



В. В. ЧЕРНУСЬКИЙ,
С. Д. ОРЛОВ,
С. М. МАНДРОВСЬКА,
В. І. ГОРЕЛЕНКО,
С. С. КЛИМЧУК

**МЕТОДОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНО
ОРІЄНТОВАНОЇ МОДЕЛІ СЕЛЕКЦІЇ В УМОВАХ ЗМІНИ
КЛІМАТУ ШЛЯХОМ ВИЗНАЧЕННЯ УСПАДКУВАННЯ
ГОСПОДАРСЬКО-ЦІННИХ ОЗНАК ПРИ ГІБРИДИЗАЦІЇ
ВИХІДНОГО МАТЕРІАЛУ ГОРОХУ ПОСІВНОГО
З РІЗНИМ ПРОЯВОМ ЕЛЕМЕНТІВ УРОЖАЙНОСТІ.
УДОСКОНАЛЕНІ ЕЛЕМЕНТИ ТЕХНОЛОГІЇ СЕЛЕКЦІЇ
ГОРОХУ ПОСІВНОГО ВІДПОВІДНО ДО ЗМІНИ КЛІМАТУ**

НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ
РЕКОМЕНДАЦІЇ

**КИЇВ
2025**



**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР І ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ**

**В. В. Чернуський, С. Д. Орлов, С. М. Мандровська,
В. І. Гореленко, С. С. Климчук**

**МЕТОДОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНО
ОРІЄНТОВАНОЇ МОДЕЛІ СЕЛЕКЦІЇ В УМОВАХ ЗМІНИ
КЛІМАТУ ШЛЯХОМ ВИЗНАЧЕННЯ УСПАДКУВАННЯ
ГОСПОДАРСЬКО-ЦІННИХ ОЗНАК ПРИ ГІБРИДИЗАЦІЇ
ВИХІДНОГО МАТЕРІАЛУ ГОРОХУ ПОСІВНОГО
З РІЗНИМ ПРОЯВОМ ЕЛЕМЕНТІВ УРОЖАЙНОСТІ.
УДОСКОНАЛЕНІ ЕЛЕМЕНТИ ТЕХНОЛОГІЇ СЕЛЕКЦІЇ
ГОРОХУ ПОСІВНОГО ВІДПОВІДНО ДО ЗМІНИ КЛІМАТУ**

Науково-методичні рекомендації

Київ 2025

УДК 633.31/37; 635.65; 581.5; 514.7; 57.087.2
<https://doi.org/10.47414/978-617-8706-20-3>

*Рекомендовано до опублікування вченою радою
Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН
(протокол № 17 від 3 листопада 2025 р.)*

Рецензенти:

М. Я. Гументик, доктор с.-г. наук, старший науковий співробітник;
В. І. Войтовська, кандидат с.-г. наук, старший науковий співробітник
(Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН)

Чернуський В. В., Орлов С. Д., Мандровська С. М., Гореленко В. І., Климчук С. С. Методологія формування екологічно орієнтованої моделі селекції в умовах зміни клімату шляхом визначення успадкування господарсько-цінних ознак при гібридизації вихідного матеріалу гороху посівного з різним проявом елементів урожайності. Удосконалені елементи технології селекції гороху посівного відповідно до зміни клімату: науково-методичні рекомендації / НААН України, Ін-т біоенергет. культ. і цукр. буряків. Електрон. вид. Київ: ІБКіЦБ НААН, 2025. 24 с.

ISBN 978-617-8706-20-3 (PDF)

В умовах зміни клімату в сторону підвищення амплітуди стресових факторів вегетаційного періоду у вигляді комплексної дії посухи та високих температур, існує необхідність уточнення напрямів і пріоритетності формування параметрів компонентних ознак продуктивності і адаптивності сучасних сортів гороху посівного. Відповідно до вищезначеного в Інституті біоенергетичних культур та цукрових буряків НААН розроблена концепція і на її основі реалізована програма «Інноваційної системи селекції по створенню синергетично об'єднаних фенотипів продуктивно-адаптивних сортів гороху посівного». Відповідно до «Концепції» в якості ключових елементів передбачено формування бази даних в системі точного фенотипування онтогенетичних фаз розвитку рослин в умовах дії стресових факторів вегетаційних періодів. Переформатування експериментальних даних матриць цифрових фотографій у математико-статистичні матриці самоафінно-перетворені у моделі селекційних зразків за допомогою фазово-параметричних портретів, генетичних алгоритмів нейромереж, геометричних поверхонь відгуку. Отримання об'єднаної великої інформаційної моделі у вигляді цифрового двійника сорту чи сортозразка шляхом застосування інноваційних систем добору селекційних зразків, що дозволить створювати сорти за комплексом цінних господарських ознак продуктивності та адаптивності.

УДК 633.31/37; 635.65; 581.5; 514.7; 57.087.2
<https://doi.org/10.47414/978-617-8706-20-3>



Цей твір поширюється на умовах ліцензії CC BY-NC-SA 4.0
(Creative Commons «Attribution-NonCommercial-ShareAlike» 4.0 International)

ISBN 978-617-8706-20-3 (PDF)

© Інститут біоенергетичних культур
і цукрових буряків НААН, 2025
© Колектив авторів, 2025

ЗМІСТ

| | |
|--|-----------|
| Вступ | 4 |
| 1. Теоретичні основи селекції гороху | 5 |
| 2. Система селекції гороху відповідно до теорії еволюції фенотипів в умовах зміни клімату | 5 |
| 3. Роль генетичних ресурсів у селекції | 8 |
| 4. Смарт-селекція гороху, цифрові моделі та оптимізація процесу | 9 |
| 5. Теоретичні основи системної селекції | 11 |
| 6. Методика і схема досліду по гороху | 12 |
| 6.1. Багатовимірні, багатофакторні моделі селекції гороху посівного (<i>Pisum sativum</i>) з порівнянням вусатих (afila) та листочкових морфотипів. Схеми дослідів | 12 |
| 6.2. Методика точного фенотипування листової поверхні та інших органів гороху | 13 |
| 6.3. Базова формула продуктивності одного боба | 15 |
| 6.4. Узагальнена модель (інтегральна формула продуктивності) | 16 |
| 7. Інноваційні принципи добору в системах генетичної і епігенетичної мінливості | 16 |
| 8. Приклади використання інноваційних методів в селекції гороху посівного | 18 |
| Висновки | 23 |
| Список літератури | 24 |

Вступ

Сучасна селекція гороху (*Pisum sativum* L.) є стратегічним напрямом агробіологічних досліджень, спрямованих на забезпечення продовольчої та кормової безпеки, підвищення ефективності використання природних ресурсів і збереження біорізноманіття. Горох – одна з ключових білкових культур, яка поєднує високу харчову цінність і з агроекологічною функцією фіксації атмосферного азоту. Це робить його не лише джерелом рослинного білка, а й важливим компонентом сталих агроecosystem.

Необхідність розроблення сучасної концепції селекції гороху зумовлена викликами глобальної зміни клімату, виснаженням ґрунтів, нестабільністю врожайності та потребою у створенні нових сортів, адаптованих до біотичних і абіотичних стресів. Інноваційні селекційні програми мають базуватися на поєднанні класичних методів добору з цифровими, геномними, епігенетичними та біоінформаційними технологіями, що формує парадигму смарт-селекції – адаптивної, прогнозованої та керованої.

Метою концепції є інтеграція генетичних, фенотипічних і цифрових даних у єдину систему прийняття рішень для створення нових сортів гороху з підвищеною продуктивністю, стійкістю і пластичністю. Основними завданнями є: формування банку вихідних генетичних ресурсів; розроблення системи багаторівневого фенотипування; використання штучного інтелекту для оптимізації відбору; створення цифрових двійників і моделей еволюційного розвитку ознак; оцінка епігенетичних ефектів та їх тривалості у популяціях.

Концепція узгоджується з принципами сталого розвитку, прецизійного землеробства і біоекономіки, сприяючи створенню інтелектуальних систем селекції та підвищенню наукового рівня національних програм у рослинництві.

1. Теоретичні основи селекції гороху

Селекція гороху ґрунтується на поєднанні генетичних, фізіолого-біохімічних, морфологічних і агрономічних підходів. Теоретичним базисом є вчення про мінливість, спадковість і добір, яке доповнюється сучасними знаннями про молекулярну організацію геному, генетичну детермінацію кількісних ознак та регуляцію генів у відповідь на стресові фактори.

Генетичні основи. Горох є диплоїдною самозапильною культурою з відносно невеликим геномом (~ 4,45 Гб), що спрощує аналіз генетичної архітектури ознак. Основні напрямки теоретичних досліджень пов'язані з: ідентифікацією QTL (Quantitative Trait Loci) для врожайності, білковості, стійкості до хвороб; побудовою карт зчеплення та використанням маркерів SNP, SSR, AFLP; застосуванням GWAS (Genome-Wide Association Studies)

для встановлення генотип-фенотипних залежностей; вивченням ролі епігенетичних механізмів (метилування ДНК, модифікації гістонів, некоду-ючих РНК).

Математичні моделі добору у популяціях гороху базуються на законах Харді – Вайнберга, формулі відбору Фішера і рівняннях динаміки генети-чної дисперсії. Наприклад, оцінка селекційного ефекту може бути подана як: $R = h^2 / \text{times } S$.

Морфо-фізіологічні принципи. Ключовими селекційними ознаками є висота рослин, тип гілкування, архітектоніка листків, тривалість вегета-ційного періоду, кількість і маса насіння, білковий вміст. Морфо-фізіоло-гічна концепція базується на ідеї ідеотипу – оптимального фенотипу для конкретних умов вирощування. Формування ідеотипу гороху здійсню-ється шляхом аналізу кореляційних матриць між ознаками, моделювання графів зв'язків і застосування методів головних компонент (РСА) для виок-ремлення найвпливовіших параметрів.

Теорія добору та адаптації. В умовах зміни клімату теорія добору трансформується у динамічну систему адаптаційної стабільності, де па-раметри оптимізації визначаються не лише продуктивністю, а й пластич-ністю та стресостійкістю. Для кількісної оцінки стабільності використо-вується індекс Шукли (Shukla, 1972), який дозволяє визначити реакцію генотипів на варіації середовища.

2. Система селекції гороху відповідно до теорії еволюції фенотипів в умовах зміни клімату

Кліматичні зміни вимагають від селекції рослин адаптаційних підхо-дів, що базуються на еволюційних принципах. Горох (*Pisum sativum* L.) є важливою білковою культурою, яка чутливо реагує на зміни темпера-тури, вологості та інші стресові чинники. Еволюційна теорія фенотипів передбачає, що адаптація культури до кліматичних змін можлива через фенотипічну пластичність, стабільність і взаємодію генотипу з середови-щем ($G \times E$).

У еволюційному часовому масштабі ніщо в біології не застигло. Сис-теми, що спостерігаються сьогодні, еволюціонували із рішень, прийнятих у минулому, і їм доведеться адаптуватися у відповідь на майбутні умови. Еволюційність біологічної системи однозначно характеризує їх і є ключо-вою для біології. Розширюючи потік експериментальних даних, біологія переходить до більш кількісної науки. Осмислення даних, побудова нових моделей, правильні запитання та розробка розумних експериментів для відповіді на них стають дедалі актуальнішими. У цій справі нелінійні під-ходи можуть зіграти фундаментальну роль. Біохімічні реакції, що лежать в основі життя, дуже часто є нелінійними. Структурна стійкість також є

спільною рисою нелінійних систем, прикладом якої є фундаментальна роль, яку відіграють динамічні нерухомі точки та атрактори, а також використання загальних рівнянь (логістична карта, рівняння Фішера – Колмогорова, проблема Стефана тощо) в вивченні безлічі нелінійних явищ [1].

Встановлення ступеня адаптивної експресивності геному, є надзвичайно актуальним. Раніше аналіз лабільних динамічних систем «геном-експресивність – умови зовнішнього середовища» викликав певні методологічні і розрахункові труднощі, тому селекціонери обмежувались, як правило, виявленням адитивної (лінійної) частини геному, як найбільш цінної для добору і селекції.

Сучасний рівень комп'ютерингу та розвитку аналітичних платформ ІТ-технологій дозволяє досліджувати селекційні системи у повногеномному динамічному багатофакторному багатовимірному стані в т. ч. за кібернетичними принципами оберненого взаємозв'язку генотип – середовище. Зокрема інформаційно аналітична цінність нелінійного аналізу фазово-параметричного простору систем полягає у можливості встановлення траєкторії її прогностично футуристично руху по вісі часу.

Завдяки отриманню фазово-параметричного портрету селекційної системи у вигляді біфуркацій (гілкувань траєкторій), басейнів тяжіння взаємозв'язків компонентних ознак, можливе виявлення синергетично-оптимізованих атракторів (згущень високих параметрів) компонентних ознак при формуванні комплексної.

Еволюція є аксіоматичним наслідком інформації про організм, що підкоряється другому закону термодинаміки; із збільшенням ентропії інформація в біологічній системі ускладнюється і диверсифікується в точках біфуркації. Поведінка живих систем розкладається на функціональні режими, а ансамбль режимів, що перебувають у розпорядженні агента, становить функціональний репертуар. Режими можуть піддаватися експлуатаційним сигналам і механізму, який послідовно вибирає режим таким чином, щоб він контролював функціональну динаміку [2].

Іншими словами в процесі онтогенетичного розвитку рослина через дії епігенетичної системи шукає термодинамічний мінімум витрат енергії, завдяки оптимізованому проходженню точок біфуркації. Стан системи запам'ятовується через епігенетичні механізми експресії генів, зокрема мітки метилування ДНК, транспозони, альтернативний сплайсинг.

При повторенні розвитку в подібних умовах в силу закону мінімуму дисипації (розсіювання) енергії, або принципу економії енергії, (який гласить, що при ймовірності розвитку процесу в деякій множині напрямків, що допускаються початком термодинаміки, реалізується той, що забезпечує мінімум дисипації енергії або мінімум зростання ентропії) повторюється сценарій ВГС (взаємодія генотип x середовище). Дане явище і є власне успадкування епігенетичних ознак.

Концепція селекції гороху відповідно до теорії еволюції фенотипів

включає такі етапи: формування генетично різноманітної вихідної популяції; проведення мультисередовищних випробувань (МЕТ) для виявлення $G \times E$ -ефектів; розрахунок норм реакції ознак і коефіцієнтів пластичності; відбір генотипів за балансом стабільності та пластичності; використання кліматичних «стресових фільтрів» (аналог ефекту пляшкового горличка) генетичне картування і маркерна селекція адаптивних ознак; моделювання кліматичних сценаріїв для прогнозування фенотипів майбутнього.

Математична модель

Фенотип (Φ) розглядається як функція взаємодії генотипу (G), середовища (E) та епігенетичних ефектів (E_p):

$$\Phi(t) = f(G, E(t), E_p(t)) + \varepsilon$$

У селекційних популяціях під впливом кліматичних стресів відбувається звуження фенотипічного простору – ефект «пляшкового горличка»:

$$dN/dt = rN(1 - N/K(t)) - S(\Phi),$$

де: N – кількість фенотипічно різних особин; $K(t)$ – місткість середовища; $S(\Phi)$ – селективне пригнічення.

Норма реакції для ознаки Φ може бути описана як:

$$\Phi_{\{i,j\}} = \mu_i + \beta_i E_j + \varepsilon_{\{i,j\}},$$

де: β_i – коефіцієнт пластичності.

Стабільність ознак визначається через варіанс компонент G , $G \times E$ і середовища. Відбір здійснюється за функцією пристосованості:

$$W_i = \exp(s(\Phi_i - \Phi_{opt}(E))^2).$$

Еволюційний перехід фенотипу відображає наближення до оптимального стану за рівнянням:

$$\Phi_{\{t+1\}} = \Phi_t + \gamma(\Phi^* - \Phi_t) + \xi(t),$$

де: γ – сила селекційного тиску.

Практичне застосування

Для гороху ключовими ознаками адаптації є продуктивність бобів, кількість насінин, маса зерна, стійкість до водного дефіциту. У селекційних програмах необхідно застосовувати випробування за різних кліматичних умов, розраховувати пластичність та стабільність фенотипів, а також використовувати молекулярні маркери для пришвидшення відбору.

Математичне моделювання базувалося на системі фазово-портретних рівнянь, що описують динаміку адаптивних і неадаптивних генотипів:

$$\begin{aligned} dx/dt &= ax_0(1 - x/K) - bx_0x \\ dx/dt &= ax_0(1 - x/K) + bx_0x - S(x, E) \end{aligned}$$

де: x – частка адаптивних форм; x_0 – традиційних; $S(x, E)$ – кліматичний тиск.

Фазово-портретний аналіз показує існування біфуркацій у динаміці популяції при зміні кліматичних параметрів (Т, Р, CO₂). Це свідчить про наявність критичних точок, через які популяція проходить «пляшкове горличко», формуючи нові стабільні фенотипи. Показано, що кліматичні зміни викликають ефект «пляшкового горличка», який зменшує фенотипову варіацію. Фазово-портретний аналіз дозволяє прогнозувати адаптивні переходи та стабільні морфотипи. Отримані результати можуть бути використані для створення стресостійких сортів гороху нового покоління.

3. Роль генетичних ресурсів у селекції

Будь яка селекційна програма розпочинається зі створення і формування вихідного матеріалу.

Генетичні ресурси гороху – це сукупність дикорослих форм, місцевих популяцій, стародавніх сортів і сучасних ліній, які становлять основу для створення нових, адаптованих і продуктивних сортів. Збереження та вивчення цих ресурсів має вирішальне значення для забезпечення генетичного різноманіття, стабільності врожайності й довготривалої стійкості агросистем.

У світовій практиці основними центрами збереження колекцій є: ICARDA (Міжнародний центр сільськогосподарських досліджень у посушливих районах), де зібрано понад 14 тис. зразків гороху; IPK Gatersleben (Німеччина) – генетичний банк із 7 тис. зразків; Інститут рослинництва ім. В. Я. Юр'єва НААН (Україна), який володіє найповнішою національною колекцією бобових культур.

Класифікація та генетична структура колекційного матеріалу

Вихідний матеріал поділяється за морфотипами (зерновий, овочевий, кормовий), за вегетаційним періодом (ранньостиглий, середній, пізній), типом росту (детермінантний, індетермінантний), а також за типом листової системи (звичайно листовий, безлисточковий, напівбезлисточковий).

У межах колекцій застосовують кластерний аналіз (Cluster Analysis) для визначення груп генетично-споріднених форм. Математично подібність генотипів можна оцінити за евклідовою метрикою:

$$D_{\{ij\}} = \sqrt{\left\{ \sum_{k=1}^n (x_{\{ik\}} - x_{\{jk\}})^2 \right\}}$$

Цей підхід дозволяє побудувати дендрограми подібності й сформулювати селекційні пари для гібридизації з максимальною гетерозиготністю.

Використання дикорослих форм і стародавніх сортів

Дикі родичі гороху, зокрема *Pisum fulvum* і *P. abyssinicum*, мають унікальні алелі, що забезпечують толерантність до посухи, хвороб та низьких температур. Інтрогресія генів із цих форм у культурний горох (*P. sativum*)

здійснюється через міжвидову гібридизацію з подальшим відбором на основі молекулярних маркерів. Наприклад, гени *Er1* і *Er3* забезпечують стійкість до борошнистої роси (*Erysiphe pisi*), а ген *Sym2* контролює симбіоз з *Rhizobium leguminosarum*, підвищуючи азотфіксаційну активність. Використання стародавніх сортів сприяє збереженню адаптивних ознак, таких як морозостійкість і стійкість до осипання, що втрачались у процесі інтенсивної селекції.

Принципи формування банку генетичних ресурсів

Система збереження генетичних ресурсів повинна включати: паспортну базу даних із морфологічними, фенологічними й генетичними характеристиками; цифрову платформу з інтеграцією даних фенотипування та секвенування; LIMS (Laboratory Information Management System) для управління зразками; цифрових двійників (Digital Twins) з використанням машинного навчання для прогнозування потенціалу генотипів. У цифровій моделі селекції банку генетичних ресурсів реалізується алгоритм оптимізації на основі багатокритеріального відбору:

$$F = w1P + w2S + w3A,$$

де: *P* – продуктивність, *S* – стабільність, *A* – адаптивність, а – вагові коефіцієнти, що визначаються методом експертних оцінок або генетичної ентропії.

Інформаційно-аналітичні системи управління генетичними ресурсами

У сучасних програмах селекції активно впроваджуються бази даних типу GRIN-Global, Genesys, EURISCO, що забезпечують відкритий доступ до паспортної інформації про зразки. В українській системі планується створення Національної платформи генетичних ресурсів рослин України, що інтегруватиме дані з колекцій НААН, біобанків і лабораторій цифрової фенотипізації.

4. Смарт-селекція гороху, цифрові моделі та оптимізація процесу

Концепція смарт-селекції

Смарт-селекція (Smart Breeding) – це інтегрована система, що поєднує класичні генетичні принципи з інструментами цифрового моделювання, машинного навчання та біоінформаційних технологій. Її мета – зробити процес створення нових сортів *керованим, прогнозованим і адаптивним*. Основна ідея полягає у перенесенні фокусу з описового на системно-аналітичний підхід, де генетичні, фенотипічні, кліматичні та ґрунтові дані об'єднуються в єдине цифрове середовище. Така система дозволяє проводити віртуальний добір ще до польових експериментів.

Архітектура смарт-системи селекції гороху

Архітектура системи включає чотири рівні: Біоінформаційний рівень – зберігання геномних, транскриптомних та епігеномних даних. Фенотиповий рівень – цифрові дані з сенсорів, камер, польових роботів. Аналітичний рівень – моделі машинного навчання, алгоритми оптимізації, статистичні інструменти. Керувальний рівень – система прийняття рішень, що визначає, які генотипи переходять у наступний цикл добору.

Модель керування реалізується як зворотний цикл оптимізації:

$\text{Input (Data)} \rightarrow \text{Model (AI)} \rightarrow \text{Prediction} \rightarrow \text{Validation} \rightarrow \text{Selection}$.

Математичні моделі оптимізації селекції

Смарт-селекція базується на використанні оптимізаційних моделей, які дозволяють вибрати найкращі генотипи за множиною ознак. Основою є многокритеріальна функція цільового відбору:

$$F_i = \sum_{j=1}^m w \frac{x_{ij} - x_{j,\min}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}},$$

де: X – значення j -ої ознаки, W – ваговий коефіцієнт (важливість ознаки).

Цей метод дає змогу враховувати продуктивність, білковість, стійкість до посухи, швидкість досягання тощо, переводячи відбір у формалізовану систему.

Для динамічного добору застосовуються еволюційні алгоритми типу Genetic Algorithm (GA) або Particle Swarm Optimization (PSO), які моделюють природну еволюцію шляхом пошуку глобального оптимуму у великому просторі рішень.

Цифрові двійники селекційних процесів

Цифровий двійник (Digital Twin) – це віртуальна модель реального генотипу або популяції, яка відтворює біологічні процеси росту, розвитку та реакції на середовище. У селекції гороху цифрові двійники дозволяють: прогнозувати результат схрещувань; моделювати вплив кліматичних сценаріїв; оптимізувати схеми добору; визначати взаємодії «генотип × середовище».

Математично модель росту можна описати через систему рівнянь Лотки – Вольтерри або Ляпунова, де швидкість зміни біомаси (dB) залежить від температури (T) і вологості (W):

$$\frac{dB}{dt} = k_1 T^{\alpha} W^{\beta} - k_2 B,$$

де: β – коефіцієнти еластичності середовищних факторів.

Такі моделі інтегруються у симулятори на базі Python/R, що забезпечують прогнозування урожайності залежно від сценаріїв клімату.

Штучний інтелект і машинне навчання в селекції

Модулі машинного навчання використовуються для автоматизації: класифікації фенотипів; розпізнавання зображень насіння; прогнозування продуктивності гібридів; моделювання стресових реакцій.

Застосовуються моделі: Random Forest – для оцінки важливості ознак; Support Vector Machines (SVM) – для класифікації генотипів; Neural Networks (CNN, LSTM) – для обробки часових і просторових даних фенотипування; Bayesian Networks – для встановлення причинно-наслідкових зв'язків між ознаками.

5. Теоретичні основи системної селекції

Концептуальні засади системної селекції

Системна селекція розглядає популяцію як нелінійну динамічну систему, що саморегулюється під впливом внутрішніх генетичних і зовнішніх екологічних факторів. Фенотип – це результат інтеграції генетичного потенціалу, епігенетичних модифікацій і реакцій середовища:

$$\Phi = f(G, E, Ep, t)$$

де: G – генотип, E – середовище, Ep – епігенетичні модифікації, t – час або стадія розвитку.

Ключове завдання системного підходу – оцінка стабільності фенотипової функції за умов змін клімату.

Ляпуновська стабільність фенотипу

Для аналізу стабільності використовуються ляпуновські експоненти:

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{\| \delta x_{i(t)} \|}{\| \delta x_{i(0)} \|}$$

де: λ_i – показник стабільності для ознаки i , $\delta x_{i(t)}$ – зміна значення ознаки в часі.

Цей підхід застосовується при побудові фазових портретів морфометричних і продуктивних ознак у популяціях гороху.

Байєсівська структура добору

У системній селекції байєсівський підхід дозволяє оновлювати ймовірності придатності фенотипів на основі нових даних:

$$P(G|D) = \frac{P(D|G)P(G)}{P(D)}$$

де: $P(G|D)$ – апостеріорна ймовірність генотипу

Таким чином формується динамічна оцінка селекційної цінності, що поєднує генетичні, фенотипічні та кліматичні показники.

Епігенетичні та цифрові моделі

Епігенетичні механізми забезпечують швидку адаптацію без зміни послідовності ДНК. Їх динаміка описується рівнянням:

$$Ep(t + \Delta t) = Ep(t) + \eta \cdot \Delta_{\{env\}} + \xi_i,$$

де: $Ep(t + \Delta t)$ – коефіцієнт епігенетичної чутливості, $Ep(t) + \eta \cdot \Delta_{\{env\}}$ – зміна факторів середовища, ξ_i – стохастичний шум.

Таким чином сучасні AI-системи фенотипування дозволяють реєструвати ці процеси в реальному часі, створюючи умови для автоматизованого добору фенотипів.

Сучасна парадигма широкомасштабного аналізу адаптації базується на спостережуваних значних відхиленнях рівня окремих генів від нейтральних еволюційних очікувань. Гіпотеза стосується не окремих генів, а функціональних модулів. Мутації відбуваються на рівні ДНК, але відбір впливає на фенотипи, змінюючи частоти генів [3].

6. Методика і схема досліду по гороху

6.1. Багатовимірні, багатофакторні моделі селекції гороху посівного (*Pisum sativum*) з порівнянням вусатих (afila) та листочкових морфотипів. Схеми дослідів

Ключові цілі: порівняти морфотипи за урожайністю, виляганням, стійкістю до хвороб, фотоасиміляційними показниками (LAI, перехоплення світла), компонентами врожаю (кількість бобів/росл., насинин/біб, 1000 насинин), ресурсокористуванням (N-фіксація, водокористування). Оцінити $G \times E$ (генотип \times середовище) та $G \times M$ (генотип \times агроприєм) взаємодії. Побудувати багатознакові індекси селекції для одночасного відбору.

Схеми дослідів (польові). Обов'язково: ≥ 2 –3 локації $\times \geq 2$ роки; RCBD або α -решітка, 3–4 повторення.

Варіант: Повний факторіал $2 \times D \times M$

Фактори:

1. морфотип (2 рівні: вусатий, листочковий)
2. густина стояння (напр. 120, 140, 160, 180 росл./м²)
3. агротехнічні заходи: інокуляція ризобіями – так / ні; підживлення N – 0/30 кг д. р., біостимулятори

Дизайн: RCBD у кожному середовищі (майданчик \times рік).

Варіант: Мульти-середовищні випробування (MET) з агроградієнтом

Локації, що відрізняються за родючістю / вологозабезпеченням + два рівні фону живлення. Дає чистішу оцінку $G \times E$.

Збір ознак (Y): урожайність (т/га), вилягання (бальна шкала), висота, стійкість (бальні оцінки / інфекційний індекс). LAI / перехоплення PAR (сенсори або непрямі методи), площа листків / вусів. Компоненти врожаю, маса 1000 насинин. Фенологія (сходи – цвітіння – стиглість), біомаса на фазах.

Статистичні моделі (лінійні змішані)

Позначення: y – вектор ознак, G – генотип, M – морфотип, D – густина, E – середовище (локація \times рік), B – блок.

Одноознакова (per-trait) змішана модель:

$$y = \mu + M + D + M:D + G(M) + E + (M:E) + (D:E) + (G(M):E) + B(E) + \varepsilon,$$

де: M , D – фіксовані; $G(M)$, взаємодії з E , $B(E)$ – випадкові.

Багатознакова (MANOVA/MLMM): Спільно моделюємо кілька ознак: урожайність, вилягання, висота, боби / росл., 1000-нас. Дає кореляційну структуру Σ між ознаками, корисно для індексів.

$G \times E$ модулі: AMMI та/або GGE-біплоти для візуалізації стабільності / адаптивності.

Індекси багатознакового відбору: Smith–Hazel: $I = b'y$, $b = P^{-1}Gw.MGIDI$ (Multi-traitGenotype–IdeotypeDistance): ранжує за відстанню до ідеотипу. Derringerdesirability: перетворює кожну ознаку в $[0,1]$ з вагами, далі геометричне середнє. Ваги пріоритетів: напр. урожайність (0,4), невилягання (0,25), хвороби (0,2), ранньостиглість (0,15).

6.2. Методика точного фенотипування листової поверхні та інших органів гороху

Фенотайпінг як один з основних методів підвищення ефективності добору в селекції рослин.

Найважливішим компонентом для прискорення розвитку нових та вдосконалених сортів є швидка і точна фенотипова оцінка тисяч ліній розмноження, клонів або популяцій протягом часу [4] та в різних середовищах.

Фенотипування рослин – це сукупність методологій та протоколів, що використовуються для вимірювання росту рослин, архітектури та композиції з певною точністю та точністю в різних масштабах організації, від органів до навісів. У фенотипуванні рослин існує потреба у високопродуктивних неруйнівних системах, які можуть точно аналізувати різні ознаки рослин шляхом вимірювання таких характеристик, як об'єм рослин, площа листя та довжина стебла. Фенотипування рослин стало основним напрямом досліджень у селекції рослин, стимульованим швидким розвитком геноміки рослин. Фенотипування вирішується поєднанням нових технологій, таких як неінвазивна візуалізація, спектроскопія, аналіз зображень, робототехніка та високопродуктивні обчислення [5].

У фенотипуванні рослин існує потреба у високопродуктивних неруйнівних системах, які можуть точно аналізувати різні ознаки рослин шляхом вимірювання таких характеристик, як об'єм рослин, площа листя та довжина стебла [6].

Фенотипування на основі цифрового бачення відіграватиме важливу роль як у поточному прогнозі, так і в прогнозуванні ознак рослин за

допомогою моделювання співвідношення генотип / фенотип за допомогою нейромереж [7].

Машинне навчання (ML) – область інформатики, що пропонує нам прогнозування даних, включаючи аналіз зображень, який може допомогти типовим крокам аналізу зображення (тобто попередній обробці, сегментації, вилученню функцій та класифікації) [7].

Методика точного фенотипування

У листка можуть бути «фрактальні» (нерівні) контури й «неповне заповнення» площі (щілини, вирізи). Це описують дві розмірності:

- D_b – фрактальна розмірність межі (boundary; $1 \leq D_b \leq 2$).
- D_s – фрактальна розмірність заповнення площі силуетом (support; $1 \leq D_s \leq 2$).

Теорія: як пов'язані площа й периметр через фрактальні розмірності
За box-counting при зміні виміру масштабу ϵ :

- Периметр, виміряний на масштабі ϵ : $P(\epsilon) \propto \epsilon^{1-D_b}$.
- Площа (оцінена як $N(\epsilon)\epsilon^2$): $A(\epsilon) \propto \epsilon^{2-D_s}$.

Усуваючи ϵ , отримуємо узагальнену «фрактальну алометрію»:

$$A \propto P^\beta, \beta = 1 - D_b / (2 - D_s).$$

Спецвипадки:

- Звичайний суцільний силует листка: $D_s \approx 2 \Rightarrow \beta \approx 0$. Тобто сама по собі залежність A від P слабка (периметр «роздувається» шорсткістю, а площа – майже ні).
- Якщо силует «дірчастий / мереживний» (наприклад, складні ажурні листки): $D_s < 2 \Rightarrow \beta > 0$, і тоді з'являється стійка степенева залежність $A \sim P^\beta$.

Практичний рецепт № 1 (швидкий): калібруємо $A = KP^\beta$

1. Отримайте силуети листків (сканер/фото зі шкалою, бінаризація).
2. Оцініть D_b (box-counting на ребрі) та D_s (box-counting на заповненому силуеті).
3. Візьміть $\beta = (2 - D_s) / (1 - D_b)$.
4. На 10–20 прикладах виміряйте істинну площу A (пікселі \rightarrow мм²) і периметр P на фіксованому масштабі ϵ_0 .
5. На $\log A$ vs $\log P$ зафіксуйте нахил β (або близький до теоретичного) і знайдіть K .
6. Для всіх інших листків рахуйте $A = KP^\beta$.

Порада: для гороху звичайні листочки мають $D_s \rightarrow 2$ і D_b трохи > 1 , тому β за формулою буде малим; практично часто краще просто емпірично підібрати β регресією $\log A - \log P$.

Практичний рецепт № 2 (точний без калібратора): екстраполяція площі через розмірність межі

Метод «Мінковського ковбаси» (морфологічні дилатації диском радіуса r):

1. Для силуету виконайте дилатації радіусами $r = r_1, \dots, r_k$ (у пікселях, з відомим розміром у мм).

2. Обчисліть $A(r)$ – площу дилатованого силуету. Для фрактальної межі:

$$A(r) \approx A_0 + Cr^2 - Db.$$

3. Побудуйте $\log(A(r) - A(r_{\min}))$ проти $\log r$ – нахил дає $2 - Db$ (перевірка Db).

4. Оцініть A_0 як перетин при $r \rightarrow 0$ (нелінійна апроксимація $A(r) = A_0 + Cr^2 - Db$). Це і є шукане істинне A , звільнене від артефактів масштабу та «зазубреності» контуру.

Плюси: не потребує D_s і краще працює, коли $D_s \approx 2$ (типово для листків гороху). Мінус: треба кілька морфооперацій на зображенні.

Мінімальний робочий план в 7 кроків: Сканувати листок поруч із лінійкою (калібрування мм/піксель). Бінаризувати (Otsu), прибрати шум, взяти найбільшу компоненту. Оцінити Db (box-counting по краю) – для контролю якості. Виконати дилатації радіусами $r = 1, 2, 3, \dots$ пікселів (5–8 значень достатньо). Зняти $A(r)$, підігнати $A(r) = A_0 + Cr^2 - Db$ (нестисла нелінійна регресія). Взяти A_0 як площу листка (мм^2). Для партійної обробки – зафіксувати той самий конвеєр і запускати на всіх зображеннях.

Продуктивність бобів гороху – це інтегральний показник, що характеризує потенційну та фактичну здатність рослини формувати насінневу масу, залежно від морфологічних параметрів боба (довжини, кривини, товщини), кількості насінин у бобі, їхньої форми, маси та онтогенетичної стадії формування під впливом генетичних і стресових факторів.

6.3. Базова формула продуктивності одного боба

$$P_b = N_s \cdot m_s$$

де: P_b – продуктивність одного боба (мг або г); N_s – кількість насінин у бобі; m_s – середня маса однієї насінини.

Морфометрична залежність (з урахуванням форми боба). З урахуванням кривини боба (радіус або коефіцієнт кривизни) та довжини:

$$P_b = f(K_b, L_b, N_s, m_s)$$

де: функцію можна апроксимувати квадратичною або експоненційною залежністю:

$$P_b = a \cdot L_b^\alpha \cdot e^{\{-\beta K_b\}} \cdot N_s \cdot m_s$$

де: a – емпіричний коефіцієнт (визначається за сортом), $L_b^\alpha \cdot e^{\{-\beta K_b\}}$ – параметри чутливості до геометрії боба.

Онтогенетичне формування продуктивності. На стадіях формування насінин (онтогенетичні фази) продуктивність можна описати як суму приростів у часі:

$$P_b(t) = \sum_{\{i=1\}}^{\{n\}(N_{\{s,i\}} \cdot m_{\{s,i\}}(t))}$$

або у диференційній формі:

$$\frac{dP_b}{dt} = N_s \cdot \frac{dm_s}{dt} + m_s \cdot \frac{dN_s}{dt}$$

Це показує, що збільшення продуктивності може відбуватись як за рахунок формування нових насінин, так і за рахунок наростання їхньої маси.

Вплив форми насінин і боба. Якщо ввести коефіцієнт форми насінини (відношення довжини до діаметра), а також коефіцієнт об'ємної заповненості боба насінням:

$$P_b = \Omega \cdot \rho_s \cdot V_b$$

де: Ω – середня щільність насіння, $\rho_s \cdot V_b$ – об'єм боба (який залежить від форми, наприклад еліпсоїдної або циліндричної).

6.4. Узагальнена модель (інтегральна формула продуктивності)

$$P_b = a_1 N_s m_s + a_2 L_b K_b^{[-1]} + a_3 F_s \Omega + \varepsilon$$

де: ε – залишковий вплив стресових і середовищних факторів (температура, вологість, мікроелементи тощо).

Геометричне співвідношення між довжиною бобу (L) і кількістю насінин (N):

$$L = (d_s + \delta)N + \frac{\pi R_0^2}{4} P_{\{int\}}$$

Цей вираз дозволяє оцінити морфологічний потенціал сортів: короткі вигнуті боби → менше N, нижча продуктивність.

Практичне застосування. У селекційних програмах цей підхід дає змогу: описати параметричні відмінності між сортами (вусаті, листочкові, короткостеблі); проводити цифрове фенотипування за фото (через автоматичне визначення); створювати регресійні моделі продуктивності на основі геометрії бобу.

7. Інноваційні принципи добору в системах генетичної і епігенетичної мінливості

Головне завдання фенотипування це співставлення точних фенотипових відображень і параметричних проявів QTL маркованих генів. У генетиці сільськогосподарських культур формування динамічних біологічних ознак, таких як зріст, розмір та колір, зазвичай регулюється багатьма часовими та просторовими факторами [8]. Їх генетичні варіації можна пояснити колективною реакцією множинних малих ефектів, пов'язаних із цими динамічними ознаками [9]. Таким чином, деякі гени можуть контролювати розвиток ознак на певній стадії розвитку рослин, інші можуть змінювати або контролювати швидкість змін переходів між послідовними стадіями [10]. Ці зміни можуть бути зумовлені різними генами, які включаються або вимикаються в різний час. Іншими словами, динамічна ознака, частково, регулюється генами, ефекти яких змінюються з часом.

Коли ознака вимірюється на багатьох стадіях розвитку, наприклад, на рослині, вона виявляє динамічну експресію основних генів, пов'язаних із цією ознакою [11]. Вони можуть виявити критичні аспекти вразливості та реакції на біотичні та абіотичні стреси, і тим самим передбачити наслідки зміни клімату на ці риси [12].

Принципи векторно-градієнтного добору в селекції під тиском епігенетики можна пояснити як поєднання класичних методів багатовимірного відбору з урахуванням динамічних, оборотних та спадкових змін, зумовлених епігенетичними механізмами.

Сутність векторно-градієнтного добору. Вектор добору – це напрямок оптимізації ознак у багатовимірному фенотиповому просторі (наприклад, урожайність, стійкість, якість зерна). Градієнт – величина та напрям з міні цільової функції добору; визначається швидкістю та масштабом поліпшення ознак. У селекції це означає, що ми не просто вибираємо кращі форми за однією ознакою, а рухаємося в багатовимірному просторі в напрямку максимального приросту бажаних властивостей.

Вплив епігенетичного тиску. Епігенетика впливає на вираження ознак без зміни ДНК, через: метилювання ДНК (зміна активності генів); модифікації гістонів (регуляція доступу до генів); маленькі РНК (пригнічення або активація транскрипції); стрес-індуковані ефекти (суховій, холод, патогени).

Під тиском епігенетики: напрямок вектора добору може змінюватися швидше, ніж при звичайній генетичній селекції; потрібно враховувати оборотність деяких ознак (епігенетична пам'ять може зникати через кілька поколінь); добір має бути динамічним – постійне уточнення вектора за умов змін середовища.

Алгоритм векторно-градієнтного добору з урахуванням епігенетики: Формування багатовимірного фенотипового простору (наприклад: урожайність, вміст білка, стійкість до хвороб, швидкість дозрівання). Оцінка градієнта – визначення, у якому напрямку комбінація ознак змінюється найшвидше під впливом добору та умов вирощування. Моделювання епігенетичної пластичності – врахування, які ознаки змінюються під дією стресів та як довго зберігається ця зміна. Адаптивна корекція вектора – оновлення напрямку добору кожне покоління з урахуванням середовищних та епігенетичних факторів. Вибір стабільних епігенетичних маркерів – відбір генотипів, у яких бажані епігенетичні стани фіксуються або передаються стабільно.

Переваги підходу: Швидше реагує на зміну клімату або біотичного тиску. Може виявляти приховані резерви продуктивності у вже наявних лініях. Дає можливість використовувати стрес-праймування (створення епігенетичної пам'яті культур).

Аналіз інноваційної системи визначення успадковування цінних господарських ознак

Візуалізація системи успадковування генотипової мінливості (через повторюваність параметрів ознак по роках) та впливу епігенотипової мінливості це графік фазово-параметричного портрету, де: кожна рослина – точка у багатовимірному просторі; вектор – напрям руху цих точок до «зони ідеального генотипу»; епігенетичний тиск змінює кут вектора та швидкість прусування.

У селекції їх можна трактувати як геометричне відображення траєкторій розвитку ознак (комбінації фенотипів і генотипів у часі чи поколіннях). Вісь фазового простору = параметри (наприклад, висота, урожайність, стійкість). Траєкторії = динаміка зміни цих параметрів під дією середовища та добору. Басейни тяжіння = зони стабільності (генотипи / фенотипи, які залишаються домінуючими після багатьох циклів добору).

Патерни басейнів тяжіння. Якщо нанести фазові портрети на одну площину, можна побачити патерни стабільності ознак. У селекції вони показують: які ознаки або генотипи «тягне» система (екосистема + генетика + селекційний тиск). Це дозволяє зрозуміти, де знаходяться оптимальні генотипи (локальні мінімальні / максимальні атрактори).

Щоб протокол був науково обґрунтований: Математична база. Використати методи Ляпунова та Марковських переходів для опису стабільності ознак. Описати фазові портрети через систему рівнянь:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, p, t)$$

Протокол добору. Крок 1: визначення цільових ознак (бажані атрактори). Крок 2: побудова фазового простору на основі даних GWAS, QTL чи польових випробувань. Крок 3: визначення басейнів тяжіння (класифікація траєкторій). Крок 4: встановлення правил переходів між басейнами (добір, рекомбінування, стресові умови).

Перспектива. Такий підхід створює смарт-систему селекції, яка працює не тільки зі статистикою, а й з динамікою еволюційного процесу. Басейни тяжіння фактично показують «карти майбутнього» – які генотипи будуть стабільними через багато поколінь.

8. Приклади використання інноваційних методів в селекції гороху посівного

Системи обмежень параметрів зразків гороху та їх оптимізація. Наведено: таблицю типових числових меж для 5 ознак (табл. 1); матрицю кореляцій (рис. 1); блок-схему оптимізації селекції (рис. 2).

Типові межі параметрів

| Ознака | Одиниці | Межі (приклад) |
|--------------------------------------|-----------------|----------------|
| H – висота рослини | см | [40, 90] |
| α – кут прилягання прилистків | deg | [10, 45] |
| S – площа листової поверхні | см ² | [50, 300] |
| B – кількість бобів на рослині | шт. | [10, 40] |
| M – маса 1000 зерен | г | [200, 500] |

Матриця кореляцій ознак гороху (синтетичні дані)

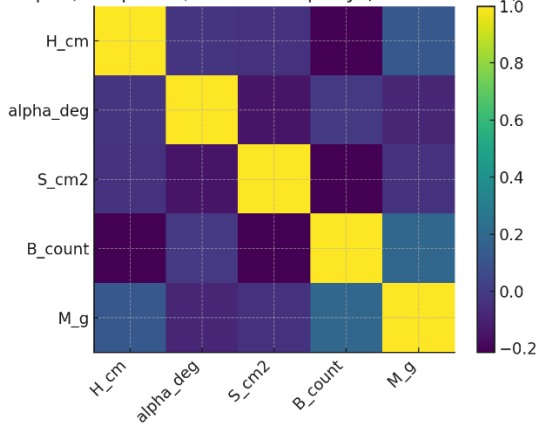


Рис. 1. Матриця кореляцій

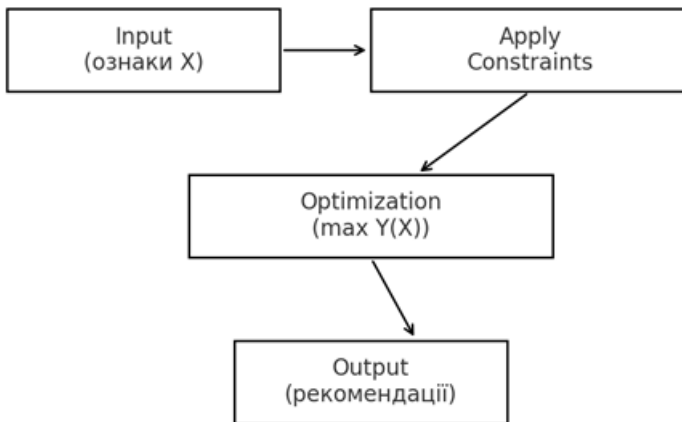


Рис. 2. Блок-схема оптимізації селекції

На платформі аналітичних геометричних поверхонь відгуку встановлені максимальні прояви продуктивності оптимізованих за параметрами компонентних ознак зразків протягом кількох років в розрізі різних ієрархічних розсадників, що свідчить про високі коефіцієнти спадковості (рис. 3).

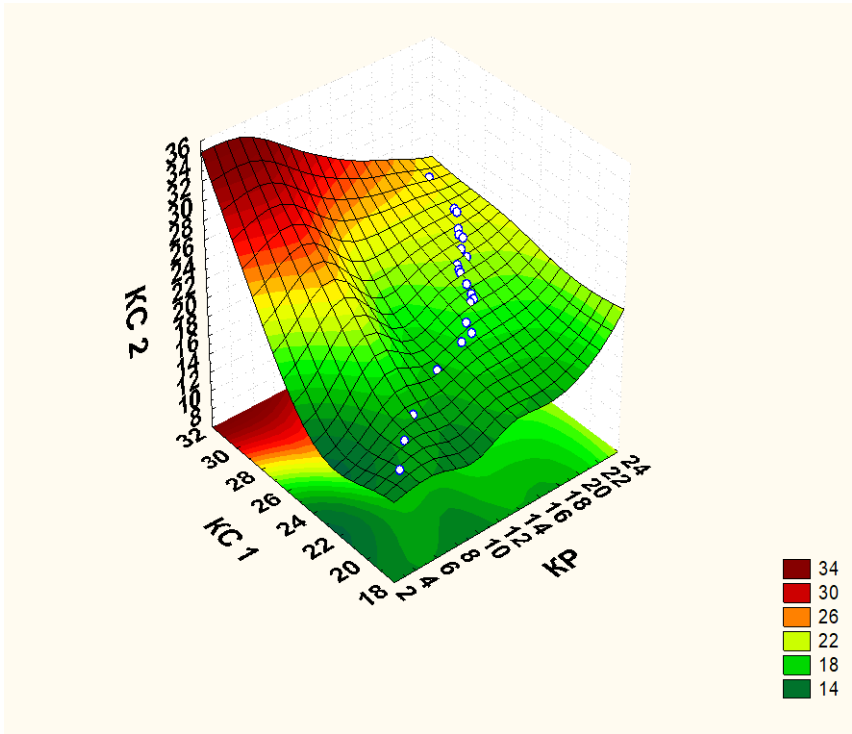


Рис. 3. Максимальні прояви продуктивності оптимізованих за параметрами компонентних ознак зразків

Для оптимізації формування граничних параметрів цінних господарських ознак використано неймережу. виявлено топологію оптимальних взаємозв'язків компонентних ознак урожайності.

Зокрема, відпрацьовано методологію добору перспективних зразків вусатого морфотипу з оптимальним поєднанням компонентних ознак на міжпопуляційному рівні шляхом аналізу в системі неймереж методом генетичних алгоритмів з попередньою нормалізацією параметрів компонентів (рис. 4.).

За результатами аналізу шляхом оптимізації параметрів компонентних ознак виділено цінні фенотипи за № 7, 10, 12, 16–20 (рис. 5).

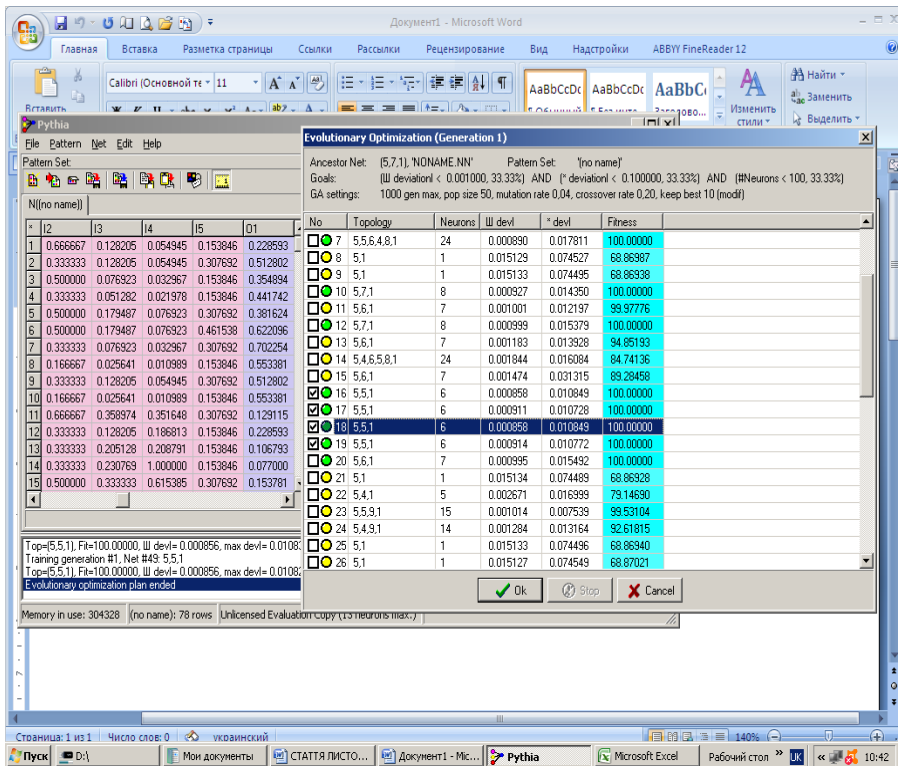
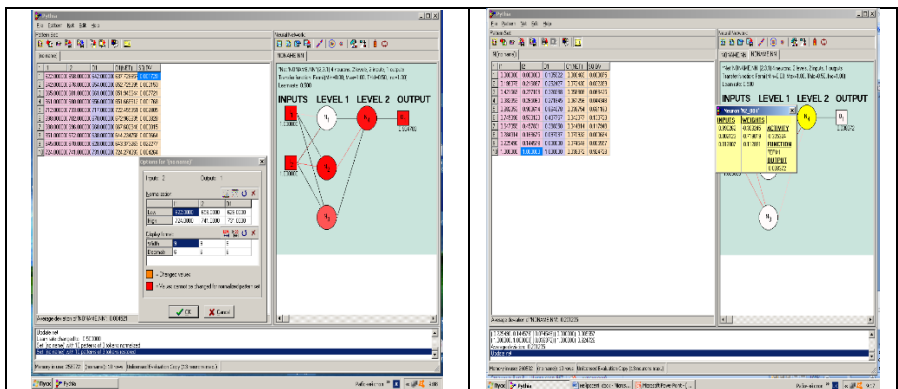


Рис. 4. Аналіз в системі неймереж методом генетичних алгоритмів з метою оптимізації параметрів компонентів ознак для виділення цінних фенотипів



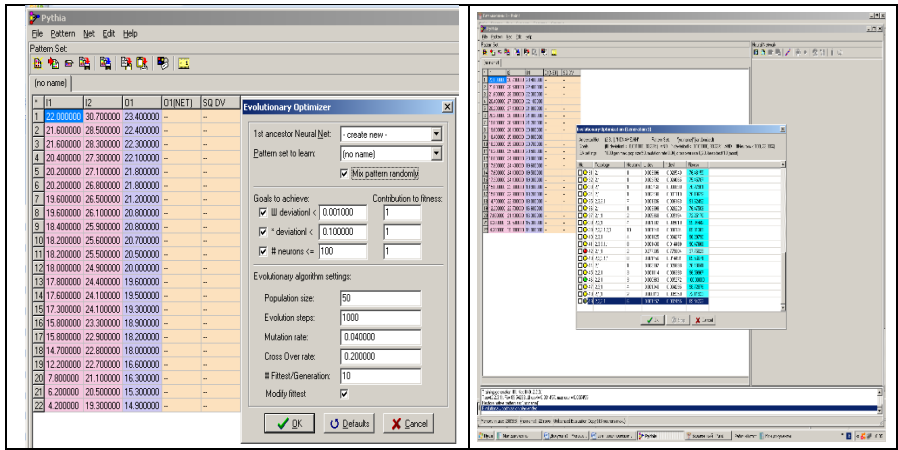
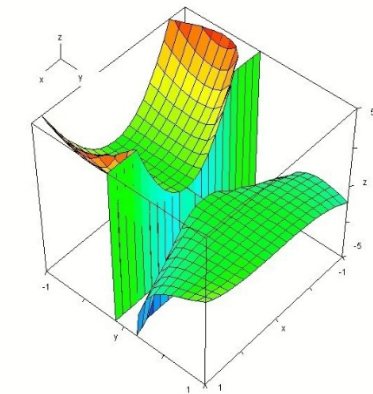


Рис. 5. Структура навчених та апробованих нейромереж для оптимізації взаємозв'язків компонентних ознак в процесі онтогенетичного розвитку рослин

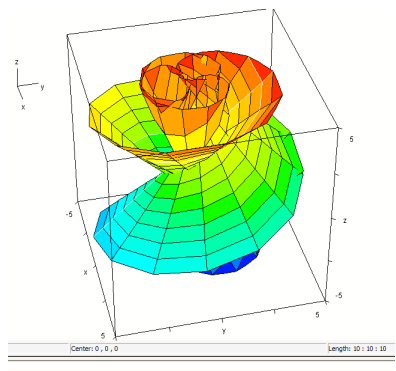
Розроблено багатовимірну платформу для виявлення дискретних станів зразків за параметрами ознак з метою підвищення точності ідентифікації цінних генотипів в системі декартових координат генотипової, епігенотипової та $G \times E$ мінливості (рис. 6а, 6б).



Гамма розподіл

$$Z = \lambda^3 * x^3 - 1 * e^{-\lambda x} / \lambda e^{-\lambda x}$$

а



Ідеальна модель системи взаємодій у топологічному просторі 4

б

Рис. 6. Ідеальна модель та гамма-розподіл взаємодії компонентних ознак в системі топологічного аналізу на аналітичних поверхнях відгуку

Система точного фенотипування генеративних органів гороху дозволяє прогнозувати майбутню урожайність (рис. 7).

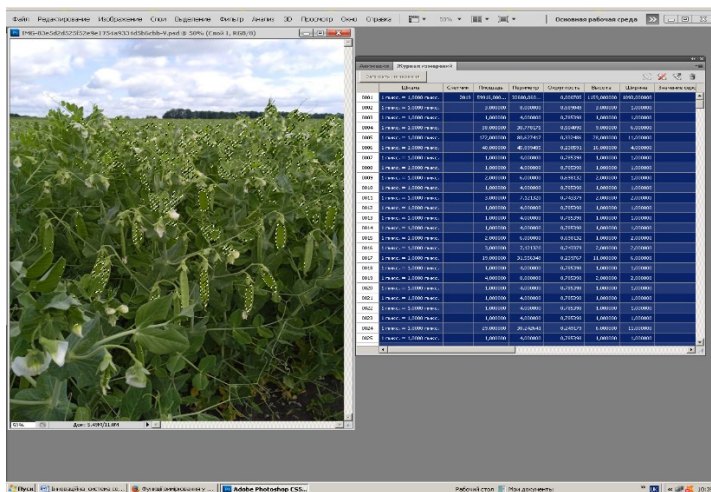


Рис. 7. Система точного фенотипування генеративних органів гороху

Висновки

Система селекції гороху має базуватись на поєднанні генетичної різноманітності, фенотипічної пластичності та адаптивного відбору.

Фенотипічна пластичність дозволяє культурі швидко реагувати на зміни клімату, а стабільність забезпечує стабільний урожай.

Застосування теорії еволюції фенотипів у селекції дозволяє прогнозувати та формувати нові адаптивні форми гороху.

Відбір за фенотиповими ознаками має враховувати не лише продуктивність, а й еволюційну стабільність фенотипів у змінному середовищі. Ці інноваційні положення ґрунтуються на сучасній теорії еволюції фенотипів, яка поєднує генетичні, епігенетичні та кліматичні фактори у єдину систему.

Системна селекція – це модель самоорганізації фенотипів у багатовимірному екологічному просторі. Її методологічна основа – синтез функціонального аналізу, теорії стабільності та байєсівської оптимізації, що формує нову парадигму адаптивного добору.

Екологічне випробування селекційних зразків гороху (*Pisum sativum* L.) у сумісній системі генотипової та епігенотипової мінливості з використанням технології фазово-параметричних портретів для визначення упадкування компонентних ознак урожайності є перспективним елементом технології селекції культури в умовах зміни клімату.

Список літератури

1. Mosconi F., Julicher F., Martin O. C. *Some nonlinear challenges in biology. Non-linearity*. 2008. Vol. 21, No. 8. P. T131–T147. <https://doi.org/10.1088/0951-7715/21/8/T03>
2. Demirel Y. *Information in biological systems and the fluctuation theorem. Entropy*. 2014. Vol. 16, No. 4. P. 1931–1948. <https://doi.org/10.3390/e16041931>
3. Serra F., Arbiza L., Dopazo J., Dopazo H. Natural selection on functional modules: a genome-wide analysis. *PLoS Computational Biology*. 2011. Vol. 7, No. 3. Article e1001093. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1001093>
4. Fu Y. Understanding crop genetic diversity under modern plant breeding. *Theoretical and Applied Genetics*. 2015. Vol. 128, Iss. 11. P. 2131–2142. <https://doi.org/10.1007/s00122-015-2585-y>
5. Lobos G., Camargo A., del Pozo A. et al. Editorial: Plant phenotyping and phenomics for plant breeding. *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. Article 2181. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02181>
6. Golbach F., Kootstra G., Damjanovic S. et al. Validation of plant part measurements using a 3D reconstruction method suitable for high-throughput seedling phenotyping. *Machine Vision and Applications*. 2016. Vol. 27. P. 663–680. <https://doi.org/10.1007/s00138-015-0727-5>
7. Mochida K., Koda S., Inoue K. et al. Computer vision-based phenotyping for improvement of plant productivity: a machine learning perspective. *GigaScience*. 2019. Vol. 8, No. 1. Article giy153. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giy153>
8. Camargo A., Mackay I., Mott R. et al. Functional mapping of quantitative trait loci (QTLs) associated with plant performance in a wheat MAGIC mapping population. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00887>
9. Anderegg W. Spatial and temporal variation in plant hydraulic traits and their relevance for climate change impacts on vegetation. *New Phytologist*. 2015. Vol. 205. P. 1008–1014. <https://doi.org/10.1111/nph.12907>
10. Yang R., Xu S. Bayesian shrinkage analysis of quantitative trait loci for dynamic traits. *Genetics*. 2007. Vol. 176. P. 1169–1185. <https://doi.org/10.1534/genetics.106.064279>
11. Wu C., Li G., Zhu J., Cui Y. Functional mapping of dynamic traits with robust t-distribution. *PLoS ONE*. 2011. Vol. 6. Article e24902. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024902>
12. Soudzilovskaia N. A., Elumeeva T. G., Onipchenko V. G. et al. Functional traits predict relationship between plant abundance dynamics and long-term climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2013. Vol. 110, No. 45. P. 18180–18184. <https://doi.org/10.1073/pnas.1310700110>

Наукове видання

**Вадим Вікторович Чернуський,
Станіслав Дмитрович Орлов,
Світлана Миколаївна Мандровська,
Валентина Іванівна Гореленко,
Світлана Сергіївна Климчук**

**МЕТОДОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНО
ОРІЄНТОВАНОЇ МОДЕЛІ СЕЛЕКЦІЇ В УМОВАХ ЗМІНИ
КЛІМАТУ ШЛЯХОМ ВИЗНАЧЕННЯ УСПАДКУВАННЯ
ГОСПОДАРСЬКО-ЦІННИХ ОЗНАК ПРИ ГІБРИДИЗАЦІЇ
ВИХІДНОГО МАТЕРІАЛУ ГОРОХУ ПОСІВНОГО
З РІЗНИМ ПРОЯВОМ ЕЛЕМЕНТІВ УРОЖАЙНОСТІ.
УДОСКОНАЛЕНІ ЕЛЕМЕНТИ ТЕХНОЛОГІЇ СЕЛЕКЦІЇ
ГОРОХУ ПОСІВНОГО ВІДПОВІДНО ДО ЗМІНИ КЛІМАТУ**

Науково-методичні рекомендації

Електронне видання

Погоджено до опублікування 07.11.2025.
Формат: PDF. Гарнітура Cambria.

Видавець

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН
03110, м. Київ, вул. Клінічна, 25
Тел.: (044) 275-50-00; e-mail: sugarbeet@ukr.net
<https://bio.gov.ua>

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 5713 від 19.10.2017

