



М. В. Роїк, О. І. Присяжнюк,  
В. О. Рибак, Л. Г. Грицишина, В. І. Власюк,  
Л. С. Андреева, Р. В. Кубряк, Д. В. Борисов

# МЕТОДИКА ДИДЖИТАЛІЗАЦІЇ ТА ОЦІНЮВАННЯ СЕЛЕКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ БУРЯКІВ ЦУКРОВИХ В ЕКОЛОГІЧНОМУ СОРТОВИПРОБУВАННІ

Науково-методичні рекомендації

Київ  
2025



НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР І ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ

**М. В. Роїк, О. І. Присяжнюк, В. О. Рибак,  
Л. Г. Грицишина, В. І. Власюк, Л. С. Андреева,  
Р. В. Кубряк, Д. В. Борисов**

**МЕТОДИКА  
ДИДЖИТАЛІЗАЦІЇ ТА ОЦІНЮВАННЯ  
СЕЛЕКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ БУРЯКІВ ЦУКРОВИХ  
В ЕКОЛОГІЧНОМУ СОРТОВИПРОБУВАННІ**

**Науково-методичні рекомендації**

**Київ • 2025**

УДК 633.63:631.52:631.53+004+51-7

*Рекомендовано до опублікування вченою радою  
Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН  
(протокол № 18 від 10.11.2025)*

*Рецензенти:*

**В. О. Доронін**, доктор с.-г. наук, професор;

**В. В. Чернуський**, кандидат с.-г. наук, с. н. с.

*Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН*

**Роїк М. В., Присяжнюк О. І., Рибак В. О., Грицишина Л. Г.,  
Власюк В. І., Андрєєва Л. С., Кубряк Р. В., Борисов Д. В.** Методика  
диджиталізації та оцінювання селекційних матеріалів буряків цукрових  
в екологічному сортовипробуванні: науково-методичні рекомендації  
/ НААН України, Ін-т біоенергет. культ. і цукр. буряків. Електрон. вид.  
Київ: ІБКіЦБ НААН, 2025. 34 с.

ISBN 978-617-8706-22-7 (PDF)

Викладено підходи до диджиталізації та комплексного оцінювання селекційних матеріалів буряків цукрових в екологічному сортовипробуванні. Запропоновано структуру інформаційної системи, математичні та алгоритмічні моделі оцінювання продуктивності, стабільності й пластичності гібридів, а також практичні рекомендації щодо автоматизованого аналізу експериментальних даних.

Призначено для селекціонерів, наукових співробітників, аспірантів та студентів закладів вищої освіти аграрного профілю.

**УДК 633.63:631.52:631.53+004+51-7**

**ISBN 978-617-8706-22-7 (PDF)**

© Інститут біоенергетичних культур  
і цукрових буряків НААН, 2025

© Колектив авторів, 2025

## ЗМІСТ

<b>Вступ .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Основні структурні компоненти моделей .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Основні модулі та їх взаємодії систем диджиталізації та оцінювання селекційних матеріалів буряків цукрових в екологічному сортовипробуванні .....</b>	<b>10</b>
<b>3. Системно-алгоритмічний підхід та аналіз взаємодій і функціонування системи оцінювання селекційних матеріалів буряків цукрових в екологічному сортовипробуванні .....</b>	<b>17</b>
3.1. Системно-алгоритмічний підхід до оцінювання гібридів буряків цукрових в екологічному сортовипробуванні .....	<b>18</b>
3.2. Динамічні моделі розвитку буряків цукрових .....	<b>22</b>
3.3. Моделі стресової адаптації .....	<b>23</b>
3.4. Еталонні моделі .....	<b>23</b>
3.5. Аналіз взаємодій і функціонування системи оцінювання селекційних матеріалів буряків цукрових в екологічному сортовипробуванні .....	<b>27</b>

## Вступ

В Україні на цей час лише Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН має змогу здійснювати повноцінну селекцію у напрямі створення високостабільних та адаптивних гібридів буряків цукрових. Селекційна система Інституту побудована за екологічним принципом, подібно до систем провідних селекційних центрів світу, що забезпечує високу результативність і ефективність. Така система дає змогу підтримувати широкий генофонд селекційних матеріалів, що є ключовим чинником для успішного розв'язання поточних і перспективних завдань практичної селекції.

Матеріали, створювані в окремих структурних підрозділах, характеризуються різноманіттям спадкових властивостей та адаптовані до всього діапазону екологічних умов вирощування культури, що дає змогу отримувати гібридні комбінації з високим ефектом гетерозису. Просторове розміщення підрозділів забезпечує можливість повноцінного екологічного сорто випробування та оперативної ідентифікації перспективних гібридних комбінацій.

На основі вивчення генетичних, функціональних та операційних характеристик ознак, що визначають продуктивність буряків цукрових (урожай коренеплодів, уміст цукрів, урожай і технологічний вихід цукру), економічну ефективність культури (однонасінність, якість насіння) та можливість отримання гібридного насіння (цитоплазматична чоловіча стерильність), розроблено та впроваджено генетично обґрунтовану структуру селекційного процесу зі створення гетерозисних гібридів. Запропонований принцип забезпечив інтеграцію діяльності всіх селекційних підрозділів системи дослідних станцій Інституту. Структурно процес охоплює такі послідовні етапи:

- створення вихідного селекційного матеріалу з високим рівнем генетично зумовленої мінливості за комплексом господарсько цінних ознак;

- формування (добір) батьківських компонентів гібридів;
- отримання та оцінювання експериментальних гібридів.

Водночас без цифровізації та уточнення закономірностей на цифровому рівні оптимізація селекційного процесу залишається обмеженою. За відсутності цифрових інструментів селекція й надалі переважно ґрунтуватиметься на фаховому досвіді, а не на стандартизованих і відтворюваних наукових процедурах. Використання сучасних методів роботи з великими масивами даних і нейронного моделювання підвищить об'єктивність оцінювань і дасть змогу формувати біометричні мо-

---

делі, що інтегрують генетичні та емпіричні закономірності мінливості окремих ознак і їх комплексів.

Математичні методи оцінювання генетичного матеріалу активно застосовуються в науково-дослідних та селекційно-генетичних установах світу (Нідерланди – м. Вагенінген, Інститут CPRO; CIMMYT, Мехіко; Німеччина – KWS; Бельгія – SESVANDER-HAVE). Проте створені в цих організаціях системи оцінювання різноманітності селекційних матеріалів і гібридів буряків цукрових використовуються виключно у внутрішніх наукових програмах. Відкритих систем для оцінювання екологічного складника продуктивності гібридів, а також докладних описів процедур оцінювання у відкритому доступі немає.

Відсутність у вільному доступі цифрових систем для екологічного оцінювання селекційних матеріалів буряків цукрових зумовлює необхідність розвитку власних рішень у цьому напрямі. Оцінювання гібридів лише за рівнем формування певних ознак без урахування повного комплексу їхньої екологічної мінливості може призводити до втрати значної частини перспективного вихідного матеріалу. Крім того, розроблення технологій вирощування під нові гібриди потребує точного встановлення їх норми реакції на елементи технології та параметри навколишнього середовища.

---

## 1. Основні структурні компоненти моделей

В основу формування головних структурних компонентів моделі адаптивної інформаційної системи прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур покладено ієрархічність прояву ознак в онтогенезі та відповідність їхнього прояву в органогенезі. Оскільки етапи реалізації ознак у фенотипі відображають фази росту й розвитку рослин, взаємозв'язок між компонентами моделі доцільно розглядати як показник динамічної впорядкованості взаємодії елементів генетичної системи.

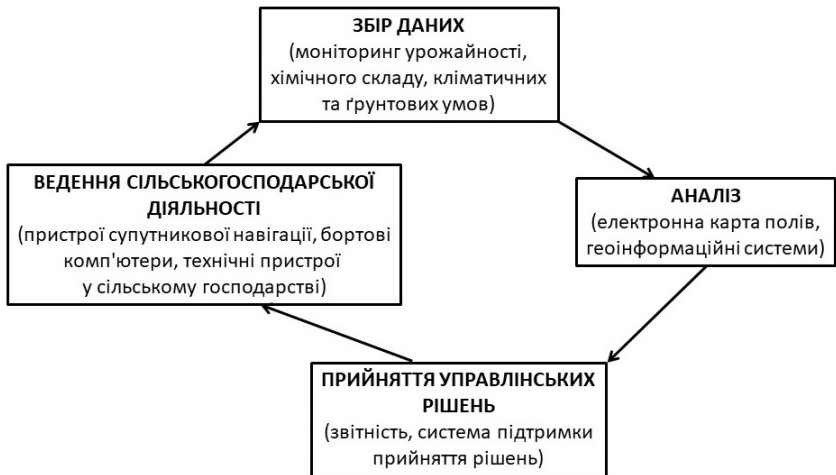
За аналогією з моделями, представленими в працях В. А. Драгавцева, П. П. Літуна та А. Л. Зозулі, модель включає три модулі ознак – підсумкову та дві компонентні групи. Принциповою відмінністю від цих підходів є використання запропонованої моделі саме для прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур, тоді як інші науковці переважно описують наявні взаємозв'язки та їхній внесок у формування продуктивності сортів.

Підсумковими вважають ті ознаки, що характеризуються екологічно стабільними зв'язками між собою та мають найвищий сумарний внесок у кінцеву інтегральну ознаку – продуктивність рослин. На кожному наступному етапі побудови моделі попередня підсумкова ознака стає компонентною, зберігаючи максимальний внесок у підсумкову ознаку наступного модуля.

Моделі ознак продуктивності досліджуваних сортів мають спільні риси: значення ознак визначаються біологічними особливостями конкретного генотипу; їхня варіабельність зумовлена реакцією генотипу на зміну умов вирощування; підсумкова ознака стабільно і високо корелює з ознакою, що є підсумковою в наступному модулі.

Сьогодні є велика кількість практичних моделей, і особливо наочно їхні особливості проявляються в системах точного землеробства. На відміну від теоретичних або суто наукових моделей, такі системи орієнтовані на точне визначення потреб рослин і прогнозування врожаю. Для розуміння принципів відмінностей їхньої побудови можна виокремити узагальнену структуру таких моделей (рис. 1).

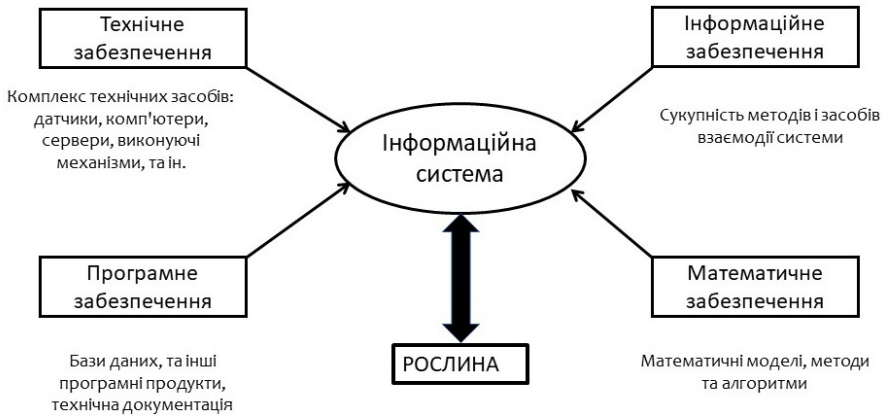
Основним недоліком багатьох моделей, що застосовуються у технологіях точного землеробства, є їхня орієнтація на використання фахівцями біологами та агрономами. Зокрема, моделі WOFOST, CERES, CropSyst та інші потребують від агрономів значних спеціалізованих знань. Альтернативою є впровадження інтегрованих систем точного землеробства.



**Рис. 1. Структура формування моделей, які використовують у системах точного землеробства**

Переважно технічний підхід до моделювання має суттєві обмеження: детальний аналіз потреб рослин і технологічні вимоги агрономів відходять на другий план у процесі поліпшення технічного складника та удосконалення програмних продуктів. У результаті окремі модулі – контроль палива, моніторинг переміщення техніки, агрохімічні карти, карти врожайності – впроваджують без інтеграції в єдину систему підтримання рішень.

Більшість методів дистанційного аналізу стану рослин ґрунтується на обробленні супутникових або аерофотознімків чи на даних сенсорів, інтегрованих у сільськогосподарську техніку. Такі сенсори часто не контактують безпосередньо з рослинами, а комп'ютерні системи застосовують усереднення інформації за закритими алгоритмами, що ускладнює точну інтерпретацію результатів. Наприклад, зміну кольору листків на знімках складно віднести до конкретної причини – хвороби, помилки у внесенні агрохімікатів, тимчасової нестачі або постійного дефіциту елементів живлення. Відповідно, точність прогнозування за такими даними є недостатньою, оскільки цифрові технології можуть не враховувати непередбачених алгоритмом похибок. Крім того, більшість сучасних систем точного землеробства не забезпечують зворотного зв'язку, необхідного для коригування рішень у відповідь на зміни умов вирощування. Тому важливо формувати структуру цифрової технології рослин як системи, що інтегрує технічні, інформаційні, програмні та математичні компоненти (рис. 2).



**Рис. 2. Структура взаємодії основних компонентів цифрової технології вирощування рослин**

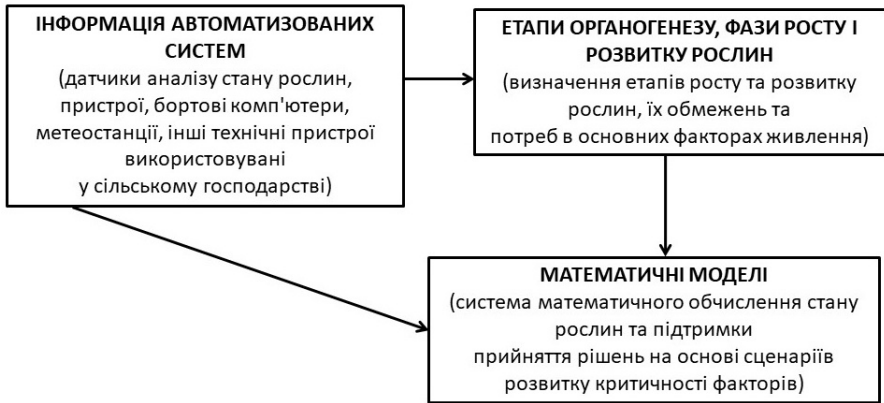
Найбільш розробленими серед компонентів структури цифрової технології є математичне, інформаційне та програмне забезпечення. Їх порівняно легко адаптувати до особливостей взаємодії компонентів у процесі побудови конкретних математичних моделей. Натомість технічне забезпечення – створення та впровадження високочутливих сенсорів стану рослин – потребує особливої уваги. Саме від нього залежить точність моделі та можливий часовий крок прогнозування.

Для створення високоточної моделі інформація повинна надходити від сучасних сенсорів, інтегрованих у агроценоз і здатних передавати дані про стан рослин і навколишнього середовища у режимі онлайн 24/7. Отримані дані легко зіставляють з метеорологічними та агрохімічними показниками. Спостереження за рослинами здійснюють до, під час і після виконання основних агротехнічних операцій, що неможливо реалізувати вручну одразу після, наприклад, внесення пестицидів. Сенсори об'єднують в єдину мережу, дані надходять до центрального сервера для подальшої обробки програмним забезпеченням. Такий підхід забезпечує високу швидкість збору інформації, уніфікацію алгоритмів та прискорення її аналізу.

Аналіз наявних математичних моделей та власні теоретичні й практичні розробки дозволяють сформулювати блок-схему тримодульної моделі прогнозування продуктивності рослин: підсумкової та двокомпонентних груп ознак (рис. 3).

На кожному етапі росту й розвитку рослин визначають власну блок-схему модулів ознак, які залежать від впливу факторів вирощу-

вання, критичних періодів органогенезу та можливостей математичного опису взаємодій. Крок моделі може визначатися мінімальним часовим інтервалом роботи польових датчиків, однак доцільно встановлювати його на рівні однієї доби або відповідних фенологічних фаз розвитку.



**Рис. 3. Модель прогнозування продуктивності рослин**

Практична реалізація адаптивної інформаційної системи прогнозування продуктивності культур повинна охоплювати такі аспекти цифрових технологій вирощування, інтегровані у програмно-апаратний комплекс:

- цифрова технологія повинна базуватися на потребах рослини та забезпечувати ці потреби доступними ресурсами для досягнення стабільно високої врожайності й якості продукції;
- програмний комплекс має самонавчатись у процесі накопичення даних; із кожним наступним роком обсяг інформації збільшується, що підвищує точність прогнозів;
- програмно-апаратний комплекс повинен забезпечувати зворотний зв'язок між своїми структурними елементами: отримані дані та прогнози використовують для прийняття рішень, а у разі суттєвих змін умов вирощування рішення щодо окремих технологічних операцій переглядають.

## **2. Основні модулі та їх взаємодії систем диджиталізації й оцінювання селекційних матеріалів буряків цукрових в екологічному сортовипробуванні**

Під час оцінювання результатів екологічного сортовипробування науковці постійно працюють зі значними масивами експериментальних даних, які є взаємопов'язаними та не підлягають розділенню. Складність роботи з такою системою зумовлена також тим, що польове сортовипробування одних і тих самих гібридів одночасно проводиться у кількох пунктах випробування. У зв'язку з цим під час опрацювання експериментальних матеріалів доцільно застосовувати комп'ютерні системи управління базами даних (СУБД).

У межах бази даних можна структурувати інформацію, розподіливши її на окремі контейнери – таблиці; за допомогою електронних форм переглядати, додавати та оновлювати дані в таблицях; використовуючи запити, здійснювати пошук і відбір необхідної інформації; шляхом формування звітів аналізувати або друкувати дані відповідно до заданого макета; створювати сторінки доступу до даних, що надає користувачам можливість перегляду, оновлення або аналізу інформації.

Під час планування модулів та їх взаємодії в системі бази даних для оцінювання селекційних матеріалів буряків цукрових в екологічному сортовипробуванні необхідно дотримуватися принципів максимально повного та ретельного збору експериментальних даних і їх всебічного аналізу. У зв'язку з цим розрізнену інформацію, яка формується та обліковується в різних пунктах екологічного сортовипробування (дослідно-селекційних станціях мережі), доцільно об'єднувати шляхом дистанційного завантаження на сервер в єдину базу даних.

Наразі документація з оцінювання селекційних матеріалів буряків цукрових у конкурсному сортовипробуванні ведеться переважно вручну з подальшим перенесенням даних в електронні таблиці типу Excel та надсиланням їх електронною поштою до Інституту для аналізу й формування висновків. Крім того, вже впроваджено наскрізне шифрування сортозразків із використанням однакових кодів для різних місць проведення досліджень. Водночас аналізування даних і формулювання висновків за результатами конкурсного сортовипробування здійснюється в ручному режимі, а значна кількість факторів впливу не враховується через складність виявлення взаємодій у великих масивах інформації.

Таким чином, передумови для оцифрування отримуваних даних фактично вже створені, однак відсутність автоматизованих засобів збору та обробки інформації зумовлює повільне і не завжди достатньо якісне опрацювання накопичених матеріалів.

З огляду на викладене можна сформулювати структуру основних модулів програмного забезпечення, з якими взаємодіятимуть користувачі під час проведення досліджень та наповнення системи відповідною інформацією.

*Насіннева книга.* У цій книзі фіксують дані про насіння, отримане для проведення екологічного сортовипробування. Тут зазначають загальну кількість і якість насіння кожного номера, його витрати та залишки після посівів поточного року, а також місце зберігання в насінневій коморі (табл. 1).

*Умови проведення дослідів.* Записи ведуться щорічно та охоплюють дати і види агротехнічних операцій, норми й склад добрив, відомості про шкідників і хвороби, а також результати фенологічних спостережень та обліків, що здійснюються в дослідах (табл. 2).

*Результати порівняльних випробувань.* У цій книзі узагальнюють основні дані щодо проведення порівняльних випробувань, зокрема позначення гібридів, номери ділянок, на яких вони висіяні в повтореннях, порядок висіву. Також фіксують результати спостережень за окремими номерами та зміст обліків упродовж вегетації і під час збирання врожаю (табл. 3 і 4).

Використання блоків даних дає змогу здійснювати їх інтуїтивне групування та уникати ускладнень під час наповнення бази даних, оскільки взаємозв'язки між основними табличними інформаторами забезпечують логічну узгодженість інформації й дають змогу оминати складні ланцюгові взаємозалежності.

Однією з початкових форм, з якої розпочинають роботу з базою даних, є таблична форма «Насіннева книга» (табл. 1).

У цю форму вноситься максимально повна інформація, що характеризує насіння досліджуваних сортозразків як за посівними властивостями, так і за конкретними показниками, пов'язаними з технологією вирощування, зокрема рекомендованою нормою висіву, орієнтовними строками проведення технологічних операцій, наявністю насінневого матеріалу та його якістю.

Цілком очевидно, що для організації методично коректного сортовипробування досліджуваних сортозразків необхідно застосовувати єдині агротехнічні операції та виконувати їх в однакові строки. Також доцільно неухильно дотримуватися заданої густоти посівів і проводити збирання коренеплодів в один і той самий термін. Водночас важливо не лише грамотно спланувати конкурсне сортовипробування, а й забезпечити отримання максимально повної та достовірної інформації за його результатами. Якщо селекціонером створено сортозразок, який проявляє найвищу продуктивність за вирощування в загущених або, навпаки, зріджених посівах, чи є придатним до пізніх строків збирання, така інформація щонайменше має бути відображена в інформаційній системі. Оптимальним є також планування й організація закладання сортовипробувальних посівів таким чином, щоб забезпечити ефективну реалі-

зацію біологічного потенціалу кожного сортозразка. Саме в цьому контексті ключового значення набуває раціональна організація ведення електронних баз даних.

Таблиця 1

**Таблична форма бази даних: «Насіннева книга»**

Поле	Тип даних	Розмір	Підстановка
Порядковий номер	Числовий	10	Поле
Назва сортозразка або його позначення	Текстовий	40	Поле
Опис (за потреби)	Текстовий	200	Поле
Рекомендована технологія вирощу-ня	Поле MEMO	Авто	Поле
Фото	Поле OLE	Авто	Поле
Орієнтовні строки агротехн. операцій	Числовий	1	Поле
Норма висіву	Числовий	10	Поле
Лабораторна схожість насіння	Числовий	10	Поле
Енергія проростання	Числовий	10	Поле
Польова схожість насіння	Числовий	10	Поле
Маса 1000 насінин	Числовий	10	Поле
Одноростковість	Числовий	10	Поле
Вирівняність	Числовий	10	Поле
Фракція насіння	Числовий	10	Поле
Потреба насіння на заплановані площі	Числовий	10	Поле
Залишки насіння	Числовий	10	Поле
Місце зберігання	Текстовий	80	Поле

Наступною важливою формою баз даних інформаційної системи наукового супроводу сортовипробування є таблична форма «Умови проведення дослідів» (табл. 2).

Таблиця 2

**Таблична форма бази даних: «Умови проведення дослідів»**

Поле	Тип даних	Розмір	Підстановка
Кількість опадів, мм	Числовий	10	Поле
Середньодобова температура повітря, °С	Числовий	10	Поле
Вологість повітря, %	Числовий	10	Поле
Температура поверхні ґрунту, °С	Числовий	10	Поле
Сонячна інсоляція (ФАР)	Числовий	10	Поле
Сума активних температур, °С	Числовий	10	Поле
Сума ефективних температур, °С	Числовий	10	Поле

У відповідних формах подається інформація про погодні умови в період росту й розвитку буряків цукрових, зокрема кількість опадів, вологість повітря, суму температур, фотосинтегічно активну радіацію (ФАР) та інші показники. Метеорологічні дані можуть вводитися вручну або автоматично зчитуватися з відповідного програмно-метеорологічного комплексу, оснащеного інтерфейсом передавання даних на персональний комп'ютер.

Упродовж росту та розвитку буряків цукрових визначають календарні строки настання фенологічних фаз, які фіксують у таблиці 3.

Таблиця 3

**Таблична форма бази даних: «Фенологічні фази росту й розвитку»**

Поле	Тип даних	Розмір	Підстановка
Сходи / 09 ВВСН	Числовий	15	Поле
Два справжніх листки розпушені (перша пара справжніх листків) / 12 ВВСН	Числовий	15	Поле
Чотири справжніх листки розпушені (друга пара справжніх листків) / 14 ВВСН	Числовий	15	Поле
Вісім справжніх листків / 18 ВВСН	Числовий	15	Поле
Початок змикання рядків: 10 % рослин сусідніх рядків змикаються / 31 ВВСН	Числовий	15	Поле
Понад 90 % рослин сусідніх рядків змикаються / 39 ВВСН	Числовий	15	Поле
Технічна стиглість / 43 ВВСН	Числовий	15	Поле

Потреба в удобренні та захисті рослин від шкідників і хвороб формується відповідно до результатів агрохімічних, ентомологічних та фітопатологічних обстежень з урахуванням показника потенційної врожайності, а тому цією інформацією можна знехтувати під час заповнення табличних форм сортовипробування. Дані щодо системи живлення і захисту мають забезпечувати максимальну продуктивність рослин за мінімальної шкоди, завданої їм іншими організмами. При цьому в різних регіонах проведення досліджень та на різних ґрунтах відрізнятимуться як дози добрив, так і кратність застосування пестицидів.

Водночас слід зазначити, що фактор екологічності проведення досліджень, з огляду на розміщення дослідних ділянок у різних агроекологічних зонах, уже враховує наявність різного впливу умов вирощування на формування рівня продуктивності культури. Проте внесення до бази даних інформації цього типу дає змогу в подальшому більш інформативно опрацювати експериментальні матеріали (табл. 4).

Таблиця 4

**Таблична форма бази даних: «Агротехнологія буряків цукрових»**

Поле	Тип даних	Розмір	Підстановка
Основний обробіток ґрунту	Числовий	10	Поле
Дата проведення обробітку	Дата / час	Авто	Поле
Передпосівний обробіток ґрунту	Числовий	5	Поле зі списком
Дата проведення обробітку	Дата / час	Авто	Поле
Механічні обробітки по вегетації	Числовий	5	Поле зі списком
Дата проведення обробітку	Дата / час	Авто	Поле
Удобрення	Числовий	Авто	Поле зі списком
Дата внесення добрива	Дата / час	Авто	Поле
Гербіцид	Числовий	25	Поле зі списком
Дата застосування гербіциду	Дата / час	Авто	Поле
Інсектицид	Числовий	25	Поле зі списком
Дата застосування інсектициду	Дата / час	Авто	Поле
Фунгіцид	Числовий	25	Поле зі списком
Дата застосування фунгіциду	Дата / час	Авто	Поле

Представлення різних типів операцій у відокремлених табличних формах бази даних дає змогу не лише краще їх структурувати, а й більш чітко визначити алгоритм роботи з ними, тобто автоматизувати окремі процеси наповнення бази даних за рахунок детальнішої структуризації робочих процедур. Зокрема, дана таблична форма сконструйована таким чином, що забезпечує її поетапне наповнення в міру появи нових агротехнічних операцій, однотипних за своєю суттю, зокрема чергових обробок гербіцидами або наступних міжрядних обробітків.

Наступною важливою табличною формою бази даних є форма, що відображає показники продуктивності вирощування буряків цукрових на дослідних ділянках (табл. 5).

Надалі інформація, структурована у табличних формах бази даних, дає змогу проводити розрахунок стабільності та пластичності отримуваної врожайності сортозразків відповідно до методики Ебергарта – Рассела.

На основі проведених досліджень визначено блок-схему роботи бази даних, яка дає змогу створити алгоритм роботи науковця з цією системою (рис. 4).

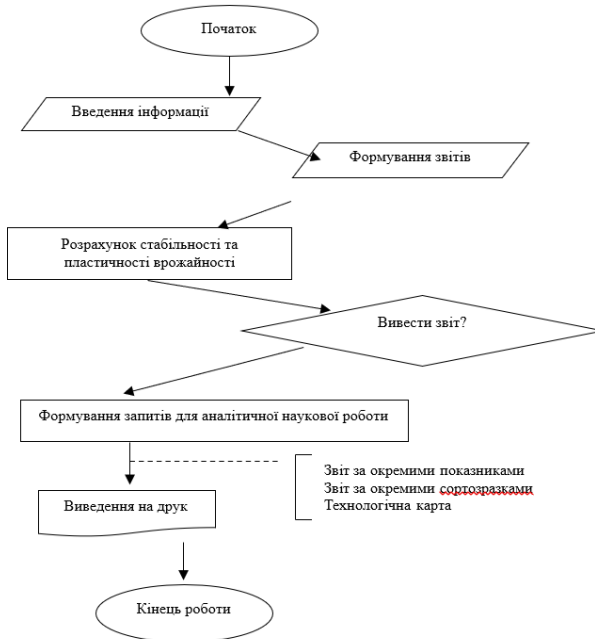
Отже, алгоритм роботи з базою даних умовно поділяється на операції наповнення бази даними: введення первинних даних, формуван-

ня таблиць бази даних та розрахунок стабільності й пластичності урожайності буряків цукрових, який можна здійснювати лише після завершення вегетаційного періоду та заповнення таблиці 5 для всіх сортозразків, що досліджуються в поточному році.

Таблиця 5

**Таблична форма бази даних: «Урожайність та якість сортозразків буряків цукрових»**

Поле	Тип даних	Розмір	Підстановка
Урожайність, т/га	Числовий	10	Поле
Цукристість, %	Числовий	10	Поле
Збір цукру, %	Числовий	10	Поле
Вміст α-амінного азоту, %	Числовий	10	Поле
Вміст землі на коренеплодах (фізичне забруднення), %	Числовий	10	Поле
Кількість цвітушних коренеплодів, шт./га	Числовий	10	Поле



**Рис. 4. Блок-схема роботи бази даних**

Наступним етапом користування базою даних є аналітична робота науковця, що дає змогу виокремити фактори впливу погодних умов і агротехнічних заходів, а також виявити особливості реакції генотипу на зміну цих умов і їх прояв у фенотипі.

Серед відмінних рис користування базою даних є те, що кожен науковець, відповідальний за наповнення цифровою інформацією, на місці проведення досліджень виконує лише вузький сегмент роботи впродовж вегетаційного періоду культури.

Надалі, після завершення формування даних та аналізу врожайності й цукристості культури за методикою Ебергарт – Рассела, для всіх наукових працівників, задіяних у сортовипробуванні, відкривається доступ до сформованої інформації. Це фактично посилює можливості аналітичної роботи з даними та перетворює індивідуальний науковий матеріал конкретного вченого на загальнодоступне наукове надбання установи.

Отже, застосування бази даних у процесі сортовипробування буряків цукрових дає змогу з високою точністю описати перебіг процесів росту та розвитку рослин і ефективно оцінити отриманий експериментальний матеріал.

### 3. Системно-алгоритмічний підхід та аналіз взаємодій і функціонування системи оцінювання селекційних матеріалів буряків цукрових в екологічному сортовипробуванні

Загалом для реалізації сформованого наукового завдання було залучено різні моделі для оцінювання результатів польових випробувань буряків цукрових. Основні переваги цих моделей наведено в таблиці 6.

Таблиця 6

**Моделі для оцінювання результатів польових випробувань буряків цукрових**

Тип моделі	Призначення	Що дає в оцінюванні гібридів
Моделі стабільності та пластичності (Eberhart – Russell: $b_i, S^2d_i$ )	Аналіз реакції гібридів на різні умови вирощування	Визначення універсальних, пластичних і консервативних гібридів
Регресійні моделі з індексом середовища $I_j$	Оцінка відповідності продуктивності умовам вирощування	Точна інтерпретація реакції гібрида в різних мікроекологіях
ANOVA / дисперсійний аналіз	Виявлення впливу факторів «сорт × середовище × рік»	Статистичне підтвердження відмінностей між гібридами
Кластеризація середовищ	Групування точок досліду за агроєкологією	Виявлення мікрозон та оптимальних умов для гібрида
Сценарні моделі $S_1$ – $S_5$	Моделювання роботи гібридів під різними технологіями	Прогноз продуктивності в стресових і оптимальних умовах
Багатовимірні моделі ознак (двокомпонентна + інтегральна модель)	Комплексна оцінка морфобіологічних показників	Формування «портрета» гібрида за ключовими ознаками
Кореляційні моделі	Аналіз зв'язків між урожайністю і ознаками	Виявлення ключових предикторів урожайності
Цифрові сенсорні моделі (оптичні, ґрунтові)	Інтеграція фізіологічних та середовищних параметрів	Раннє виявлення стресів і прогноз стану гібридів
Кластеризація середовищ	Групування точок досліду за агроєкологією	Виявлення мікрозон та оптимальних умов для гібрида

### **3.1. Системно-алгоритмічний підхід до оцінювання гібридів буряків цукрових в екологічному сортовипробуванні**

#### **1. Концептуальна основа системи оцінювання**

У дослідженні закладено ключовий принцип: оцінювання гібридів має спиратися на адаптивні математичні моделі, які відображають взаємодію генотипу та агроекологічного середовища в динаміці. Це особливо важливо для буряків цукрових, чутливих до погодних умов, фотоперіоду та елементів технології вирощування.

Ключова ідея полягає в тому, що екологічне сортовипробування повинно не лише диференціювати зони, а й враховувати мікроагрокліматичні, ґрунтові та технологічні варіації всередині однієї зони, оскільки вони часто суттєво впливають на стабільність і пластичність гібридів.

**2. Багаторівнева система оцінювання** складається з чотирьох функціональних блоків:

##### *2.1. Математично-інформаційний блок*

- Використання динамічних моделей росту й розвитку (WOFOST, SUCROS, моделі Константінова, Образцова, Галяміна тощо) для оцінки реакції гібридів на зміну абіотичних факторів.
- Використання щоденних або фенологічних кроків моделювання, що дає змогу враховувати критичні фази органогенезу.
- Дані з польових сенсорів (вологість, температура, NDVI/NDRE), метеостанцій та агрохімічних аналізів об'єднуються в єдину базу.

##### *2.2. Статистично-аналітичний блок*

- Застосування кореляційно-регресійного, дисперсійного та кластерного аналізів для виокремлення ключових факторів.
- Використання моделі Ебергартта – Рассела для визначення коефіцієнта екологічної пластичності ( $b_i$ ) та стабільності ( $S^2d_i$ ) кожного гібрида на основі багаторічних або багатоточкових даних.
- Обчислення варіаційних параметрів ( $\sigma$ ,  $Cv$ ) за підзональними та мікроекологічними підмножинами даних.

##### *2.3. Цифрово-моделювальний блок*

- Формування трьох модулів ознак (дві компонентні + підсумкова), які описують:
    - анатомо-морфологічні показники (густота, листкова поверхня, фенофази);
-

- біохімічні та технологічні показники (вміст цукрів, технологічний вихід);
- урожай коренеплодів як інтегральну підсумкову ознаку.
- Наявність зворотного зв'язку: якщо сенсорні або погодні дані змінюються, програмний модуль автоматично переглядає рекомендації для кожного гібрида.

#### *2.4. Верифікаційно-рекомендаційний блок*

- Перевірка достовірності моделей на основі реальних польових даних (багаторічні серії, кілька локацій в одній зоні).
- Розрахунок індексів середовищ (I<sub>j</sub>) для окремих господарств або пунктів сортовипробування, що дає змогу виявити локальні «мікроекологічні профілі» навіть в межах однієї ґрунтово-кліматичної зони.
- Формування адаптивних рекомендацій щодо зон, підзон і технологій вирощування для конкретних гібридів.

### **3. Алгоритм оцінювання гібридів буряків цукрових**

Нижче наведено покроковий алгоритм, адаптований до внутрішньозональних агроекологічних варіацій:

#### *Крок 1. Підготовка даних*

- Збір польових даних із пунктів випробування (урожайність, вміст цукру, біометрія, фенологія).
- Додавання погодних, агрохімічних і сенсорних даних для кожного пункту.

#### *Крок 2. Групування за мікроагроекологічними умовами*

- Використання кластерного аналізу для групування ділянок усередині зони за:
  - типом ґрунту (супіщаний, чорнозем, дерново-підзолистий тощо);
  - погодними умовами;
  - агротехнологічними особливостями (строки сівби, густина, полив).
- Формування 3–5 агроекологічних підкластерів на зону.

#### *Крок 3. Розрахунок індексів середовищ*

- Для кожного підкластера  $j$  обчислюється індекс середовища  $I_j$  як відхилення його середнього від загального середнього.
- Ці індекси використовуються в моделі Ебергарта – Рассела.

#### *Крок 4. Оцінка гібридів*

- Для кожного гібрида виконується:
  - розрахунок коефіцієнта регресії  $b_i$  (пластичність);
  - розрахунок  $S^2d_i$  (стабільність);
  - побудова регресійних ліній урожайності на індекс середовища.
- Класифікація:
  - $b_i \approx 1$  і низьке  $S^2d_i \rightarrow$  гібрид стабільний, універсальний;
  - $b_i > 1 \rightarrow$  пластичний, добре реагує на поліпшення умов;
  - $b_i < 1 \rightarrow$  вузькоспеціалізований, стабільний у менш сприятливих середовищах.

#### *Крок 5. Моделювання реакції*

- Застосування динамічних моделей для перевірки отриманих оцінок на масивах метео- та сенсорних даних.
- Прогнозування потенціалу гібридів за альтернативних сценаріїв (зрошення, зміна строків сівби, зміна погодних умов тощо).

#### *Крок 6. Верифікація та рекомендації*

- Порівняння прогнозних і фактичних даних.
- Формування рекомендацій:
  - для яких агроекологічних підкласстерів гібрид найбільш придатний;
  - які технологічні елементи забезпечують максимальний ефект;
  - чи доцільна широка зональна або локальна адаптація.

### **4. Переваги підходу в межах однієї зони**

1. Виявлення «локальних кращих» серед гібридів, які можуть не показувати високих результатів у середньому по зоні, але стабільні в певних підзонах.
2. Підвищення точності моделювання за рахунок інтеграції метео- та сенсорних даних.
3. Зменшення похибки добору – відсіювання гібридів із нестабільною реакцією на дрібні коливання агрофонів.
4. Можливість точного технологічного налаштування під конкретний гібрид у межах підзони (сівозміна, строки, живлення).

### **5. Практична реалізація**

- Програмне забезпечення: RTC Mathcad Prime 3.1, Excel, Statistica / SPSS, з перспективою переходу до APSIM або WOFOST як бекенду.
-

- Польова мережа: 3–5 пунктів в одній зоні з різними мікроагрокліматичними умовами.
- Алгоритмічний модуль: автоматизовані скрипти для кластеризації, розрахунку  $b_i$ ,  $S^2d_i$  та побудови звітів.
- Результат: інтерактивні карти придатності гібридів та таблиці рекомендацій для господарств.

Отже, система й алгоритм, викладені вище, дають змогу переосмислити екологічне сортовипробування буряків цукрових: замість жорсткого поділу на зони можна застосовувати внутрішньозональне агроекологічне моделювання. Це підвищує точність добору гібридів, ефективність технологій та стійкість виробництва в умовах кліматичних змін.

Графічна блок-схема до цього алгоритму може виглядати таким чином:

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <title>Блок-схема оцінювання гібридів буряків цукрових</title>
  <script
src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/mermaid/dist/mermaid.min.js"></script>
  <script>mermaid.initialize({ startOnLoad: true, theme: 'default'
});</script>
</head>
<body>
  <div class="mermaid">
    flowchart TD

```

```

      A[Збір польових, метео- та сенсорних даних] --> B[Кластеризація агроекологічних умов всередині зони]

```

```

      B --> C[Розрахунок індексів середовищ  $I_{<sub>j</sub>}$ ]

```

```

      C --> D[Статистичний аналіз<br/>(кореляційний, регресійний, дисперсійний)]

```

```

      D --> E[Оцінка гібридів за Еберхартом–
      Расселом<br/>(b<sub>i</sub>, S<sub>di</sub>)]

```

```

      E --> F[Моделювання реакції гібридів<br/>на фактори середовища (динамічні моделі)]

```

```

      F --> G[Верифікація моделей<br/>на багаторічних даних]

```

```

      G --> H[Формування адаптивних рекомендацій]

```

```

      style A fill:#f2f2f2,stroke:#333,stroke-width:1px

```

```

      style B fill:#e5f5e0,stroke:#333,stroke-width:1px

```

```

      style C fill:#e5f5e0,stroke:#333,stroke-width:1px

```

```

style D fill:#d0e1f9,stroke:#333,stroke-width:1px
style E fill:#d0e1f9,stroke:#333,stroke-width:1px
style F fill:#fce7c8,stroke:#333,stroke-width:1px
style G fill:#fce7c8,stroke:#333,stroke-width:1px
style H fill:#c6efce,stroke:#333,stroke-width:1px
</div>
</body>
</html>

```

### 3.2. Динамічні моделі розвитку буряків цукрових

Складне завдання з моделювання процесів росту й розвитку буряків цукрових, а також оцінювання їх реакції на агротехнічні, кліматичні та ґрунтові умови варто розбити на простіші підмножини і сформувані моделі, які слугують орієнтиром росту й розвитку посівів.

*Модель фенологічного розвитку*

Фази розвитку:

- Етап 1: Проростання → Сходи (GDD = 80–120)
- Етап 2: Розетка (GDD = 400–600)
- Етап 3: Змикання рядків (GDD = 800–1000)
- Етап 4: Технічна стиглість (GDD = 2200–2500)

GDD – сума ефективних температур.

*Модель накопичення біомаси*

Рівняння росту:

$$\frac{dB}{dt} = RUE \times PAR \times f(T) \times f(W) \times LAI,$$

де: B – біомаса; RUE – ефективність використання радіації; PAR – фотосинтетично активна радіація; LAI – індекс листової поверхні; f(T), f(W) – функції впливу температури та вологості.

*Розподіл асимілятів:*

- Листки: 40–45 % (до змикання рядків);
- Корінь: 55–60 % (після змикання);
- Цукор: 12–14 % від маси кореня.

### 3.3. Моделі стресової адаптації

*Модель водного стресу*

$$K_s = 1 - (1 - \theta / \theta_{fc}) \times CF$$

де:  $K_s$  – коефіцієнт стресу;  $\theta$  – вологість ґрунту;  $\theta_{fc}$  – польова вологемність;  $CF$  – культурний фактор (0,85–0,95).

*Модель температурної адаптації*

$$f(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{\min} \\ \frac{T - T_{\min}}{T_{\text{opt}} - T_{\min}}, & T_{\min} \leq T < T_{\text{opt}} \\ 1, & T = T_{\text{opt}} \\ \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\text{opt}}}, & T_{\text{opt}} < T \leq T_{\max} \\ 0, & T > T_{\max} \end{cases}$$

$T_{\min} = 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{opt}} = 20\text{--}22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{\max} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

*Індекс селекційної цінності (ISV)*

$$ISV = 0,4 \times U_y + 0,3 \times S_c + 0,2 \times S_t + 0,1 \times A_d$$

де:  $U_y$  – нормована урожайність;  $S_c$  – нормований збір цукру;  $S_t$  – індекс стабільності;  $A_d$  – адаптивність.

### 3.4. Еталонні моделі

Нижче наведено набір еталонних моделей (reference models), які можна безпосередньо інтегрувати у систему оцінювання селекційних матеріалів буряків цукрових для екологічного сортовипробування, з акцентом на варіативність агроекологічних умов навіть у межах однієї зони.

*1) Еталонна статистична модель стабільності / пластичності (Eberhart – Russell)*

Призначення: формально оцінює пластичність ( $b_i$ ) та стабільність ( $S^2 d_i$ ) гібрида на множині середовищ (роки  $\times$  локації  $\times$  підкласер умов).

Вхідні дані: урожайність (або інша підсумкова ознака), індекс сере-

довища  $I_j$  (різниця між середнім врожаєм усіх гібридів у середовищі  $j$  та загальним середнім).

Оцінки:

- Коефіцієнт регресії  $b_i$ : реакція гібрида на покращення або погіршення умов.
- Дисперсія відхилень  $S^2 d_i$ : стабільність відносно лінії регресії.

Критерії інтерпретації:

- $b_i \approx 1$  і низьке  $S^2 d_i$  → стабільний «універсальний» гібрид.
- $b_i > 1$  → пластичний, ефективний у кращих умовах.
- $b_i < 1$  → консервативний, відносно кращий у посушливих або обмежених умовах.

2) *Еталонна модель індексів середовища та мікроекологічної кластеризації*

Призначення: розділяє одну агрокліматичну зону на 3–5 підкластерів («мікроекології») за поєднанням ґрунтових, погодних і технологічних факторів; обчислює  $I_j$  для кожного підкластера.

Вхідні дані: тип ґрунту, запаси вологи / текстура, місцевий терморегіжм і ГТК, агротехнічні елементи (строки сівби, густина, живлення, полив), сенсори рослин і ґрунту.

Вихід: підкластеризована матриця «середовище – ознаки», індекси  $I_j$  для підкластерів; варіаційні параметри ( $\sigma$ ,  $C_v$ ) по підкластерах.

Використання: індекси  $I_j$  входять у модель 1; підкластер слугує рівнем стратифікації для аналізів і рекомендацій.

3) *Еталонна модульна модель ознак (дві компонентні + підсумкова)*

Призначення: генетично та фізіологічно узгоджує внесок компонентних ознак у підсумковій (урожай коренеплодів, вміст цукру, технологічний вихід).

Структура (ієрархічна):

- Модуль А (функціонально-морфологічний): густина, LAI, тривалість активної вегетації, індекси стану листка.
- Модуль В (біохімічно-технологічний): вміст цукрів, домішки, технологічні втрати.
- Підсумкова ознака (Y): урожай коренеплодів, урожай та технологічний вихід цукру. Методика: побудова множинної регресії  $Y = \beta_0 + \sum \beta_k X_k$  та кореляційних матриць на різних етапах онтогенезу; добір мінімальної, але інформативної підмножини предикторів (AIC/BIC, скоригований  $R^2$ ).

Використання: забезпечує прозоре пояснення «чому» гібрид кращий або гірший у певному підкластері умов.

4) *Еталонна динамічна модель росту та продуктивності (щоденний / фенофазний крок)*

Призначення: прогнозує ріст і кінцеву продуктивність на основі енергетики процесів (радіація, тепло, вода, азот) із кроком одна доба або за фенофазами.

Компонування (аналогічно описаним у звіті блок-моделям):

- Радіаційно-тепловий підблок: ФАР, фотосинтез, дихання / старіння.
- Водно-азотний підблок: баланси, транспірація, мінеральне живлення.
- Ріст / перерозподіл біомаси органами.
- Зв'язок з агротехнічними подіями: строки сівби, підживлення, захист.

Вихід: щоденний профіль біомаси / LAI, прогноз урожайності та цукристості; чутливісний аналіз факторів.

Використання: перевірка «гіпотез середовища» для кожного гібрида та підкласстера.

5) *Еталонна модель прийняття рішень (Decision Rules) для добору гібридів*

Призначення: інтегрує результати моделей 1–4 у зрозумілі правила.

Приклад правил (можна реалізувати як SQL/DSL-правила в ПЗ):

- Якщо  $b_i \approx 1$  і  $S^2 d_i \leq$  квантиль 0,25 у  $\geq 2$  підкласстерах  $\rightarrow$  гібрид «якір» (широка рекомендація).
- Якщо  $b_i > 1$  і  $\Delta Y_i$  («покрощене» – «базове»)  $\geq +12\%$  у водозабезпечених / родючих підкласстерах  $\rightarrow$  гібрид «інтенсифікатор» (для інтенсивних технологій).
- Якщо  $b_i < 1$  і  $S^2 d_i$  низьке у «стресових» підкласстерах, а прогноз динамічної моделі  $\geq$  медіани по групі  $\rightarrow$  гібрид «стабілізатор» (для ризикованих умов).
- Якщо  $R^2$  (модуль 3) високий, але динамічна модель показує систематичне не реагування на ключовий фактор (наприклад, N або волога)  $\rightarrow$  умовна рекомендація з обмеженням елемента технології (норма N, строки, густина).

Означена логіка реагування та прийняття рішень повністю відповідає системно-модульному підходу.

6) *Еталонна модель сенсорно-зворотної верифікації (онлайн-оновлення)*

Призначення: постійна перевірка та донавчання моделей 1–4 за новими даними з сенсорів і метеосервера; виявлення систематичних похибок.

Механіка: якщо фактичні показники виходять за довірчі межі прогнозу (наприклад,  $\pm 1,5\sigma$ ) у  $\geq k$  добах/фенофазах, система автоматично:

- тригерить повторну оцінку  $b_i$ ,  $S^2d_i$  на актуальному підкластері;
- оновлює параметри динамічної моделі (водний / азотний під-блок);
- пропонує корекції агроприйомів (живлення, регулювання густоти тощо).

#### *Еталонні сценарії середовищ (шаблони для моделювання)*

S1 «Оптимальне»: своєчасна сівба, ГТК 0,9–1,1, без дефіциту N, відсутній тепловий стрес у критичні фази.

S2 «Водний ліміт»: ГТК 0,6–0,8 у фазі активного наростання листка/кореня, без поливу.

S3 «Тепловий стрес»:  $T_{max} > 32-34$  °C у фазі максимальної асиміляції, епізоди підвищеної VPD.

S4 «Низький вміст N»: обмежена доступність мінерального N у ґрунті, без підживлень.

S5 «Інтенсивна технологія»: оптимізовані строки та густина, збалансоване NPK, можливе зрошення, високий фітосанітарний контроль.

Кожен сценарій застосовується в динамічній моделі та у кластерній оцінці для прогнозів і порівнянь між гібридами.

#### *Мінімальні набори метрик для проходження етапів добору*

1. Попередній скринінг (між підкластерами):  $b_i$ ,  $S^2d_i$ , середній  $Y$ ,  $Cv$ ; відсікання за  $S^2d_i$  та нижнім квантилем  $Y$ .
2. Поглиблена оцінка (динамічні прогнози S1–S5):  $\Delta Y_i$  сценаріїв vs. стандарт, еластичності до вологи / N / тепла, ризик недобору ( $P[Y < \text{поріг}]$ ).
3. Впровадження / рекомендації: відповідність «якір / інтенсифікатор / стабілізатор», карта придатності підкластерів, технологічні налаштування (норма N, густина, строки).

#### *Дані та програмна реалізація*

Статистика: множинна регресія, дисперсійний / кластерний аналіз в Excel / SPSS / Statistica / RTC Mathcad.

Динаміка: щоденний або фенофазний крок; блоки «радіаційно-тепловий», «водно-азотний», «розподіл біомаси».

Цифровізація та фідбек: мережа сенсорів, єдина БД, автоматичне коригування рішень при зміні умов.

### 3.5. Аналіз взаємодій і функціонування системи оцінювання селекційних матеріалів буряків цукрових в екологічному сортовипробуванні

#### 1) Архітектура та потоки даних (що з чим взаємодіє)

Джерела даних → Обробка → Моделі → Рішення

- Польові та лабораторні дані (урожайність, цукристість, біометрія, фенологія) + метео / агрохімія / сенсори (волога, T, NDVI / NDRE) → консолідація в єдину БД. Мета – зняти ефект «однієї зони» і бачити мікроагроекологічні відмінності всередині зони (грунт, ГТК, різні агротехнічні режими в межах господарств).

Кластеризація умов (за ґрунтом, водним режимом, терморезимом, технологією) → формування підкластерів середовищ усередині зони та індексів середовища  $I_j$  (середнє по середовищу – загальне середнє). Сам підхід чітко узгоджений з ідеєю індексів середовищ і міжрічної / між-регіональної варіабельності.

Статистичні моделі:

- множинна регресія / ANOVA / кореляції для відбору найінформативніших ознак і пояснення варіації продуктивності;
- Eberhart – Russell: оцінювання пластичності  $b_i$  і стабільності  $S^2d_i$  гібридів на множині середовищ. Вони безпосередньо використовують  $I_j$  як регресор «якість середовища».

Динамічні моделі (щоденний / фенофазний крок) для прогнозу росту / урожаю за сценаріями води / тепла / N з блочною структурою («радіаційно-тепловий», «водний/азотний», «розподіл біомаси») – відповідає викладеним у звіті принципам побудови й огляду відомих шкіл моделювання (WOFOST, SUCROS, CropSyst, APSIM тощо).

Правила прийняття рішень (decision rules): інтегрують  $b_i$ ,  $S^2d_i$ , результати динамічних симуляцій і кластеризації → рекомендації «де / як вирощувати» (якір / інтенсифікатор / стабілізатор) і налаштування технології під конкретний підкластер умов. Цикл зворотного зв'язку: нові дані сенсорів / урожаїв → перевалідація моделей і корекція рішень. Такий фідбек визначений як вимога до «програмно-апаратного комплексу» цифрової технології.

#### 2) Логіка взаємодій між компонентами

- Кластеризація ↔ E–R модель. Підкластеризація підвищує «чистоту» індексів  $I_j$  (менше шуму від змішаних умов), отже дає

більш інтерпретовані  $b_i, S^2d_i$ . Зв'язка «підкласстер  $\rightarrow I_j \rightarrow b_i/S^2d_i$ » – центральна для ЕСВ.

Статистика  $\leftrightarrow$  Динаміка.

- Статистика описує «що відбулось» (постфактум).
- Динаміка відповідає «чому» і «що буде, якщо...» (причинно-сценарний вимір). Обидві сходяться у блоці рішень: якщо динамічна модель показує підвищену чутливість до води / N, а  $b_i > 1$  – гібрид класифікується як інтенсифікатор у підкласстерах з поливом / вищим родючим фоном.

Сенсори  $\leftrightarrow$  Валідація. Онлайндані виявляють розбіжності між прогнозом і фактом (контроль систематичних похибок). При перевищенні порогів ( $\pm 1,5\sigma$ , умовно) запускається переоцінка коефіцієнтів у регресіях і ретюнінг параметрів динамічної моделі.

3) *Ключові точки керованості (де система реально впливає на результат)*

Вибір підкласстера / місця (мікроекологія в межах зони) – головний важіль стабільності. Згідно з наявними даними, мінливість за 2001–2020 рр. суттєва навіть між сусідніми регіонами; аналогічний ефект існує і всередині зони, що обґрунтовує підкласстеризацію для цілей добору гібридів.

Налаштування технології (строки, густина, N, полив) під конкретний гібрид  $\times$  підкласстер. Це точка дії для динамічних симуляцій і правил рішень.

Сенсорний фідбек (оновлення рішень у сезоні): перерахунок рекомендацій при зміні водного / теплового тиску – запобігання накопиченню систематичної похибки.

4) *Стійкість і ризику (failure modes) та як ними керувати*

Зміщення індексів середовищ ( $I_j$  «з'їжджає», якщо змішати різні мікроекології)  $\rightarrow$  стратифікація даних і контроль якості кластерів.

Перенавчання регресій/моделей (надто багато предикторів, нестабільні  $\beta$ )  $\rightarrow$  скоригований  $R^2$ , AIC/BIC, крос-валідація; мінімальні парсети ознак по фазах органогенезу (модульна модель ознак).

Надійність сенсорів / даних  $\rightarrow$  дублювання каналів, фільтри викидів, валідація проти ручних вимірів; зберігання «сирих» і агрегованих даних для аудиту.

Трансфер між роками (кліматичні зсуви)  $\rightarrow$  сценарії S1–S5 і щорічна recalібрація параметрів; контроль дрейфу через еталонні генотипи-контролі.

5) Чутливісний аналіз і сценарії (як система досліджує «а що, якщо...»)

- Вода / тепло / N – основні сценарні важелі. Динамічна модель варіює ГТК, Tmax / VPD, профіль N і темпи наростання LAI → дає  $\Delta$  урожай /  $\Delta$  цукристість відносно бази для кожного гібрида і підклстера. Це напряму витікає з блочної структури динамічних моделей.

Карта чутливостей: по кожному гібриду – до якого фактору він найчутливіший у цьому підклатері, що узгоджується з концепцією «критичних періодів» та фазової диференціації впливів.

6) KPI та моніторинг якості функціонування

- Метрики моделі: RMSE/MAE прогнозу, скоригований  $R^2$ , стабільність  $b_i/S^2d_i$  між роками / підклатерами.
- Експлуатаційні метрики: частота перерахунків через фідбек, латентність оновлень, частка випадків, коли корекція рішень поліпшила результат щодо базової технології.
- Селекційні метрики: частка гібридів, що перейшли з етапу скринінгу до впровадження; приріст середньої врожайності / технологічного виходу цукру в рекомендованих підклатерах.

7) Валідація та впровадження (цикли PDCA)

- Plan: формуємо підклатери, еталонні сценарії, список гібридів і контрольних стандартів.
- Do: збір даних + первинні оцінки  $b_i/S^2d_i$  + симуляції сценаріїв.
- Check: порівняння прогнозів із фактом; аудити індексів середовищ, регресій і параметрів моделі.
- Act: корекція параметрів, оновлення правил рішень, уточнення підклатерів і сенсорної мережі.

Циклічність та необхідність зворотного зв'язку / самонавчання прямо акцентовані у розділах про цифрову технологію та програмно-апаратний комплекс.

За результатами проведених досліджень сформовано схему потоків взаємодій (dataflow) між компонентами системи: від джерел даних до кластеризації, моделей, прийняття рішень і зворотного зв'язку.

Окрім того додано RACI-матрицю ролей до схеми, яка відображає розподіл відповідальності між селекціонерами, агрономами, аналітиками даних та адміністраторами сенсорної мережі на всіх етапах функціонування системи екологічного сортовипробування.

```
```mermaid
flowchart LR
  subgraph Data[Джерела даних]
    A1[Польові дані: урожайність, цукристість, фенологія]
    A2[Метео та агрохімія]
    A3[Сенсорні дані (волога, Т, NDVI)]
  end

  subgraph Preproc[Кластеризація та підготовка]
    B1[Кластеризація мікроагроекологічних умов]
    B2[Розрахунок індексів середовищ Ij]
  end

  subgraph Models[Моделювання]
    C1[Статистичні моделі: ANOVA, кореляції, множинна регресія]
    C2[Eberhart–Russell: bi та S2di]
    C3[Динамічні моделі росту та урожайності (сценарії S1–S5)]
  end

  subgraph Decision[Прийняття рішень]
    D1[Інтеграція результатів моделей]
    D2[Класифікація гібридів (якір / інтенсифікатор / стабілізатор)]
    D3[Формування рекомендацій по підкластерах]
  end

  subgraph Feedback[Зворотний зв'язок]
    E1[Онлайн-валідація через сенсори]
    E2[Переоцінка моделей при відхиленнях]
  end

  A1 --> B1
  A2 --> B1
  A3 --> B1
  B1 --> B2 --> C2
  B2 --> C1
  C1 --> D1
  C2 --> D1
  C3 --> D1
  D1 --> D2 --> D3
  D3 --> E1 --> E2 --> C1
  E2 --> C2
  E2 --> C3
```
---
```

## **Переваги сценарних моделей S<sub>1</sub>–S<sub>5</sub> у системі екологічного сортовипробування**

Сценарні моделі – це цифрові моделі, які відтворюють реакцію гібридів на різні режими вирощування: від обмежувальних до максимально ресурсних.

Вони дають змогу не просто порівнювати гібриди, а створювати прогноз їхньої поведінки в конкретних виробничих умовах.

**1. S<sub>1</sub> – Стресовий сценарій** (мінімальна волога, низьке забезпечення N, високі температурні коливання)

*Переваги:*

- дає змогу визначити, які гібриди витримують критичні стреси, характерні для посушливих років;
- показує корінну стійкість до водного дефіциту, перегріву та поганих стартових умов;
- допомагає відібрати матеріал для зон ризикованого землеробства;
- формує розуміння мінімально гарантованого рівня врожаю навіть у гірші роки.

**2. S<sub>2</sub> – Водно-обмежений сценарій** (помірний дефіцит вологи, нерівномірний розподіл опадів).

*Переваги:*

- Дає змогу оцінити, які гібриди ефективно використовують доступну воду.
- виявляє матеріали з оптимальним співвідношенням «вегетативна маса – коренеплід».
- показує, як рослина реагує на періодичні, а не постійні стреси – реалії більшості років.
- допомагає обґрунтувати ефективність часткових агротехнологічних заходів (мульчування, ранній обробіток, зміна густоти).

**3. S<sub>3</sub> – Оптимальний сценарій** (середні умови, стандартне удобрення, природне зволоження).

*Переваги:*

- дає змогу оцінити реальний потенціал продуктивності без стресів;
  - показує стабільність гібрида у типовому для регіону сезоні;
  - формує основу для порівняльної реєстраційної оцінки;
  - дає змогу прогнозувати врожай у «середньостатистичний рік».
-

**4. S<sub>4</sub> – Підвищений ресурсний сценарій** (збільшені дози N, покращене живлення, оптимізована агротехніка).

*Переваги:*

- виявляє гібриди, здатні відгукуватися на інтенсифікацію технології;
- показує, які гібриди ефективно конвертують добрива у врожай, а які лише збільшують вегетативну масу;
- допомагає визначити економічний поріг доцільності підвищених доз добрив;
- дає змогу прогнозувати, чи варто застосовувати прецизійне диференційоване живлення.

**5. S<sub>5</sub> – Інтенсивний сценарій** (високий рівень ресурсів, оптимальний режим зволоження або зрошення, повна система захисту).

*Переваги:*

- дає змогу визначити максимальний генетичний потенціал гібрида;
- є основою для добору гібридів для високотехнологічних господарств та підприємств із зрошенням;
- дає змогу оцінити верхню межу продуктивності у найкращих можливих умовах;
- формує можливість моделювати економічну ефективність інтенсивної технології.

### **Загальні переваги системи сценарних моделей S<sub>1</sub>–S<sub>5</sub>**

- Дає змогу оцінювати гібриди не лише за фактом, а й за потенціалом. Не просто «який гібрид кращий», а який гібрид кращий для певних умов.
  - Дозволяє персоналізувати рекомендації типу конкретне поле, конкретна технологія, конкретний рівень забезпечення ресурсами.
  - Формує 5-рівневу шкалу ризику й продуктивності, що зручно для агрономів і керівників господарств.
  - Забезпечує базу для інтерактивних карт придатності. Кожен район або геозона можуть бути прив'язані до свого сценарію.
  - Працює як «технологічний симулятор». Дає змогу прогнозувати результат до того, як внесено добрива, оцінити ефективність зміни густоти, строків сівби, системи захисту, розрахувати економічну доцільність.
-

Також визначено RACI-матрицю ролей у функціонуванні системи екологічного сорто випробування (табл. 7).

Сформована RACI-матриця відображає розподіл відповідальності між ключовими учасниками системи – селекціонерами, польовими агрономами, аналітиками даних і адміністраторами сенсорної мережі.

Таблиця 7

**RACI-матриця ролей у функціонуванні системи екологічного сорто випробування**

| Етап / Компонент                       | Селекціонер | Агроном (польові роботи) | Аналітик даних | Адміністратор сенсорів |
|--|-------------|--------------------------|----------------|------------------------|
| Збір польових даних                    | A           | R                        | C              | I                      |
| Збір метео / агрохімічних даних        | C           | R                        | A              | I                      |
| Збір сенсорних даних                   | I           | C                        | C              | A/R                    |
| Кластеризація умов, розрахунок $I_j$   | C           | I                        | A/R            | I                      |
| Статистичний аналіз                    | C           | I                        | A/R            | I                      |
| Eberhart – Russell                     | C           | I                        | A/R            | I                      |
| Динамічне моделювання                  | C           | I                        | A/R            | I                      |
| Інтеграція результатів та класифікація | A/R         | C                        | A/R            | I                      |
| Формування рекомендацій                | A           | C                        | R              | I                      |
| Сенсорна валідація, переоцінка моделей | C           | I                        | A/R            | A/R                    |
| Оновлення технологічних рішень         | A           | R                        | C              | I                      |

**Позначення:** R – Responsible (виконує роботу); A – Accountable (відповідає за результат); C – Consulted (надає експертизу, погодження); I – Informed (поінформований).

Основні компоненти бази даних та їх взаємодії в системі оцінювання гібридів буряків цукрових узагальнено в таблиці 8.

Таблиця 8

**Основні компоненти бази даних та їх взаємодії**

| Компонент БД                 | Що містить  | Взаємодія з іншими компонентами  |
|------------------------------|---|--|
| 1                            | 2   | 3  |
| 1. Польові дані (Field Data) | Урожайність, цукристість, біометричні показники, дата проведення дослідів | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Передаються у модуль статистичного аналізу</li> <li>• Використовуються у моделях <math>b_n</math>, <math>S^2d_i</math></li> <li>• Корелюють з індексами середовища</li> </ul> |

## Продовження таблиці 8

| 1   | 2   | 3   |
|---|---|---|
| 2. Метеорологічні дані (Weather DB)                   | Температура, опади, ГТК, радіаційний баланс, вологість ґрунту   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Формують індекс середовища <math>I_j</math></li> <li>• Впливають на сценарні моделі <math>S_1-S_5</math></li> <li>• Порівнюються з поведінкою гібридів у кожному році</li> </ul>     |
| 3. Ґрунтові дані (Soil DB)                            | Тип ґрунту, рН, гумус, гранулометрія, вміст NPK                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Входять у кластеризацію середовищ</li> <li>• Використовуються для прогнозу реакції гібридів</li> <li>• Взаємодіють із метеоданими при формуванні <math>I_j</math></li> </ul>         |
| 4. Дані сенсорів (Sensor Data)                        | Оптичні сенсори, флуоресценція хлорофілу, ЕС, вологість         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Забезпечують оцінку стану рослин у реальному часі</li> <li>• Уточнюють прогноз сценаріїв <math>S_1-S_5</math></li> <li>• Порівнюються з фактичними польовими результатами</li> </ul> |
| 5. Інформація про гібриди (Hybrid DB)                 | Генотип, походження, опис, характеристики, попередні результати | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Використовується при оцінюванні стабільності</li> <li>• Пов'язана з польовими та сенсорними даними</li> <li>• Є ключем у всіх моделях реакції</li> </ul>                             |
| 6. Кластеризація мікроекологій (Environment Clusters) | Виділені групи середовищ за ґрунтом, кліматом і агротехнікою    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Формує основу для розрахунку індексу <math>I_j</math></li> <li>• Пов'язує всі середовищні дані</li> <li>• Використовується для карт придатності</li> </ul>                           |
| 7. Моделі стабільності та реакції (Model DB)          | $b_i, S^2d_i$ , індекс середовища, регресійні моделі            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Приймають дані з Field DB, Weather DB, Soil DB</li> <li>• Входять у модуль рекомендацій</li> <li>• Зв'язуються зі сценарними моделями</li> </ul>                                     |
| 8. Сценарні моделі $S_1-S_5$                          | Стресовий → інтенсивний сценарій розвитку умов                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Використовують результати моделей стабільності</li> <li>• Прогнозують урожайність за типом технології</li> <li>• Інтегруються в картографічний модуль</li> </ul>                     |
| 9. Картографічний модуль (GIS DB)                     | Кarti придатності, мікрозони, інтерактивні шари                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Отримує дані з кластеризації та моделей</li> <li>• Відображає рекомендовані гібриди для кожної зони</li> </ul>   |
| 10. Модуль рекомендацій (Decision Support)            | Алгоритми добору гібридів та технологій                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Узагальнює всі компоненти БД</li> <li>• Формує кінцеві рекомендації</li> </ul>   |

*Наукове видання*

*Автори:*

**М. В. Роїк, О. І. Присяжнюк, В. О. Рибак,  
Л. Г. Грицишина, В. І. Власюк, Л. С. Андреева,  
Р. В. Кубряк, Д. Б. Борисов**

**МЕТОДИКА  
ДИДЖИТАЛІЗАЦІЇ ТА ОЦІНЮВАННЯ  
СЕЛЕКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ БУРЯКІВ ЦУКРОВИХ  
В ЕКОЛОГІЧНОМУ СОРТОВИПРОБУВАННІ**

**Науково-методичні рекомендації**

Електронне видання

*Технічне редагування та верстка*  
О. Ю. Половинчук

Погоджено до опублікування 11.12.2025.  
Формат: PDF. Гарнітура Georgia.

**Видавець**

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

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 5713 від 19.10.2017





