	\bar{X}_o	\bar{X}_s	SD	h^2	SG	SG%	Відібрані генотипи
Індекс підсумовування рангів							
Урожайність	7,1	7,39	0,39	0,62	0,24	3,24	ЛЮТ 55198
Висота рослин	103,7	103,30	2,63	0,63	1,65	1,60	МП Лادا
Довжина колоса	9,3	9,31	0,25	0,48	0,12	1,30	МП Ассоль
Кількість зерен	39,2	39,45	0,65	0,23	0,15	0,38	ЛЮТ 60049
Маса зернівки	44,3	45,15	2,15	0,67	1,44	3,19	
Маса зерна з колоса	1,7	1,80	0,17	0,50	0,09	4,84	
Тривалість періоду сходи-колосіння (ТВП)	212,1	212,9	-0,92	0,59	-0,54	-0,25	$\Sigma=14,3\%*$
Індекс дистанції між генотипом і ідеотипом							
Урожайність	7,1	7,19	0,09	0,62	0,06	0,79	EP 55023
Висота рослин	103,7	101,49	-2,21	0,63	-1,39	-1,37	ЛЮТ 55198
Довжина колоса	9,3	9,30	0,00	0,48	0,00	0,03	ЛЮТ 37519
Кількість зерен	39,2	39,24	0,04	0,23	0,01	0,03	ЛЮТ 60049
Маса зернівки	44,3	44,50	0,20	0,67	0,13	0,30	
Маса зерна з колоса	1,7	1,76	0,06	0,50	0,03	1,83	
ТВП	212,1	209,76	-2,33	0,59	-1,37	-0,65	$\Sigma=0,95\%$
Відбір за продуктивністю							
Урожайність	7,1	7,41	0,31	0,62	0,19	2,57	МП Дніпрянка
Висота рослин	103,7	104,89	1,44	0,63	0,91	0,86	МП Ассоль
Довжина колоса	9,3	9,33	0,22	0,48	0,11	1,13	ЛЮТ 55198
Кількість зерен	39,2	39,34	0,51	0,23	0,12	0,30	ЛЮТ 60107
Маса зернівки	44,3	44,51	1,95	0,67	1,30	2,93	ЛЮТ 60049
Маса зерна з колоса	1,7	1,77	0,10	0,50	0,05	2,83	
ТВП	212,1	212,40	-1,23	0,59	-0,73	-0,34	$\Sigma=10,3\%$
Відбір за NDVI							
Урожайність	7,1	7,39	0,29	0,62	0,18	2,46	МП Лادا
Висота рослин	103,7	101,77	-1,93	0,63	-1,22	-1,19	ЛЮТ 37519
Довжина колоса	9,3	9,35	0,05	0,48	0,02	0,25	МП Дніпрянка
Кількість зерен	39,2	39,39	0,19	0,23	0,04	0,11	ЛЮТ 60049
Маса зернівки	44,3	44,76	0,46	0,67	0,31	0,69	ЛЮТ 60107
Маса зерна з колоса	1,7	1,75	0,05	0,50	0,03	1,54	
ТВП	212,1	212,13	0,04	0,59	0,02	0,01	$\Sigma=3,88\%$

Примітка: * Σ – сумарний відсоток селекційного приросту

Така ж оцінка за графічним відображенням індексу Z для генетичних значень окремих ознак може бути корисною для більш детального вивчення генотипів за окремими ознаками чи групами ознак. За допомогою візуального аналізу за індексом Z можна визначити більшу частку сприятливих алелей для всіх ознак, які розглядаються при відборі. За подібністю зображень на рис. 6 найбільшим був рівень узгодженості між відбором за продуктивністю та відбором за індексом NDVI. Це є свідченням можливості використання спектральних вегетаційних індексів у селекційному процесі, особливо враховуючи дистанційний та не деструктивний характер оцінки, а метод REML/BLUP у поєднанні з багатоваріантними методами для вибору кращих генотипів з графічним виділенням за індексом Z генотипів дозволяє визначити їх як перспективні за комплексом ознак. Для селекції ліній пшениці також цікавим є розташування показників генотипових значень для виявлення кращих генотипів за селекційними ознаками, що виділяються графічно за індексом Z .

Отже, встановлено можливість використання спектральних вегетаційних індексів, отриманих з БПЛА, у селекційному процесі. Більш точна ідентифікація високоперспективних генотипів за комплексом ознак забезпечується поєднанням застосуванням багатовимірних статистичних методів, селекційних індексів з безпосереднім використанням показників NDVI.

Метод REML/BLUP у поєднанні з багатовимірними методами АММІ та GGE-біплат з графічним виділенням генотипів за індексом Z дозволяє визначити перспективні за комплексом ознак. Виділено лінії ЛЮТ 37519, ЛЮТ 60049, ЛЮТ 6010 і сорти МІП Лада, МІП Дніпрянка для подальшого використання в програмах селекції. Перспективою подальших досліджень є підвищення точності оцінки і добору потенційно високоврожайних і стабільних ліній пшениці в селекційних програмах за допомогою дистанційного зондування з обмеженням використання традиційних деструктивних методів.

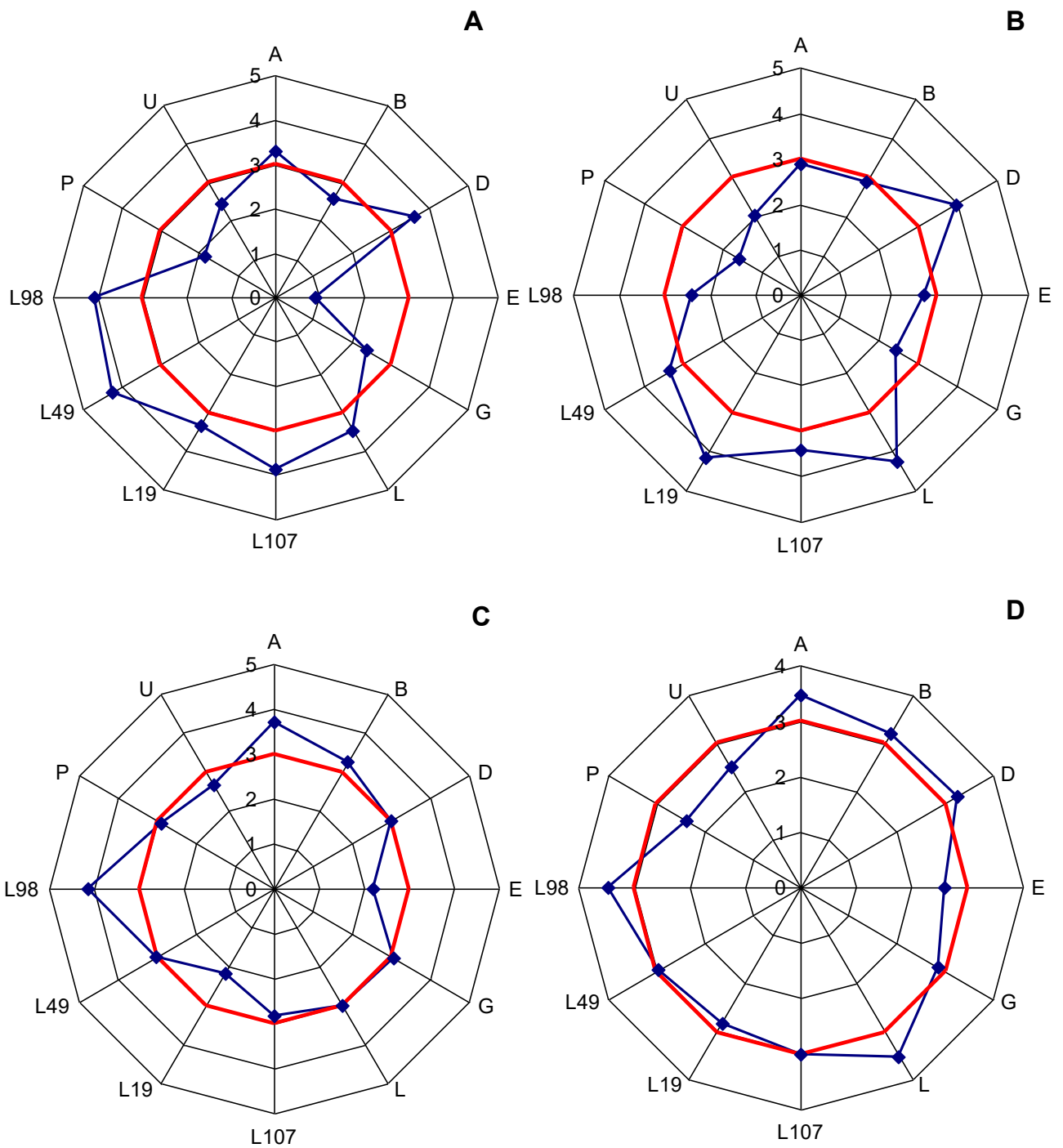


Рис. 17. Прогнозування генетичних переваг за допомогою зваженого індексу віддаленості від адаптивної норми (Z-індекс), застосованого до передбачених BLUP генотипових значень урожайності (A), індексу NDVI при припиненні та відновленні вегетації і при цвітінні (B), морфо-біометричних показників (C) та за комплексом ознак (D). Відібрані генотипи мають значення >3

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Заключний звіт про науково-дослідну роботу «Методи дистанційного оцінювання біофізичних параметрів лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів в межах різних ландшафтно-кліматичних зон території України». Науковий керівник НДР директор ЦАКДЗ ІГН НАН України академік НАН України В. І. Лялько. Київ, 2016. 137 с.
2. Сахацький О. І. Методологія використання матеріалів багатоспектральної космічної зйомки для вирішення гідрогеологічних задач: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра геол. наук, спец. 05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження. К., 2010. 39 с.
3. Кохан С. С. Застосування вегетаційних індексів на основі серії космічних знімків IRS-1D LISS-III для визначення стану посівів сільськогосподарських культур. *Космічна наука і технологія*. 2011. Т. 17. № 5. С. 58–63.
4. Мединський Д. В. Застосування безпілотних літальних апаратів в сільському господарстві. *Science Review*. 2017. 7 (7). Vol. 1. P. 58–62.
5. Солоха М. О., Бабушкіна Р. О., Надєєвець А. С. Проблеми ідентифікації сільськогосподарської рослинності на основі аерофотозйомки *Таврійський науковий вісник*. 2015. № 91. С. 72–78.
6. Andrew S., Bryn S. Wheat Outlook: Economic Research Service, USDA. October 14, 2021. WHS-21j. P. 2–9. URL: <https://www.ers.usda.gov/webdocs/outlooks/102370/whs-21j.pdf?v=941.5>
7. Tester M., Langridge P. Breeding Technologies to Increase Crop Production in a Changing World. *Science*. 2010. Vol. 327, Iss. 5967. P. 818–822. doi: 10.1126/science.1183700
8. Long S. P., Marshall-Colon A., Zhu X.-G. Meeting the Global Food Demand of the Future by Engineering Crop Photosynthesis and Yield Potential. *Cell*. 2015. Vol. 161. P. 56–66. doi: 10.1016/j.cell.2015.03.019
9. Chawade A., Van Ham J., Blomquist H. et al. High-throughput field-phenotyping tools for plant breeding and precision agriculture. *Agronomy*. 2019. 10(5): 258. doi: 10.3390/agronomy9050258
10. Bendig J., Yu K., Aasen, H. et al. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass

- monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015. Vol. 39. P. 79–87. doi: 10.1016/j.jag.2015.02.012
11. Chapman S.C., Merz T., Chan A. et al. Pheno-copter: A low- altitude, autonomous remote-sensing robotic helicopter for high-throughput field- based phenotyping. *Agronomy*. 2014. Vol. 4, Iss. 2. P. 279–301. doi: 10.3390/agronomy4020279
 12. Haghghattalab A., González Pérez L., Mondal,S. et al. Application of unmanned aerial systems for high throughput phenotyping of large wheat breeding nurseries. *Plant Methods*. 2016. Vol. 12, Iss. 1. Article number 35. doi: 10.1186/s13007-016-0134-6
 13. Zhang J., Virk S., Porter W. et al. Applications of unmanned aerial vehicle based imagery in turfgrass field trials. *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. Article number 279. doi: 10.3389/fpls.2019.00279
 14. Lee C.-J., Yang M.-D., Tseng H.-H. et al. Single-plant broccoli growth monitoring using deep learning with UAV imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 207. No 107739. doi: 10.1016/j.compag.2023.107739
 15. Potgieter A.B., George-Jaeggli B., Chapman S.C. et al. Multi-spectral imaging from an unmanned aerial vehicle enables the assessment of seasonal leaf area dynamics of sorghum breeding lines. *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. No 1532. doi: 10.3389/fpls.2017.01532
 16. Guillen-Climent M.L., Zarco-Tejada P.J., Berni J.A.J. et al. Mapping radiation interception in row-structured orchards using 3D simulation and high-resolution airborne imagery acquired from a UAV. *Precision Agriculture*. 2012. Vol. 13, Iss. 4. P. 473–500. doi: 10.1007/s11119-012-9263-8
 17. Cabrera-Bosquet L., Molero G., Stellacci A. et al. NDVI as a potential tool for predicting biomass, plant nitrogen content and growth in wheat genotypes subjected to different water and nitrogen conditions. *Cereal Research Communications*. 2011. Vol. 39, Iss. 1. P. 147–159. doi: 10.1556/CRC.39.2011.1.15
 18. Acorsi M. G., Abati Miranda F. das D., Martello M. et al. Estimating biomass of black oat using UAV-based RGB imaging. *Agronomy*. 2019. Vol. 9, Iss. 7. Article number 344. doi: 10.3390/agronomy9070344
 19. Hassan M.A., Yang M., Rasheed A. et al. A rapid monitoring of NDVI across the

- wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform. *Plant Science*. 2019. Vol. 282. P. 95–103. doi: 10.1016/j.plantsci.2018.10.022
20. Su J., Liu C., Coombes M. et al. Wheat yellow rust monitoring by learning from multispectral UAV aerial imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. Vol. 155. P. 157–166. doi: 10.1016/j.compag.2018.10.017
 21. Rutkoski J., Poland J., Mondal S. et al. Canopy temperature and vegetation indices from high-throughput phenotyping improve accuracy of pedigree and genomic selection for grain yield in wheat. *G3: Genes, Genomes, Genetics*. 2016. Vol. 6, Iss. 9. P. 2799–2808. doi: 10.1534/g3.116.032888
 22. Hoffmeister D., Waldhoff G., Korres W. et al. Crop height variability detection in a single field by multi-temporal terrestrial laser scanning. *Precision Agriculture*, 2016. Vol. 17. P. 296–312. doi: 10.1007/s11119-015-9420-y
 23. Du M., Noguchi N. Monitoring of wheat growth status and mapping of wheat yield's within-field spatial variations using color images acquired from UAV-camera System. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, Iss. 3. No 289. doi: 10.3390/rs9030289
 24. Olanrewaju S., Rajan N., Ibrahim A.M.H. et al. Using aerial imagery and digital photography to monitor growth and yield in winter wheat. *International Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 40, Iss. 18, P. 6905–6929. doi: 10.1080/01431161.2019.1597303
 25. Yang C., Everitt J.H. Relationships between yield monitor data and airborne multirate multispectral digital imagery for grain sorghum. *Precision Agriculture*. 2002. Vol. 3. P. 373–388. doi: 10.1023/A:1021544906167
 26. Duan B., Fang S., Zhu R. et al. Remote estimation of rice yield with unmanned aerial vehicle (uav) data and spectral mixture analysis. *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. No 204. doi: 10.3389/fpls.2019.00204
 27. Wang F., Wang F., Zhang Y. et al. Rice yield estimation using parcel-level relative spectral variables from uav-based hyperspectral imagery. *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. No 453. doi: 10.3389/fpls.2019.00453
 28. Sun J., Poland J.A., Mondal S. et al. High-throughput phenotyping platforms enhance genomic selection for wheat grain yield across populations and cycles in early stage. *Theoretical and Applied Genetics*. 2019. Vol. 132, Iss. 6. P. 1705–

1720. doi: 10.1007/s00122-019-03309-0
29. Gates, David M. *Biophysical Ecology*. Springer-Verlag New York Inc. 1980. P. 611. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-6024-0>
30. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium*. 1973. Vol. 1. P. 309–317. Retrieved from <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>
31. Weier John, Herring David Measuring Vegetation (NDVI & EVI). NASA Earth Observatory. 30 august 2000. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation>
32. Тараріко О. Г., Ільєнко Т. В. Моніторинг стану вологозабезпеченості посівів за даними дистанційного зондування землі. *Вісник аграрної науки*. 2015. № 9. С. 52–58.
33. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., перераб. и доп. Москва : Агропромиздат, 1985. 351 с.
34. Методика проведення експертизи та державного сортовипробування сортів рослин зернових, круп'яних та зернобобових культур. *Охорона прав на сорти рослин* : офіц. бюл. / за ред В. В. Волкодава. Київ : Алефа, 2003. Вип. 2, Ч. 3. 241 с.
35. Duan T., Chapman S. C., Guo Y., Zheng B. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. *Field Crops Research*. 2017. Vol. 210. P. 71–80. doi: 10.1016/j.fcr.2017.05.025
36. Zobel R.W., Wright M.J., Gauch H.G. Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal*. 1988. Vol. 80, Iss. 3. P. 388–393.
37. Gauch H.G. A simple protocol for AMMI analysis of yield trials. *Crop Science*. 2013. Vol. 53, Iss. 5. P. 1860–1869. doi: 10.2135/cropsci2013.04.0241
38. Yan W., Hunt L.A., Sheng Q., Szlavnic Z. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*. 2000. Vol. 40, Iss. 3. P. 597–605.
39. Pacheco A., Vargas M., Alvarado G. et al. GEA-R (Genotype x Environment Analysis whit R for Windows.) Version 4.1. (2016/08/3) URL: <http://hdl.handle.net/11529/10203>

40. Alvarado G., López M., Vargas M. et al. META-R (Multi Environment Trial Analysis whit R for Windows.) Version 6.0. (2016/11/30) URL: <http://hdl.handle.net/11529/10201>
41. Mulamba N.N., Mock J.J. Improvement of yield potential of the Eto Blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant traits. *Egyptian Journal of Genetics and Cytology*. 1978. Vol. 7.P. 40–51.
42. Wricke G., Weber W.E. Quantitative Genetics and Selection in Plant Breeding (1st ed.). New York: Walter de Gruyter, 1986. 408 p.
43. Mendes F.F., Ramalho M.A.P. Abreu A.F.B. Índice de seleção para escolha de populações segregantes de feijoeiro-comum. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2009. V. 44, N. 10. P. 1312–1318. doi: 10.1590/S0100-204X2009001000015
44. Le Cun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*. 2015. Vol. 521. P. 436–444. doi: 10.1038/nature14539
45. Yan W., Hunt L. Biplot analysis of diallel data. *Crop Science*. 2002. Vol. 42, Iss. 1. P. 21–30. doi: 10.2135/cropsci2002.0021
46. Yan W., Tinker N.A. Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Canadian Journal of Plant Science*. 2006. Vol. 86, Iss. 3. P. 623–645. doi: 10.4141/P05-169
47. Olivoto T., Lucio A.D., da Silva J.A. et.al. Mean performance and stability in multi environment trials I: Combining features of AMMI and BLUP techniques. *Agronomy Journal*. 2019. Vol. 111, Iss. 6. P. 2949–2960. doi: 10.2134/agronj2019.03.0220
48. Власенко В.А. Оцінка адаптивності сортів пшениці м'якої ярої. *Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин*. 2006. № 4. С. 93–103. doi: 10.21498/2518-1017.4.2006.68043
49. Літун П.П., Кириченко В.В., Петренкова В.П., Коломацька В.П. Системний аналіз в селекції польових культур. Харків, 2009. 351 с.

Підписано до друку 17.10.2023 р. Зам. № 99.
Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. Друк – цифровий.
Наклад 100 прим. Ум. друк. арк. 2,9.
Друк ЦП «КОМПРИНТ». Свідоцтво ДК №4131 від 04.08.2011 р.
м. Київ, вул. Васильківська, 32
067-209-54-30 , 097-533-18-07
email: komprint@ukr.net