

О. І. Присяжнюк,  
М. О. Черняк,  
В. В. Мусіч,  
Н. О. Кононюк,  
О. П. Шевченко,  
О. Ю. Половинчук,  
С. М. Шклярук,  
Е. Е. Навроцька,  
О. В. Копитов,  
М. В. Марків,  
Є. В. Боюн,  
В. В. Слободянюк,  
Б. М. Борисенко,  
О. В. Лук'янчук,  
В. І. Коваль

# ЦИФРОВА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОЩУВАННЯ БУРЯКІВ ЦУКРОВИХ

НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ  
РЕКОМЕНДАЦІЇ

КИЇВ 2025





НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР І ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ

**О. І. Присяжнюк, М. О. Черняк, В. В. Мусіч,  
Н. О. Кононюк, О. П. Шевченко, О. Ю. Половинчук,  
С. М. Шклярук, Е. Е. Навроцька, О. В. Копитов,  
М. В. Марків, Є. В. Боюн, В. В. Слободянюк,  
Б. М. Борисенко, О. В. Лук'янчук, В. І. Коваль**

## **ЦИФРОВА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОЩУВАННЯ БУРЯКІВ ЦУКРОВИХ**

**Науково-методичні рекомендації**

**Київ • 2025**

УДК 631.58:004.738

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

*Рецензенти:*

**О. М. Ганженко**, доктор с.-г. наук, с. н. с.;

**С. О. Ременюк**, кандидат с.-г. наук, с. н. с.

*Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН*

**Присяжнюк О. І., Черняк М. О., Мусіч В. В., Кононюк Н. О., Шевченко О. П., Половинчук О. Ю., Шклярчук С. М., Навроцька Е. Е., Копитов О. В., Марків М. В., Боюн Є. В., Слободянюк В. В., Борисенко Б. М., Лук'янчук О. В., Коваль В. І.** Цифрова технологія вирощування буряків цукрових: науково-методичні рекомендації / НААН України, Ін-т біоенергет. культ. і цукр. буряків. Електрон. вид. Київ : ІБКІЦБ НААН, 2025. 38 с.

ISBN 978-617-8706-24-1 (PDF)

Узагальнено результати наукових досліджень і практичні підходи до формування цифрової технології вирощування буряків цукрових. Розкрито особливості взаємодії цифрових елементів технології, наведено еталонні моделі та сценарії функціонування модулів системи з урахуванням агробіологічних, сенсорних і геопросторових даних. Подано оцінку агротехнічної, економічної та екологічної ефективності впровадження цифрових рішень, обґрунтовано їх вплив на підвищення врожайності, оптимізацію використання ресурсів і зниження виробничих витрат.

Рекомендації призначено для фахівців аграрного сектору, науковців, аспірантів та студентів закладів вищої освіти.

**УДК 631.58:004.738**

**ISBN 978-617-8706-24-1 (PDF)**

© Інститут біоенергетичних культур  
і цукрових буряків НААН, 2025

© Колектив авторів, 2025

## ЗМІСТ

<b>Вступ .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Особливості взаємодії цифрових елементів технології вирощування буряків цукрових .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Еталонні моделі та сценарії взаємодій функціонування модулів цифрової технології вирощування буряків цукрових .....</b>	<b>25</b>
2.1. Еталонні моделі технології вирощування буряків цукрових .....	25
2.2. Взаємодія модулів цифрової технології .....	28
<b>3. Ефективність застосування цифрових технологій у вирощуванні буряків цукрових .....</b>	<b>33</b>
<b>Список використаних джерел .....</b>	<b>37</b>

## Вступ

Сучасні технології вирощування сільськогосподарських культур орієнтовані на забезпечення фізіологічних потреб рослин в основних факторах живлення з метою формування високопродуктивних посівів, що зумовлює інтенсивне накопичення сухої речовини та підвищення рівня врожайності. Для буряків цукрових технологічні помилки є особливо затратними, оскільки загальні витрати на вирощування культури становлять у середньому 25–40 тис. грн/га. За таких умов подальше підвищення врожайності буряків цукрових неможливе без оптимізації всіх елементів технології вирощування та оперативної корекції стратегії ведення посівів, а відповідно й агротехнічних заходів, упродовж вегетаційного періоду.

Постійний розвиток інформаційних технологій створює передумови для більш повного й точного впровадження комп'ютерних рішень у сільське господарство. Водночас зі зростанням кількості враховуваних факторів та ускладненням електронних пристроїв істотно підвищується складність аналізу отриманих даних і формування обґрунтованих висновків щодо стану рослин. У зв'язку з цим для створення систем автоматизованого прийняття рішень у технології вирощування буряків цукрових виникає потреба інтеграції всіх наявних датчиків аналізу умов вирощування та стану рослин у єдину цифрову технологію.

Провідні наукові установи світу та більшість великих аграрних компаній у своїй діяльності використовують спеціалізовані програмні продукти, що тією чи іншою мірою поєднують математичні моделі опису та прогнозування результатів вирощування сільськогосподарських культур із даними про фактичний стан рослин. Водночас комплексні цифрові технології вирощування, здатні забезпечити максимальну оптимізацію технологічного процесу, практично відсутні. Переважна більшість програм здійснює оцінювання за певними математичними моделями, не враховуючи оперативної інформації, а основна маса закордонних технологій адаптована виключно до ґрунтово-кліматичних умов країни-розробника.

Таким чином, спільними недоліками наявних цифрових технологій вирощування рослин є:

– неповна цифровізація та потреба в значних обсягах ручної праці під час заповнення довідкової інформації, введення даних з датчиків і приладів;

---

- відсутність єдиного інтерфейсу для отримання інформації з різноманітних датчиків, приладів експрес-діагностики, метеостанцій тощо;
- висока вартість закордонного обладнання;
- відсутність уніфікованої інформації про ріст і розвиток рослин та їх потреби у факторах живлення станом на конкретну добу, тоді як більшість електронних пристроїв фіксує стан рослин лише в окремий момент часу без урахування їх фізіологічних потреб;
- вузька спеціалізація й низька гнучкість окремих датчиків і приладів (визначення щільності ґрунту, вологості, стану фотосинтетичного апарату, погодних умов тощо), що унеможливує прийняття обґрунтованих агрономічних рішень без комплексного аналізу супутньої інформації;
- відсутність доступних відомостей щодо точності конкретних моделей мобільних датчиків і приладів діагностики стану рослин.

Наукове розв'язання цієї проблеми із застосуванням математичних і цифрових моделей широко реалізується в багатьох країнах світу, зокрема в Нідерландах (м. Вагенінген, Інститут CPRO, AGROBASE Generation II™), Канаді (Department of Plant Agriculture, University of Guelph), Мексиці (International Maize and Wheat Improvement Centre – CIMMYT), а також в Україні (Селекційно-генетичний інститут НААН, м. Одеса; Інститут рослинництва НААН, м. Харків).

## 1. Особливості взаємодії цифрових елементів технології вирощування буряків цукрових

Точне землеробство – це виробнича система, яка сприяє швидкій зміні та адаптації технології вирощування в межах поля відповідно до умов, що склалися. Ця система заснована на нових інструментах і джерелах інформації, які забезпечують сучасні технології. До них належать глобальна система позиціонування (GPS), географічні інформаційні системи (GIS), пристрої моніторингу врожайності, датчики ґрунту, рослин і шкідників, дистанційне зондування та технології змінної швидкості для сівалок, оприскувачів тощо. Також до точного землеробства можна віднести програмне забезпечення та дрони – які допомагають не лише в картографуванні чи визначенні стану рослин, а й в обробці посівів уже в промислових масштабах [1–6].

Швидкість впровадження технологій точного землеробства значно відрізняється від країни до країни та регіону до регіону. Зокрема, в Сполучених Штатах Америки найвищий рівень впровадження точного землеробства для вирощування кукурудзи та сої було виявлено в регіоні Середнього Заходу, тоді як найнижчий рівень – уздовж Південного узбережжя [7–10].

Поширення різних технологій також відрізняється, і лише у двох країнах, США та Канаді, рівень застосування змінних норм внесення добрив і моніторингу врожайності (з використанням головним чином GPS та GIS) перевищує 5 %. В Австралії, Бразилії, Данії, Великобританії та Німеччині рівень впровадження коливається від 1 до 5 %, тоді як ці дві технології станом на 2000 рік були невідомі в Азії та Африці, за винятком деяких країн [11].

У США найчастіше використовується змінна норма внесення добрив на основі відбору проб ґрунту. Моніторинг урожайності та картування врожайності є другою групою запроваджених на практиці технологій [11, 12].

Дистанційне зондування, а також висівання насіння та внесення пестицидів зі змінною нормою складають менше 1 % технологій точного землеробства на всіх фермах. Однак, ураховуючи лише ферми, які використовують технології точного землеробства, частка впровадження дистанційного зондування зростає до 13,2 % [13].

Використання просторових зображень у сільському господарстві для управління врожаєм було відомо ще в 1929 році, коли аерофотознімки використовувалися для картографування ґрунтових ресурсів.

Дистанційне зондування для оцінки стану посівів базується на взаємозв'язку між багатоспектральним відбиттям, температурою рослинного покриву, фотосинтезом і випаровуванням.

Bauer M. E. [14] вперше застосував техніку поєднання спектральних даних з метеорологічними даними, ґрунтами та іншими параметрами сільськогосподарських культур для моделювання росту та врожайності сільськогосподарських культур.

Jackson R. D. [15] запропонував чотири основні вимоги до систем дистанційного зондування: часте покриття, швидка доставка даних, просторова роздільна здатність 5–25 м та інтеграція з метеорологічними та агрономічними даними в експертні системи.

Hatfield J. L. та Pinter P. J. [16] описали дистанційне зондування стресу посівів, спричиненого бур'янами, хворобами, комахами, водою, морозом і температурою ґрунту.

Moran, Inoue та Barnes [17] розглянули можливості та обмеження даних дистанційного зондування для точного управління культурами. На основі систем Precision Crop Management вони визначили вісім областей, де зображення дистанційного зондування можуть надати відсутню інформацію. Вони стосуються зонального управління, прогнозування врожайності, картографування типу ґрунту, сезонних коливань, виробництва цифрових моделей рельєфу, аерофотознімків для контролю пошкоджень тощо [18–20].

Хоча потенціал дистанційного зондування для сільського господарства добре задокументований, його застосування фермерами залишається обмеженим. Незважаючи на тривале використання GPS та ГІС, дистанційне зондування досі рідко застосовується на малих фермах.

Для визначення потреб у адаптації виконавчих механізмів і датчиків до єдиної цифрової технології вирощування буряків цукрових доцільно проаналізувати класичну технологічну карту їх вирощування (табл. 1).

Таблиця 1

**Агротехнічні операції по вирощуванню буряків цукрових та потреба супроводу їх цифровими технологіями**

№ з/п	Назва операції	Точність GPS сигналу	Потреба в цифровій карті поля, побудові траєкторії руху	Потреба запису інформації	Тип інформації, що записується
1	2	3	4	5	6
1	Навантаження мінеральних добрив	Не потрібен	Немає	Інформація про виконання, за потреби контроль пального та трекінг	Виконання, площі, норма, обсяги, якість роботи, трекінг руху, витрата пального

## Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6
2	Підвезення мінеральних добрив	Не потрібен	Немає	«-»	Виконання, трекінг, контроль пального
3	Внесення мінеральних добрив	До 15 см	Потрібна	є	Виконання, площі, норма, обсяги, якість роботи, трекінг руху, витрата пального
4	Лущення стерні	До 15 см	Потрібна	є	
5	Глибока оранка	До 15 см	Потрібна	є	
6	Підвезення аміачної води	Не потрібен	Немає	Інформація про виконання, за потреби контроль пального та трекінг	Виконання, трекінг, контроль пального
7	Внесення аміачної води в ґрунт	До 15 см	Потрібна	є	Виконання, площі, норма, обсяги, якість роботи, трекінг руху, витрата пального
8	Вирівнювання ґрунту	До 15 см	Потрібна	є	
9	Передпосівна культивуація	До 15 см	Потрібна	є	
10	Підвезення мінеральних добрив та насіння	Не потрібен	Немає	Інформ. про викон., за потреби контроль пального та трекінг	Виконання, трекінг, контроль пального
11	Завантаження сівалки насінням	Не потрібен	Немає	«-»	Виконання
12	Сівба насіння	РТК	є	є	Виконання, площі, обсяги, норма висіву, якість роботи, трекінг руху, витрата пального
13	Підвезення води	Не потрібен	Немає	Інф-ція про виконання, за потреби контроль пального та трекінг	Виконання, трекінг, контроль палива
14	Обробка посівів гербіцидами на 7 і 14 день після сівби. Інсектициди вносяться в баковій суміші за потреби	РТК	є	є	Виконання, площі, обсяги, якість роботи, трекінг руху, витрата палива
15	Дистанц. спост. за станом посівів, супутник або БПЛА (кратність відповідно до потреби)	РТК	є	є	«-»

Продовження таблиці 1					
1	2	3	4	5	6
16	Навантаження мінеральних добрив (карбамід)	Не потрібен	Немає	Інформація про виконання, за потреби контроль пального та трекінг	Виконання, трекінг, контроль пального
17	Підвезення мінеральних добрив (карбамід)	Не потрібен	Немає		
18	Підвезення води	Не потрібен	Немає		
19	Позакореневе підживлення посівів: карбамід + мікродобриво	РТК	є	є	Виконання, площі, обсяги, якість роботи, трекінг руху, витрата палива
20	Підвезення води	Не потрібен	Немає	Інформація про виконання, за потреби контроль пального та трекінг	Виконання, трекінг, контроль пального
21	Приготування і внесення фунгіциду + інсектициду та ще одна обробка повторно через 20 днів лише фунгіцидом	РТК	є	є	Виконання, площі, обсяги, якість роботи, трекінг руху, витрата пального
22	Збирання	РТК	є	є	Виконання, площі, обсяги, урожайність, якість роботи, трекінг руху, витрата палива

Отже, першочергово для використання в цифровій технології вирощування буряків цукрових слід виділити такі компоненти системи:

- *Електронна система запису даних* з можливістю побудови цифрових карт та карт завдань.
- *Сучасна цифрова сівалка*, здатна збирати численні параметри під час сівби буряків цукрових.
- *Трактори та обприскувачі* (у разі використання автономних агрегатів), обладнані системою навігації та системою паралельного водіння з прийманням РТК-сигналу та роботою за картами завдань.
- *Бурякозбиральний комбайн*, оснащений мінімально системою навігації з прийманням РТК-сигналу та датчиками обліку врожайності.

При цьому не згадуються такі компоненти цифрової системи, як супутниковий моніторинг або використання дронів для моніторингу поля чи внесення засобів захисту. Останнє особливо актуально після змикання листкової поверхні буряків у міжряддях – для пізніх фунгіцидних обробок у разі відсутності окремих технологічних колій для проходу обприскувача.

Вважається цілком правомірним, що технології супутникового аналізу та застосування дронів уже включають всі необхідні елементи точного землеробства: просторову орієнтацію щодо поля, а також можливості комунікації з доступними системами та програмним забезпеченням. Тому, якщо господарство використовує цей сегмент, не слід турбуватися про несумісність із іншими технологіями. У випадку тракторів система орієнтації в просторі та паралельного водіння є опцією, а у комбайнів датчики обліку врожаю також можуть бути опціональними і не завжди доступні як коробкове рішення.

Таким чином, визначено мінімально необхідний обсяг технічних рішень, причому деякі з них, зокрема електронна система запису даних з можливістю побудови цифрових карт та карт завдань, можна замінити простими, некомерційними системами, адаптуючи їх під конкретні потреби господарства.

*Використання загальнодоступних технологій, таких як Google Maps, та спеціалізованих програмних додатків для супроводу цифрової технології вирощування буряків цукрових.*

Зазвичай програми точного землеробства поширюються за підпискою або продаються як комерційний продукт, що цілком закономірно, оскільки будь-яка технологія потребує витрат на її створення та подальше підтримання.

Водночас для визначення площі поля, ведення робіт на ньому та фіксації базових агротехнічних операцій у процесі росту й розвитку буряків цукрових можна використовувати загальнодоступні сервіси, такі як Google Maps. Для роботи з цим сервісом необхідно мати обліковий запис у системі Google, після чого слід перейти на вкладку Google My Maps та створити власну карту. Рекомендується використовувати шар «Супутник», оскільки він є найбільш інформативним для візуальної прив'язки до наявних координат полів, лісосмуг, інших зелених насаджень, польових доріг та водойм (рис. 1).

Якщо планується використовувати інші типи карт (не супутникову зйомку), їх прив'язка до місцевості потребує вручну визначених GPS-координат. Для цього необхідно безпосередньо перебувати на полі або об'їхати його на технічному засобі зі встановленим GPS-приймачем та зафіксувати координати для внесення в Google Maps. Цей метод може

забезпечити більшу точність, враховуючи періодичність оновлення Google Maps та можливу відсутність на них актуальної інформації, проте вимагає проведення додаткових польових обстежень.



**Рис. 1. Базова початкова карта з полем (с. Ксаверівка друга, ДПДГ «Саливінківське» ІБКіЦБ НААН)**

Після створення цифрового варіанту координат поля можна переходити до наступних етапів: визначення його розмірів, додавання координат та формування інших робочих шарів карти. Першим кроком, для визначення кількості необхідних вимірювань, є визначення площі поля за допомогою інструментів Google Maps (рис. 2).

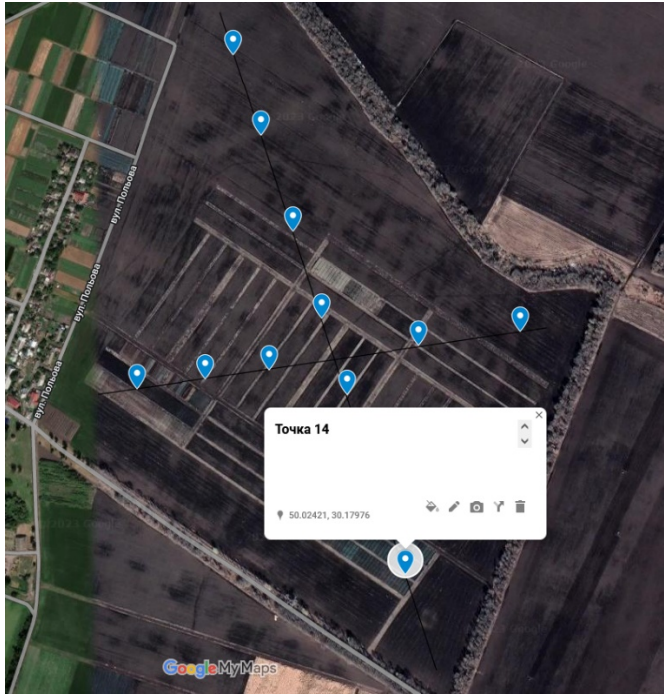
Після визначення загальної площі поля можна приступати до встановлення необхідної кількості точок для взяття агрохімічних проб як на всьому полі, так і на його окремих структурних елементах, а також до формування інших шарів і карт завдань.



**Рис. 2. Вимірювання площі поля інструментами Google Maps (с. Ксаверівка друга, ДП ДГ «Саливінківське» ІБКІЦБ НААН)**

Для цього на Google Maps створюють шар даних, на якому відображені дві діагональні лінії для розміщення проб ґрунту. У ручному режимі, із заданим кроком, точки розташовують максимально близько до цих ліній. Кожна точка має власні координати, що дозволяють її ідентифікувати безпосередньо на місцевості під час взяття проб (рис. 3).

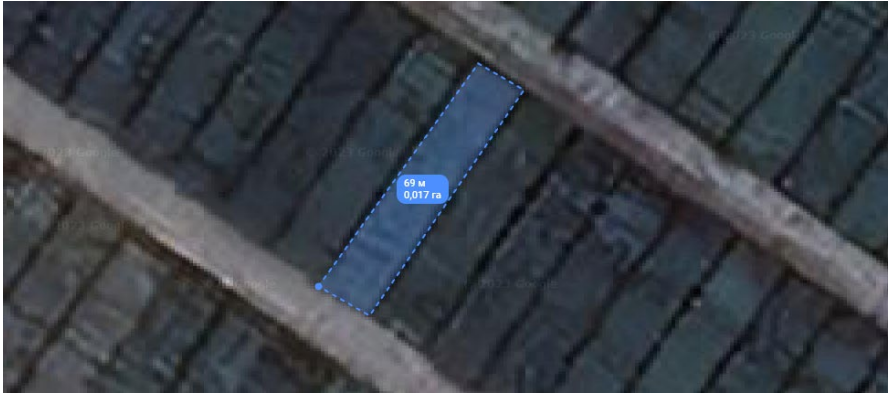
Після виконання підготовчих робіт можна переходити до безпосередніх вимірювань у точках, зафіксованих на карті. Вимірювання можна проводити як у ручному режимі – із записуванням координат за допомогою планшета або смартфона в GPS-приймач, так і в автоматизованому режимі шляхом експорту файлів KMZ або KML, які містять дані про місцезнаходження заданих точок на Google Maps, або через інтеграцію файлів CSV (формат, у якому поля даних відокремлюються комами, а нові рядки позначають кінець запису).



**Рис. 3. Розбивка площі поля для відбору проб аналізу ґрунту інструментами Google Maps (с. Ксаверівка друга, ДП ДГ «Саливінківське» ІБКіЦБ НААН)**

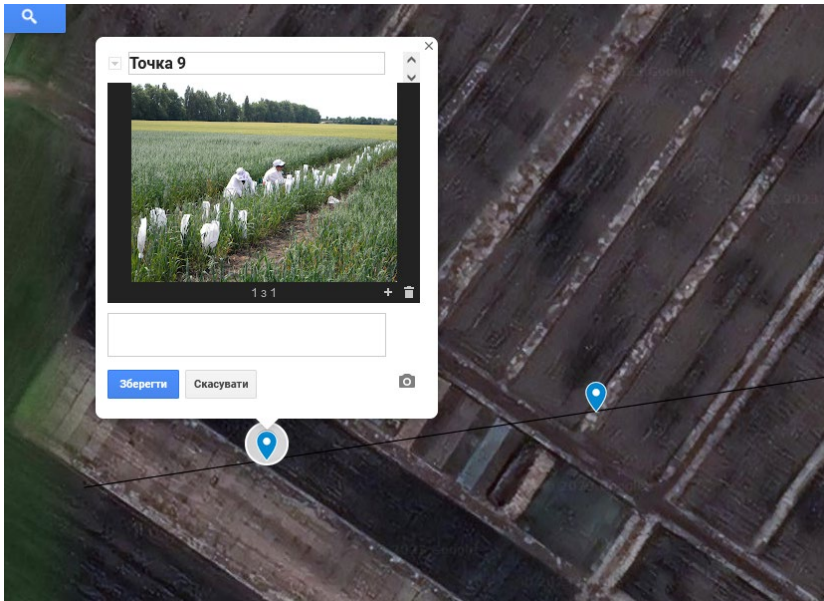
Роздільна здатність Google Maps достатня для ведення ділянок експериментальних посівів із шириною та довжиною від 3 м і більше. Для виробничого використання на полях площею понад 10 га цей інструмент є зручним і забезпечує високий рівень точності (рис. 4).

Після отримання проб та визначення агрохімічних показників ґрунту можна занести результати в опис відповідних точок. Використовуючи смартфон або планшет із Google Maps, стає можливим постійний аналіз отриманої інформації під час спостережень за ростом і розвитком рослин на полі.



**Рис. 4. Роздільна здатність інструментарію Google Maps**

До кожної точки даних можна додавати додаткову інформацію та файли, розміщені на Google Диску, а також створювати нові точки, на яких фіксують стан рослин або стан виконання агротехнічних операцій (рис. 5).



**Рис. 5. Приклад використання Google Maps для опису спостережень під час вегетації та якості виконання агротехнічних операцій**

Робота з цифровими картами не обмежується визначенням координат поля чи окремої ділянки, а може здійснюватися також у рамках щоденної агрономічної практики. Використання карт дає змогу надавати доступ до створених шарів іншим членам колективу, тим самим накопичуючи інформацію зі спостережень на якісно новому рівні. Хоча загальнодоступні сервіси не замінюють інструментарію аналітики, доступного в профільних програмах точного землеробства, використання таких інструментів, як Google Maps, дозволяє розширити можливості фіксації інформації, спрощує її подальший аналіз та планування досліджень на наступний рік.

Важливим аспектом комунікації в цифровій технології вирощування буряків цукрових є використання даних про стан рослин для подальшої обробки їх засобами захисту та добривами. У зв'язку з цим було проведено дослідження вегетаційних індексів буряків цукрових на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків, с. Ксаверівка Друга, Київська область (ДП ДГ «Саливківське» ІБКіЦБ НААН). Спостереження здійснювали за допомогою дрона DJI Mavic 3M Multispectral, оснащеного мультиспектральною камерою для зйомки в діапазонах Near Infrared (NIR, 860 nm), Red Edge (RE, 730 nm), Red (R, 650 nm), Green (G, 560 nm), а також RGB-камерою видимого спектру (рис. 6).



**Рис. 6. Вегетаційний індекс буряків цукрових станом на 15.09.2023**  
(поле буряків цукрових розташоване в синьому овалі)

Також у 2024 році було проведено оцінювання вегетаційних індексів буряків цукрових з використанням даних супутника Sentinel-2.

За аналогічною методикою оцінювання кольорове відображення даних відрізняється лише зворотною шкалою, де зелений колір відповідає максимальному значенню (рис. 7).



14 серпня



19 серпня



27 серпня



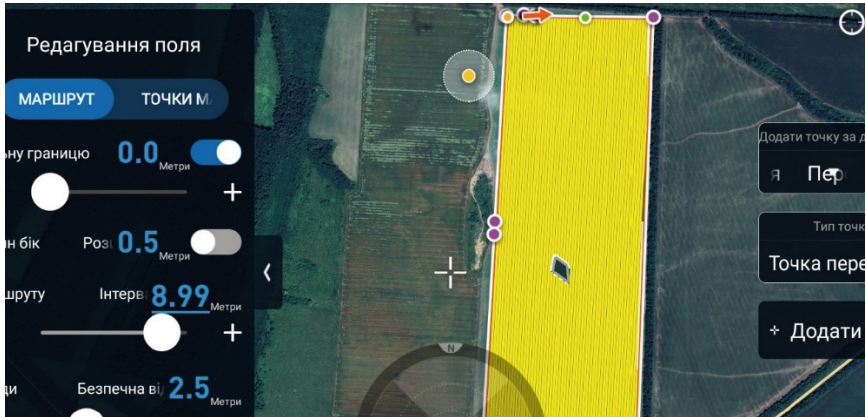
8 вересня

**Рис. 7. Вегетаційний індекс буряків цукрових у другій половині вегетації 2024 року**

Система зафіксувала чіткі зміни вегетаційних індексів із значним їх падінням: станом на 14 серпня NDVI становив 0,82, 19 серпня – 0,72, 27 серпня – 0,47, а 8 вересня – 0,31. Таким чином, проблема була виявлена електронною системою діагностики на ранніх етапах, що дає змогу агрономічній службі вчасно відреагувати.

Отримана інформація дає змогу оцінити стан рослин і прийняти обґрунтовані рішення щодо подальшого застосування агротехнічних заходів: підживлення, удобрення, захист від шкідників і хвороб тощо.

Надалі зібрані цифрові дані можуть використовуватися для побудови карт завдань із внесення засобів захисту за допомогою дрона-оприскувача типу DJI Agras T59/25 (рис. 8).



**Рис. 4.8. Приклад побудови карти завдання для дрона-оприскувача типу DJI Agras T59/25**

Після побудови карт завдань дрон, використовуючи дані RTK-сигналу, виконує внесення пестицидів або добрив на посівах буряків цукрових. Складність застосування карт завдань, створених у системі Google Maps, для роботи іншої сільськогосподарської техніки полягає в необхідності їх перетворення та фактичного ручного перенесення в комп'ютери тракторів або інших технічних засобів.

Також доцільно оцінити потреби агротехнічних операцій у використанні автоматизованих карт завдань із подальшим накладанням шарів та їх інтеграцією з іншими файлами даних (табл. 2). У ситуації, коли завдання спроектовано та його потрібно завантажити в пристрій, витрати часу одні, тоді як отримання результатів вимірювань із пристроєм та їх прив'язка до карти поля потребують значно більших витрат часу на виконання неавтоматизованих рутинних операцій.

Отже, для мінімальної роботи всіх без виключення розумних агротехнічних засобів достатньо мати координати площі поля для введення їх в інтерфейс мікропрограмного забезпечення енергетичного шасі. Проте за таких умов складно використовувати дані, отримані під час внесення засобів захисту, добрив, а особливо показники врожайності, оскільки ці дані формуються у вигляді лінійної інформації в режимі реального часу з датчиків виконавчих механізмів.

Таблиця 2

**Потреба в автоматизованих картах завдань із подальшим накладанням шарів та інтеграцією з іншими файлами даних**

Агротехнічна операція	Дані, яких потребує агрегат, та/або генерує їх у процесі роботи	Взаємодія з базою даних
Культивація, плоско-різний обробіток, дискування, луцення, боронування, оранка, передпосівний обробіток ґрунту	Карта поля, бажано з побудовою схеми руху агрегату. Проте остання може будуватись мікро-програмним забезпеченням виконуючих пристроїв	Лише отримання інформації
Внесення добрив	Карта поля з даними вмісту елементів живлення (для диференційованого внесення). Схема руху опціонально	Зворотна інформація про обсяги застосування добрив, супутні показники
Сівба	Карта поля	Зворотна інформація про якість сівби та супутні показники (щільність ґрунту, вологість тощо)
Обприскування посівів	Карта поля, опціонально з даними стану рослин та поширення бур'янів, шкідників та хвороб	Зворотна інформація про норму застосування та погодні умови, що впливають на ефективність препарату (точка роси, вітер, сонячна інсоляція)
Збирання врожаю	Карта поля	Зворотна інформація про врожайність коренеплодів

Для аналізу аеро- та супутникових знімків, дослідження ґрунтових зразків за сіткою, складання карт врожайності, створення скаут-звітів та відмічання проблемних ділянок на полі розроблені спеціалізовані додатки. У цьому дослідженні ми не рекламуємо комерційні продукти, проте розглянемо кілька безкоштовних або умовно безкоштовних програмних засобів, здатних полегшити роботу науковця або агронома.

Вибір конкретного додатку залежить від зручності користування та функціональних можливостей, які визначені розробником, на відміну від Google Maps.

*EOS Crop Monitoring* – безкоштовний додаток, що дає змогу відстежувати продуктивність посівів, створювати скаут-звіти та відмічати

проблемні ділянки на карті. Моніторинг здійснюється за допомогою мультиспектральних супутникових даних. Огляд полів спрощується завдяки автоматичній синхронізації додатку з вебверсією *EOSDA Crop Monitoring*. У додатку можна ставити та контролювати виконання завдань, аналізувати проблеми, додавати фото до звітів, ділитися результатами з командою та зберігати історію полів в одному місці. Додаток підтримує роботу із завданнями скаутів як в онлайн-, так і в офлайн-режимах на основі GPS-даних.

*Farmable: Farm Management App* у базовій безкоштовній версії дає змогу виконувати аналогічні операції: створення карти полів, планування, делегування та відстеження завдань, зокрема на основі GPS-даних для відстеження робочих місць або руху техніки, якщо тракторист має планшет із встановленою програмою або трактор оснащений GPS-пристроєм.

За допомогою додатку можна вести нотатки, записувати урожайність у журнал, додавати інформацію з карти врожайності, здійснювати огляд полів та працювати над даними колективно. У платних версіях, що поширюються по підписці, додаються функції для безпечного застосування агропрепаратів, включаючи пестициди: рекомендації щодо внесення, строки обробки, безпечні умови застосування тощо. Розширена версія також містить інструменти звітності, управління продажами та обліку робочого часу працівників підприємства.

Немає потреби детально описувати численні програмні засоби для планування наукових досліджень або ведення виробничої діяльності, адже сьогодні є велика кількість додатків для смартфонів, які задовольняють базові потреби аграріїв: *harvio® FIELD MANAGER*, *FARMDOK*, *365Crop*, *Novade Lite – Field Management*, *My Crop Manager – Farming App*, *Crop Farmers App*, *Calculator For Land: All Shape*, *AreaCalc – GPS Area Calculator*, *fieldmargin*, *Agroexchange Crop Monitoring*, *Geobristol*, *Field Observer* та інші.

Кожен із безкоштовних програмних засобів підтримує базові функції роботи з полями, а додаткові платні функції активуються за потребою – наприклад, для контролю застосування пестицидів або обліку робочого часу. Така гнучкість дає змогу використовувати додатки як інструментарій для науковців або аграріїв, додаючи необхідні функції для щоденної роботи та уникаючи зайвих витрат.

Зважаючи на швидкий розвиток програмного забезпечення, детальне висвітлення безкоштовних додатків наразі недоцільне. У разі надання додатку для вільного користування розробник не несе відповідальності за його роботу, а доступність або функціонал можуть змінюватися: сьогодні програма може бути безкоштовною, а завтра – поширюватися за підпискою або навпаки змінюватися частина функцій.

### *Адаптація наявних сівалок під вимоги цифрової технології вирощування буряків цукрових*

На сучасному етапі вирощування буряків цукрових найбільшу увагу серед усіх елементів технології приділяють саме сівбі – як способу не лише економії дорогоцінного насіння, а насамперед для забезпечення рівномірних та дружних сходів.

Сучасні сівалки для буряків цукрових мають високі технічні характеристики, що сприяють ефективному висіву насіння культури (табл. 3). Аналіз цих характеристик свідчить, що сучасні сівалки здатні здобольнити базові вимоги до вирощування культури. Проте в більшості моделей відсутні або доступні лише опційно компоненти, які можуть підвищити продуктивність сівалки та покращити якість сівби.

Таблиця 3

#### **Технічні характеристики сівалок провідних виробників, застосовуваних для сівби буряків цукрових**

Показник	Monosem	Kverneland Monopill	Amazona	Horsch Maestro	Grimme Rexor
Модель	NG Plus 4-6-8-12, NG2 6-8-12, Monoshox 6-8-12	Monopill SE, Monopill E-DRIVE II	EDX 1200-C	8CV, 12CV	Rexor 400, Rexor 600, Rexor 800
Ширина захвату	від 3 до 12 м	від 3 до 12 м	12	від 8 до 12 м	від 4 до 8 м
Кількість рядків	від 4 до 18	від 4 до 12	12	8, 12	4, 6, 8
Місткість бункера	від 800 до 3000 л	від 900 до 3000 л	4200 л		2200 л
Тип висівного апарату	вакуумний або дисковий	дисковий	дисковий	вакуумний	дисковий
Система висіву	пневматична				
Швидкість сівби	до 15 км/год	до 10 км/год	до 15 км/год	до 15 км/год	до 10 км/год
Додаткові опції				ISOBUS, Section Control, Twin-Disc	

Найбільш економічним і доступним рішенням для будь-якого господарства є правильний підбір дисків та конфігурація висівних апаратів, особливо при роботі з насінням буряків цукрових, яке має певні дефекти, або за висіву мікрокапсульованого насіння. Кожен відсоток втрати сингуляції під час сівби фактично відповідає втраті 1 % потенційної врожайності культури.

Дослідження показують, що нерівномірна розкладка насіння значно знижує потенціал врожайності окремих рослин: при зміщенні насін-

ня на  $\pm 5$ –6 см втрата врожайності однієї рослини становить близько 20 %, двійники – до 50 %, відставання рослин на одну фазу розвитку – 50 %, а на дві фази – фактична втрата врожаю. Тобто нерівномірність сівби насамперед негативно впливає на індивідуальну продуктивність рослин, що у підсумку визначає загальний рівень урожайності посівів.

Проаналізуємо питання пріоритетності додаткових опцій саме для сівалок, що застосовуються в технології вирощування буряків цукрових (табл. 4).

*Таблиця 4*

**Додаткові технології сівалок та їх вплив на якість сівби буряків цукрових**

Назва технології	Короткий опис	Вплив на якість сівби
ISOBUS	Стандартний міжнародний протокол зв'язку	Не має відношення до якості, дає змогу приєднати сівалку до іншого монітора або системи контролю висіву
Section Control	Програмне вибіркоче вимкнення секцій сівалки	Забезпечує уникнення пересівів рядків там, де уже виконувалась сівба. Особливо на складному рельєфі поля та при обсіванні країв поля
Незалежний електричний привід висівних секцій	Дає змогу індивідуально керувати секцією, прискорюючи або уповільнюючи її	Особливо корисний при сівбі на кривих гонах, коли один край сівалки рухається швидше, а інший повільніше
Активне регулювання притискового зусилля	Довантажує робочі секції сівалки, тим самим утримуючи їх на однаковій глибині	Позначається на якості висіву насіння, особливо за строкатості щільності ґрунту. Проте є спірні моменти, чи потрібно на переущільнених ґрунтах закладати насіння на такій же глибині, як на звичайних.
Розгортачі ряду	Розгортає рослинні рештки перед висівачими апаратами	Ефективні у випадку неякісної підготовки ґрунту та забруднення зони висіву насіння великою кількістю рослинних решток
Система внесення пестицидів та рідких добрив у ґрунт	Препарати вносяться в зону рядка або в міжряддя	На якість сівби не впливає, надалі дуже ефективна для росту й розвитку рослин. Адже в рідкій формі препарати дієвіші на ранніх етапах росту
Система висіву кількох гібридів	Дає змогу висівати інший гібрид без зупинки сівалки та заміни насіння	На якість сівби не впливає, лише економить час простою сівалки

У сучасну епоху формування цифрових технологій вирощування сільськогосподарських культур, зокрема буряків цукрових, пріоритетним є не лише забезпечення рівномірного висіву насіння сівалкою, а й отримання додаткових даних, які можуть бути використані для подальшого аналітичного оброблення інформації. Це дає змогу пов'язувати наявні масиви даних із показниками внесення добрив, родючості ґрунту, обробітку ґрунту та врожайності.

На основі цього доцільно проаналізувати типи даних, які бажано отримувати від сівалки та фіксувати в електронній системі (табл. 5).

Таблиця 5

**Дані, що рекомендується отримувати від сівалки для цифрового моніторингу та аналітики вирощування буряків цукрових**

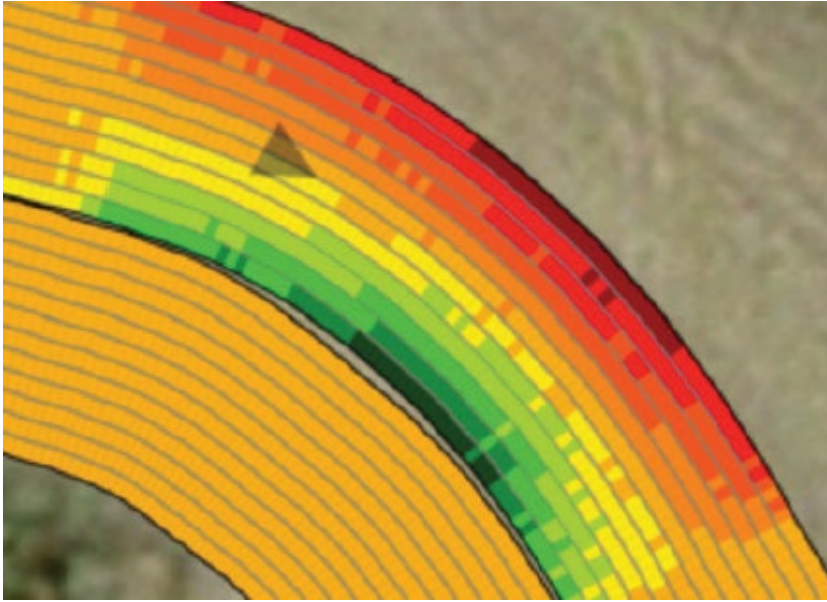
<b>Вологість ґрунту в борозні.</b> Кількість води, яку насіння отримає протягом трьох діб	<b>Притискне зусилля.</b> Фактичне зусилля, що прикладається до висівної секції
<b>Температура ґрунту</b> в борозні безпосередньо в момент сівби	<b>Якість руху.</b> Наскільки плавно висівна секція пересувається по поверхні ґрунту
<b>Однорідність ґрунту в борозні.</b> Зміни у властивостях ґрунту по борозні – щільність, гранулометричний склад та водний режим	<b>Сингуляція – якість висіву.</b> Кількість насіння, що відокремлено висівним апаратом належним чином
<b>Чистота борозни.</b> Відсутність поживних залишків у борозні	<b>Норма витрати рідини.</b> Фактична норма внесення речовин у рідкому стані
<b>Уміст органіки.</b> Орієнтовний вміст органічних речовин у ґрунті	<b>Контакт із ґрунтом.</b> Інформація, чи посівні секції сіють на задану робочу глибину

Розглянемо докладніше деякі опційні можливості сівалок, які можуть підвищити якість сівби буряків цукрових.

На сучасному етапі системи приводу сівалок є складними і можуть налічувати до 138 деталей, які повинні бездоганно працювати для забезпечення точного внесення насіння в ґрунт. Навіть у сівалках, що перебувають у відмінному технічному стані, будь-яка деталь системи приводу може стати потенційним джерелом похибок під час сівби.

Традиційні системи приводу, що працюють від коліс або гідравлічного приводу, складаються з ланцюгів, зірочок, муфт, шестигранних валів та підшипників. Вихід з ладу хоча б однієї деталі одразу впливає на роботу сівалки: ланцюг може перекрутитися, приводне колесо – прослизати, підшипники зношуватися, муфта ламатися. Це призводить до зниження точності дозування насіння (сингуляції), варіацій у відстані між насінням у рядку та відхилень від заданої норми висіву.

Електричний привод замінює зазначені 138 деталей одним електромотором на кожній посівній секції, що суттєво знижує потребу в технічному обслуговуванні та ймовірність погіршення якості роботи. Крім того, така система усуває проблему нерівномірної сівби на поворотах, регулюючи норму висіву на кожному ряду секції окремо відповідно до її швидкості (рис. 9).



**Рис. 9. Різниця у щільності висіву за використання системи з компенсацією відхилень від заданої норми висіву на поворотах та стандартної системи приводу від коліс**

Величина оптимального тиску на ґрунт може суттєво відрізнятись на різних ділянках поля та навіть по ширині сівалки. Варіативність ґрунтів за типом, гранулометричним складом, вмістом вологи або наявністю ущільнених колій після проходу техніки, що залишилися на полі після комбайна минулої осені, щороку створює різні умови для посіву в кожному рядку. Навантаження на опорні колеса під час сівби може змінюватися більш ніж на 397 кг на метр ширини сівалки (рис. 10).



**Рис. 10. Строкатість щільності ґрунту, що призводить до неоднорідності глибини заробляння насіння**

З цієї причини у міру просування сівалки по полю необхідно регулювати притискне зусилля на ґрунт відповідно до змін його характеристик. Багато ділянок поля мають різний потенціал врожайності, тому останнім часом перспективним є вирощування кількох гібридів на одному полі, особливо на ділянках з низькою продуктивністю.

Правильний вибір гібридів або сортів для кожного поля є одним із ключових рішень при плануванні сезону. Поля біля лісу не доцільно засівати тими ж гібридами та з тією самою нормою висіву, що й піщані ділянки або поля в русловій зоні річки.

За традиційної сівалки, де зміна насіння потребує зупинки та ручного завантаження, реалізувати такий підхід неможливо. Натомість сучасні системи з двосекційними бункерами та селекторами подачі насіння дозволяють висівати два різні гібриди на одному полі, перемикаючи подачу насіння залежно від ділянки. Селектор подає спочатку невелику кількість насіння одного гібрида, а при зміні ділянки – автоматично переходить на насіння з іншої секції бункера.

Підвищення врожайності внаслідок використання стартового добрива обмежене можливостями традиційних робочих органів для внесення добрив у борозну. Безпосередній контакт добрив із насінням може призвести до його опіків, тому норми внесення в борозну обмежені й не дозволяють розкрити повний потенціал врожайності.

Внесення стартового добрива поруч із борозною забезпечує швидкий і тривалий доступ кореневої системи до поживних речовин. Рухаючись у борозні безпосередньо над насінням, робочі органи одночасно ущільнюють верхній шар ґрунту в насінневу ложі. Крила сошників FurgowJet, виставлені під кутом донизу, вриваються в бокові частини борозни та вносять добриво двома смугами з обох сторін від насіння. Завдяки цьому досягається висока точність внесення та можливість застосовувати більші норми стартових добрив без ризику опіків насіння.

Класичні системи внесення рідких добрив з централізованою подачею можуть відхилитися від заданої норми на 15–30 % між рядками, що створює прихований дефіцит або надлишок поживних речовин і негативно впливає на результат. Рівномірне внесення по всій робочій ширині забезпечується лише при точному регулюванні та контролі норми на кожній рядковій секції.

## **2. Еталонні моделі та сценарії взаємодій функціонування модулів цифрової технології вирощування буряків цукрових**

### **2.1. Еталонні моделі технології вирощування буряків цукрових**

Еталонна модель – це узагальнений, відтворюваний і цифровізований сценарій технологічних процесів, який враховує в собі фактори, що виникають у процесі вирощування тієї чи іншої культури:

- агробіологічні закономірності росту й розвитку рослин;
- визначені критичні фази вегетації;
- систему сенсорів і діагностичних пристроїв;
- GNSS-навігацію та автоматизацію операцій;
- алгоритми реагування на абіотичні стреси;
- оптимізацію агротехнічних прийомів на основі оперативних даних.

А отже, можна виділити прості еталонні моделі, які варто розділити за призначенням на такі класи: агробіологічні, сенсорні, геопросторові, технологічні, економіко-енергетичні.

Усі вони мають як свої переваги, так і недоліки, проте головною перевагою їх є невеликі витрати на запровадження та досить малі операційні видатки на підтримання.

#### ***Агробіологічна модель***

Призначення: опис росту й розвитку рослин у різних фазах вегетації.

Ключові параметри:

- фенологічні стадії (ВВСН-класифікація);
- потреби у волозі та температурі;
- критичні фактори стресу (посуха, заморозки, надлишок вологи, температурні коливання).

Використання цієї моделі спрямоване на прогноз продуктивності залежно від середовища та агротехніки.

#### ***Сенсорна модель***

Типи датчиків: електромагнітні, оптичні, механічні, електрохімічні, акустичні.

---

Базовий стандарт: оптичні датчики флуоресценції хлорофілу для діагностики стану фотосистеми II [Fo, Fm, qP, Y(II) тощо].

Модель орієнтується на ідентифікацію стресових станів у критичні фази росту й розвитку рослин буряків цукрових, а також визначення рівня забезпечення рослин факторами живлення.

### ***Геопросторова модель***

GNSS-системи (GPS, Galileo) + системи корекції (RTK, TerraStar, StarFire).

Призначення: забезпечення точності агрооперацій (сівба  $\pm 1$  см, міжрядна культивування  $\pm 2-3$  см, обприскування без перекриття).

Використання: уніфікація просторових даних для тракторів, комбайнів, обприскувачів.

### ***Технологічна модель***

Модулі: обробіток ґрунту, сівба, догляд (культивування, захист, підживлення), збирання.

Принцип: інтеграція даних сенсорів у рішення щодо часу й параметрів виконання операцій.

Еталонні алгоритми: адаптивне коригування строків сівби, застосування антистресових препаратів, краплинне зрошування.

### ***Економіко-енергетична модель***

Ключові показники: урожайність (т/га), собівартість (25–40 тис. грн/га), енергоефективність, коефіцієнт рентабельності.

Призначення: оцінка доцільності впровадження цифрової технології у конкретному господарстві.

По суті інноваційними складниками технології вирощування буряків цукрових мають бути ті моделі, які здебільшого широко та щоденно не використовуються в практиці виробничниками. Серед попередньо класифікованих можна виділити такі моделі, як агробіологічну, сенсорну та геопросторову.

Отже, **модель агробіологічної ефективності** має базуватися на використанні комбінації фізіологічних, гідрометеорологічних, розрахункових та динамічних моделей для прогнозування росту, продуктивності та формування врожаю.

Ураховує кореляційні залежності між світовими / європейськими та українськими площами буряків ( $r = 0,80-0,90$ ), що дає змогу прогнозувати площі та обсяги виробництва на рік уперед.

При цьому, за результатами наших досліджень було встановлено, що Україна тяжіє до кластеру Америк, Азії та Західної Європи за струк-

---

турою площ буряків цукрових. Тобто в самій моделі варто враховувати й аспекти глобального рівня.

Функції еталонної моделі:

- прогноз площ та обсягів виробництва залежно від світового попиту;
- базова платформа для стратегічного планування виробництва;
- інтеграція з цифровими сенсорними даними для уточнення прогнозів у сезоні.

**Модель сенсорної діагностики** критичних стадій розвитку рослин буряків цукрових базується на багаторівневому використанні оптичних, електромагнітних, механічних, електрохімічних та метеорологічних датчиків.

*Оптичні сенсори* (включно з флуоресцентними приладами типу «Флоратест») є центральними: вони дають дані про ефективність фотосистеми II (Fv/Fm, qP, Y(II)) та дозволяють виявляти тепловий, водний, світловий, поживний та інші види стресів у макростадії 3 (змикання рядків, ВВСН 30–39), особливо це актуально у випадку коли вологість ґрунту падає < 60 % НВ і рослини буряків можуть піддаватись комбінованим видам стресів.

*Метеостанції* забезпечують базову інформацію для визначення критичних факторів: заморозки на стадії 00–09, нестача вологи на стадії 30–39, температурні відхилення на стадії 10–19 тощо.

*Алгоритми ранньої діагностики* дають змогу поєднувати агрозаходи: наприклад, зміщення строків сівби + обробка насіння кріопротекторами, запровадження краплинного зрошення лише при доведеному дефіциті вологи або ж обробка посівів стимуляторами росту чи мікродобривами, які здатні поліпшити фізіологічний стан рослин, підданих стресу.

**Геопросторова модель** передбачає формування умов для точного виконання агротехнічних операцій (GNSS-модуль). Власне використання GNSS (GPS, Galileo) для позиціонування техніки з точністю до  $\pm 1$  см для сівби, міжрядної культивування та обприскування. А також підтримку систем автоматичного водіння, посекційного відключення обприскувачів та точного внесення добрив.

Особливостями застосування є:

- підвищення якості сівби;
- зменшення перекриттів і втрат добрив / ЗЗР;
- інтеграція з цифровими картами поля та датчиками стану рослин.

## 2.2. Взаємодія модулів цифрової технології

Отже, окремі модулі цифрової технології вирощування буряків цукрових можуть ефективно застосовуватися у виробничих процесах. Водночас формування цілісної цифрової технології можливе лише за умови їхньої взаємодії, зокнайменше на рівні обміну даними, а в оптимальному варіанті – шляхом інтеграції в єдину систему на основі модулів математичного моделювання.

За відсутності взаємодії сенсорів з іншими модулями системи та їхнього впливу на якість функціонування технології загалом, застосування таких засобів має фрагментарний характер і не забезпечує формування цілісної цифрової технології, а радше характеризує використання окремих елементів технології вирощування.

З огляду на викладене, доцільно розглянути сценарії взаємодії різних типів сенсорів із простими моделями, а також взаємодію моделей між собою.

### *Сенсори ↔ Агробіологічна модель*

- Дані про вологість ґрунту, температуру, стан фотосистеми інтегруються у фенологічну модель.
- Алгоритми прогнозують ризик стресів і запускають рекомендації (наприклад, зміщення сівби чи внесення антистресових препаратів).

### *Сенсори ↔ Геопросторова модель*

- GNSS-система синхронізує розташування техніки з даними датчиків. Це дає змогу виконати сівбу та міжрядну культивуацію з мінімальними відхиленнями.
- Забезпечується автоматичне посекційне відключення обприскувачів.

### *Геопросторова модель ↔ Технологічна модель*

- Позиційна точність операцій напряму впливає на успішність подальших робіт. При відхиленні сівалки  $>\pm 5$  см стає неможливим якісне міжрядне розпушування та збір урожаю.
- Дані, отримані з прив'язкою до конкретної ділянки поля, дають змогу проводити глибоку аналітику врожайності культури та впливу на неї окремих факторів, чітко визначених за допомогою геопросторової моделі. Скажімо, надмірна кількість розворотів техніки, що веде до переущільнення окремої ділянки поля, нор-

ма висіву насіння чи застосування добрив або ЗЗР не може бути конкретизована без геопросторової моделі, бо лінійний запис роботи агрегату важко інтерпретувати.

*Технологічна ↔ Економіко-енергетична модель*

- Ефективність агрооперацій у цифровому форматі знижує втрати, економить паливо та добрива.
- Модель відображає економічний ефект від впровадження цифрових технологій (зменшення собівартості, підвищення врожайності).

Отже, на підставі вищевикладеного можливо сформулювати систему управління або досягти інтеграційного рівня модулів цифрової технології вирощування буряків цукрових.

У процесі досліджень не виявлено обмежень, які б унеможливили об'єднання всіх модулів у єдину базу даних та спільний програмний інтерфейс. Це зумовлено тим, що окремі модулі взаємодіють з різними типами сенсорів або мають визначений рівень взаємодії між собою. Поєднання розрізаних модулів у єдину інформаційну систему забезпечує ефективніше використання наявних ресурсів та створює передумови для оперативного ухвалення обґрунтованих управлінських рішень.

За умов централізації алгоритми прийняття рішень функціонують у режимі реального часу на основі даних сенсорів, супутникової інформації та результатів польових історичних спостережень.

*Аналіз взаємодії модулів цифрової технології вирощування буряків цукрових*

Цифрова технологія вирощування буряків цукрових побудована як модульна система, у якій кожен модуль виконує окрему функцію, тоді як ключовим аспектом є взаємодія модулів, що забезпечує адаптивне управління у режимі реального часу.

До модулів цифрової технології вирощування буряків цукрових були додані аналітично-алгоритмічний та комунікаційно-хмарний модулі, які забезпечують власне цифрове функціонування системи та підтримують процес прийняття рішень.

Важливим аспектом є те, що остаточні рішення щодо коригування технології вирощування, оперативного реагування на певні сценарії росту та розвитку культури, впливу негативних факторів та інших технологічних аспектів ухвалюються в одному центральному модулі – аналітично-алгоритмічному – на основі вже підготовлених рішень інших модулів.

Кожен модуль максимально опрацює інформацію в межах своїх функцій і формує готове рішення, яке передається центральному модулю. Центральний модуль управління інтегрує ці дані та приймає остаточне рішення як збалансоване рішення між технологічними аспектами, даними сенсорів, біологічними прогнозами розвитку культури та економічним прогнозуванням.

Таблиця 6

**Модулі системи, їх основні функції та взаємодія**

Модуль / сенсор	Основна функція	Ключові вхідні дані	Вихідні дані / взаємодія
Агробіологічний	Прогноз росту, розвитку, врожайності	Історичні дані, моделі WOFOST, SWAP, DSSAT	Прогнози врожайності, сценарії
Метеосенсори	Моніторинг абіотичних факторів	Температура, волога, опади, вітер	Дані для алгоритмів стресу
Сенсори визначення стану рослин	Вимірювання стану фотосистеми	Показники Fv/Fm, Y(II)	Сигнали про настання стресу
Геопросторовий модуль	Точне виконання операцій	Супутникові дані, карти поля	Координати, коригування руху
Технологічний модуль	Фіксація усіх агротехнічних операцій	Інформація про агротехнічні операції	Варіанти рекомендацій щодо коригування технології вирощування
Економіко-енергетичний модуль	Економічні та енергетичні показники технології вирощування	Витрати, понесені на технологію вирощування	Ефективність вирощування культури, прогнози прибутковості
Аналітично-алгоритмічний	Інтеграція та ухвалення рішень	Всі модулі	Остаточні рішення з проведення агрозаходів або остаточного коригування елементів технології
Комунікаційно-хмарний	Обмін даними, збереження	Інтернет, бази даних	Централізоване управління

Нижче наведено основні переваги розробленого агробіологічного модуля системи (табл. 7).

Таблиця 7

**Переваги розробленого агробіологічного модуля**

Напрямок	Ключові можливості	Переваги для управління врожайністю та технологією
Прогнозування врожайності	<ul style="list-style-type: none"> <li>Аналіз фотосинтетичної активності (Fv/Fm, Y(II))</li> <li>Рання діагностика стресів</li> <li>Облік критичних фаз (30–39 BBCH)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ранній прогноз з високою точністю</li> <li>Виявлення прихованих стресів до появи симптомів</li> <li>Оцінка глибини впливу стресу на майбутню продуктивність</li> </ul>
Формування сценаріїв технології	<ul style="list-style-type: none"> <li>Моделювання варіантів розвитку подій</li> <li>Аналіз ефективності різних агрозаходів</li> <li>Комбінування заходів для мінімізації стресів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Оптимальний вибір технології в реальному часі</li> <li>Зниження ризиків втрати врожаю</li> <li>Можливість адаптувати стратегію під конкретні умови сезону</li> </ul>
Моніторинг стану рослин	<ul style="list-style-type: none"> <li>Безперервний вимір фізіологічних параметрів</li> <li>Аналіз спектральних індикаторів</li> <li>Оцінка інтенсивності стресів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Об'єктивна аналітика без людського фактору</li> <li>Виявлення проблем у найуразливіших фазах</li> <li>Прямий зв'язок між фізіологією та продуктивністю</li> </ul>
Інтеграція даних	<ul style="list-style-type: none"> <li>Об'єднання ґрунтових, атмосферних та спектральних даних</li> <li>Використання історії поля</li> <li>Моделі «ґрунт – рослина – атмосфера – техніка»</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Висока точність прогнозів</li> <li>Глибоке розуміння причинно-наслідкових зв'язків</li> <li>Побудова довгострокових стратегій вирощування</li> </ul>
Підтримка прийняття рішень	<ul style="list-style-type: none"> <li>Розрахунок реакції рослин на технологічні дії</li> <li>Автоматичні попередження та рекомендації</li> <li>Сценарне планування</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Перехід до проактивного управління</li> <li>Зменшення втрат ресурсу та часу</li> <li>Формування індивідуальної технології для кожного поля</li> </ul>

Доцільно також визначити типові сценарії взаємодії різних сенсорів та модулів між собою.

**Сценарій 1. Водний стрес у фазі змикання рядків буряків цукрових:**

- Метеостанція → сигнал про вологість ґрунту <60 % НВ.
- Оптичні сенсори → фіксують падіння Y(II), що підтверджує наявність стресу.

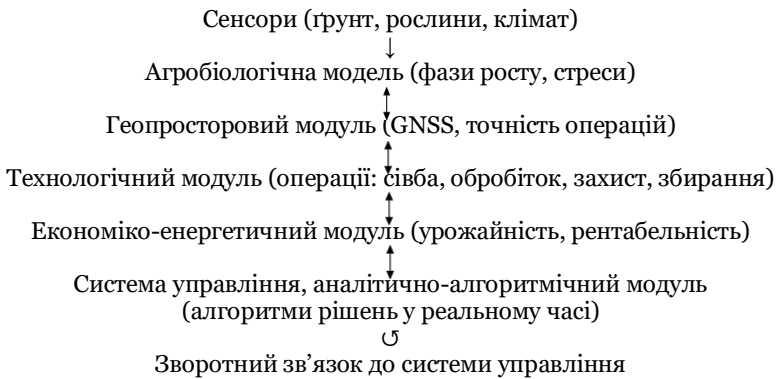
- Алгоритм → ухвалює рішення про проведення зрошення та застосування антистресових препаратів.
- GNSS → забезпечує точне внесення ресурсів по карті вологості або оцінку рівня стресу рослин.

### Сценарій 2. Тепловий стрес у фазі 10–19:

- Метеостанція → середньодобова температура  $> +23$  °С.
- Сенсори → фіксують зниження Fv/Fm.
- Алгоритм → коригує строки міжрядної культивуації (за наявності) та здійснює підживлення антистресантом.

### Сценарій 3. Автоматизація обробки посівів пестицидами та добривами:

- GNSS модуль → визначає зони поля без перекриття.
- Сенсори → визначають диференційовану норму внесення.
- Алгоритм → забезпечує посеційне керування обприскувачем.



**Рис. 11. Спрощена схема взаємодій єдиної цифрової агротехнології вирощування буряків цукрових**

Фактично кожен модуль системи функціонує за принципом взаємодії «кожен з кожним» і, за відсутності домінування одного модуля над іншими, передає центральному модулю свої готові рішення.

Аналогічно, сенсори доступні будь-якому з модулів для отримання інформації, водночас модулі можуть отримувати вже опрацьовані аналітичні рішення інших модулів на основі даних сенсорів.

Такий підхід дозволяє зменшити навантаження на обчислювальні ресурси системи та підвищити її відмовостійкість, оскільки основні процеси розпаралелюються на спеціалізовані завдання, а дублюються лише критично важливі функції.

### 3. Ефективність застосування цифрових технологій у вирощуванні буряків цукрових

Проведено комплексний розрахунок економічної та агротехнічної ефективності впровадження цифрових технологій. Зокрема встановлено ключові показники ефективності (табл. 8).

Таблиця 8

#### Ключові показники ефективності

Показник	Значення
Загальний економічний ефект	22,7 млн грн/рік на 100 га
Приріст урожайності	+35 % (15,75 т/га)
Період окупності	< 1 місяця
ROI (щорічний)	25 129 %
Економія ресурсів	519 335 грн/рік

Застосування цифрових технологій забезпечує синергетичний ефект завдяки одночасному вдосконаленню окремих елементів технології вирощування. Насамперед це проявляється у підвищенні агротехнічної ефективності вирощування буряків цукрових, що відображається у зростанні їх урожайності (табл. 9).

Таблиця 9

#### Агротехнічна ефективність вирощування буряків цукрових

Фактор впливу	Приріст урожайності	Додатковий урожай
Точна сівба (РТК-навігація)	+5 %	2,25 т/га
Оптимальна густина рослин	+8 %	3,60 т/га
Своєчасна діагностика стресів	+12 %	5,40 т/га
Точне внесення ЗЗР	+6 %	2,70 т/га
Мінімізація пошкоджень у процесі збирання	+4 %	1,80 т/га
Разом	+35 %	15,75 т/га

Отже, навіть у середньому за роками, в багаторічному розрізі, можливо забезпечити врожайність буряків цукрових на рівні 60,75 т/га, що істотно перевищує базовий показник 45,0 т/га. В умовах упровадження цифрової технології вирощування суттєво підвищується точність виконання агротехнічних операцій.

Зокрема, використання RTK-систем забезпечує такі параметри точності та продуктивності:

- сівба: відхилення 0 см, збільшення швидкості виконання операції на 26 %;
- міжрядна культивуація: відхилення  $\pm 1,52$  см, збільшення швидкості на 39 %;
- обробка пестицидами: відхилення  $\pm 1,34$  см, збільшення швидкості на 30 %;
- збирання: відхилення  $\pm 2,05$  см, збільшення швидкості на 15 %.

Діагностика та попередження стресових станів є одним із ключових елементів цієї системи. Використання оптичних датчиків флуоресценції хлорофілу дає змогу:

- виявляти стрес на ранніх стадіях;
- знижувати втрати від посухи на 60 %;
- знижувати втрат від хвороб на 70 %;
- знижувати втрати від шкідників на 65 %;
- знижувати втрати від дефіциту живлення на 75 %.

Далі наведено розрахунок показників економічної ефективності вирощування буряків цукрових за умов упровадження цифрової технології. Насамперед визначено структуру економічного ефекту вирощування культури в розрахунок на 100 га (табл. 10).

Таблиця 10

#### Структура економічного ефекту (на 100 га)

Стаття доходів/економії	Сума, грн/рік	Частка, %
Додатковий урожай (15,75 т/га $\times$ 100 га $\times$ 850 грн/т)	13 387 500	59,0
Запобігання втратам від стресів	8 749 688	38,5
Економія ресурсів	519 335	2,3
Економія на оплаті праці	49 500	0,2
Загальний ефект	22 706 022	100

При цьому важливим аспектом упровадження технології вирощування є безпосередня економія ресурсів, що витрачаються на її реалізацію (табл. 11).

Таблиця 11

#### Економія ресурсів, що витрачаються на технологію вирощування

Ресурс	Базова норма	Економія	Вартість економії, з розрахунку на 100 га
Насіння	1,2 п. о./га	-15 %	50 400 грн
Добрива	450 кг/га д. р.	-20 %	315 000 грн
ЗЗР	3,5 л/га	-25 %	74 375 грн
Пальне	85 л/га	-18 %	79 560 грн
Разом	–	–	519 335 грн

Витрати на впровадження цифрової технології вирощування буряків цукрових на господарство наведено в таблиці 12.

Таблиця 12

**Витрати на впровадження цифрової технології вирощування буряків цукрових на господарство**

Стаття витрат	Перший рік, грн	Щорічні витрати, грн
РТК-система	45 000	45 000
Оптичні датчики	85 000	–
Програмне забезпечення	25 000	25 000
Навчання персоналу	15 000	–
Обслуговування	20 000	20 000
Разом	190 000	90 000

Отже, можна узагальнити фінансові показники отриманого економічного ефекту:

- Чистий прибуток (перший рік): 22 516 022 грн;
- Чистий прибуток (наступні роки): 22 616 022 грн;
- ROI перший рік: 11 850 %;
- ROI наступні роки: 25 129 %;
- Період окупності: < 1 місяця.

Екологічна ефективність передбачає кардинальне зниження навантаження на довкілля, а саме:

- Зменшення внесення добрив: –90 кг д. р./га (20 %);
- Зменшення внесення пестицидів: –0,875 л/га (25 %);
- Зменшення викидів CO<sub>2</sub>: –795 кг/га завдяки економії пального.

Також запровадження цієї системи передбачає раціональне використання води:

- Оптимізація поливу на основі даних про вологість ґрунту;
- Зниження водного стресу рослин на 60 %.

Технологія здатна продемонструвати також і значну соціальну ефективність:

- Підвищення продуктивності праці: +27 % у середньому;
- Покращення умов праці: зниження монотонності операцій;
- Підвищення кваліфікації: навчання персоналу цифровим технологіям;
- Зниження впливу людського фактора: автоматизація критичних операцій.

Порівняльний аналіз із традиційною технологією вирощування буряків цукрових наведено в таблиці 13.

Таблиця 14

**Порівняння з традиційною технологією**

Показник	Традиційна технологія	Цифрова технологія	Приріст
Врожайність, т/га	45,0	60,75	+35 %
Витрати ресурсів, грн/га	25 000	19 807	-21 %
Продуктивність праці	100 %	127 %	+27 %
Втрати від стресів	100 %	32 %	-68 %

Потенційні ризики цифрових технологій вирощування буряків цукрових:

- Технічні: збої в роботі систем, кібератаки;
- Економічні: коливання цін на продукцію;
- Кадрові: нестача кваліфікованих спеціалістів;
- Погодні: екстремальні погодні умови.

Шляхи мінімізації:

- Резервування критичних систем;
- Диверсифікація збуту продукції;
- Постійне навчання персоналу;
- Страхування врожаю.

Отже, впровадження цифрових технологій є високоефективним з економічною віддачею 22,7 млн грн/рік на 100 га. Період окупності менше одного місяця свідчить про виключно високу рентабельність інвестицій. Приріст урожайності на 35 % досягається завдяки комплексному покращенню всіх елементів технології. Економія ресурсів 15–25 % забезпечує додатковий економічний ефект та зниження екологічного навантаження. ROI понад 25 000 % після першого року робить проєкт надзвичайно привабливим для інвесторів.

## Список використаних джерел

1. Daily G. C., Dasgupta P., Bolin B. et al. Food production, population growth, and the environment. *Science*. 1998. Vol. 281. P. 1291–1292. <https://doi.org/10.1126/science.281.5381.1291>
2. Fountas S. Farmers' attitude to precision farming. *Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture*. Montpellier, France : ENSA-Montpellier, 2001. P. 515–519.
3. Hapka A. J., Franzen D. W., Giles J. F., Cattanach N. R. Timing and release of nitrogen from residues. Minnesota and North Dakota Sugarbeet Research and Education Board. Fargo : NDSU Extension Service. URL: <https://www.sbreb.org/wp-content/uploads/2018/12/Amy-Hapka-2000sbrpt.pdf>
4. Reitmeier L. J., Franzen D. W., Giles J. F. et al. Nitrogen management in a wheat/potatoes/sugarbeet crop rotation. *Sugarbeet Research and Extension Reports*. 1998. Vol. 29. P. 125. Minnesota and North Dakota Sugarbeet Research and Education Board.
5. Seelan S. R., Green R., Laguette S., Wivell C. Assessment of damage to sugarbeet crop due to errant defoliant chemical drift. *Proceedings of the Third International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry*. Ann Arbor, MI : Veridian.
6. Vossen P., Meyer-Roux J. Crop monitoring and yield forecasting activities of the MARS Project. *European Land Information Systems for Agro-Environmental Monitoring* / edited by D. King, R. J. A. Jones, A. J. Thomasson. Luxembourg : Official Publ. of the EU, 1995. P. 11–29.
7. Idso S. B., Jackson R. D., Reginato R. J. Remote sensing of crop yields. *Science*. 1977. Vol. 196, Iss. 4285. P. 19–25. <https://doi.org/10.1126/science.196.4285.19>
8. Idso S. B., Pinter Jr. P. J., Jackson R. D., Reginato R. J. Estimation of grain yields by remote sensing of crop senescence rates. *Remote Sensing of Environment*. 1980. Vol. 9, Iss. 1. P. 87–91. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(80\)90049-8](https://doi.org/10.1016/0034-4257(80)90049-8)
9. Laguette S., Seelan S., Casady G. et al. Helping farmers and ranchers to use remote sensing as a basic management tool: A development of an interactive remote sensing and image processing teaching process. *Proceedings of IGARSS 2001*. 2001. Vol. VI. P. 2881–2883. <https://doi.org/10.1109/igarss.2001.978193>
10. Lal R. Soil structure and sustainability. *Journal of Sustainable Agriculture*. 1991. Vol. 1. P. 67–92. [https://doi.org/10.1300/JO64v01n04\\_06](https://doi.org/10.1300/JO64v01n04_06)

11. Swinton S. M., Lowenberg-Deboer J. Global adoption of precision agriculture technologies: who, when, why? *Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture*. Montpellier : ENSA-Montpellier, 2001. P. 557–562.
  12. National Research Council. *Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial Technologies in Crop Management*. Washington, DC : National Academy Press.
  13. Daberkow S. G., McBride W. D. Adoption of precision agriculture technologies by U.S. farmers. *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture*. Madison, WI : ASA-CSSA-SSSA, 2000.
  14. Bauer M. E. Spectral inputs to crop identification and condition assessment. *Proceedings of the IEEE*. 1985. Vol. 73, No. 6. P. 1071–1085. <https://doi.org/10.1109/proc.1985.13238>
  15. Jackson R. D. Remote sensing of vegetation characteristics for farm management. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*. 1984. Vol. 475. P. 81–96. <https://doi.org/10.1117/12.966243>
  16. Hatfield J. L., Pinter Jr. P. J. Remote sensing for crop protection. *Crop Protection*. 1993. Vol. 12, Iss. 6. P. 403–414. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(93\)90001-Y](https://doi.org/10.1016/0261-2194(93)90001-Y)
  17. Moran M. S., Inoue Y., Barnes E. M. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 61, Iss. 3. P. 319–346. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00045-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00045-X)
  18. Laguette S., Seielstad G., Seelan S. et al. Precision farming management via information dissemination. *Proceedings of IGARSS 2001*. 2001. Vol. II. P. 837–839.
  19. Mansfield E. Technical change and the rate of imitation. *Econometrica*. 1963. Vol. 29. P. 741–763. <https://doi.org/10.2307/1911817>
  20. McDonald R. B., Hall F. G. Global crop forecasting. *Science*. 1980. Vol. 280. P. 670–679. <https://doi.org/10.1126/science.208.4445.670>
-

*Наукове видання*

*Автори:*

**О. І. Присяжнюк, М. О. Черняк, В. В. Мусіч,  
Н. О. Кононюк, О. П. Шевченко, О. Ю. Половинчук,  
С. М. Шклярук, Е. Е. Навроцька, О. В. Копитов,  
М. В. Марків, Є. В. Боюн, В. В. Слободянюк,  
Б. М. Борисенко, О. В. Лук'янчук, В. І. Коваль**

## **ЦИФРОВА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОЩУВАННЯ БУРЯКІВ ЦУКРОВИХ**

**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  
<https://bio.gov.ua>

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 5713 від 19.10.2017





