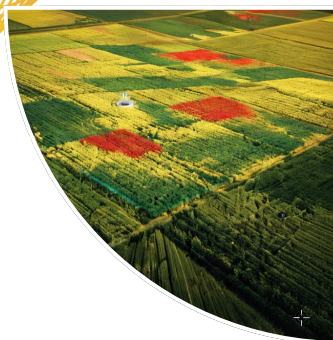


О. І. Присяжнюк, Н. О. Кононюк,
О. А. Маляренко, М. О. Черняк, В. В. Мусіч,
О. Ю. Половинчук, С. М. Мандровська

ІНТЕГРОВАНА ЦИФРОВА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ АГРОВИРОБНИЦТВОМ З ОПТИМІЗАЦІЄЮ ВУГЛЕЦЕВОГО БАЛАНСУ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ КУЛЬТУР

Науково-методичні рекомендації



КИЇВ 2026

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР І ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ

**О. І. Присяжнюк, Н. О. Кононюк, О. А. Малярєнко,
М. О. Черняк, В. В. Мусіч, О. Ю. Половинчук,
С. М. Мандровська**

**ІНТЕГРОВАНА ЦИФРОВА СИСТЕМА
УПРАВЛІННЯ АГРОВИРОБНИЦТВОМ
З ОПТИМІЗАЦІЄЮ ВУГЛЕЦЕВОГО БАЛАНСУ
ТА ПРОДУКТИВНОСТІ КУЛЬТУР**

Науково-методичні рекомендації

Київ • 2026

УДК 633.1:631.15:004.94:631.95(477)(072)
<https://doi.org/10.47414/978-617-8706-45-6>

*Рекомендовано до опублікування вченою радою
Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН
(протокол № 8 від 08.04.2026)*

Рецензенти:

Я. Д. Фучило, доктор с.-г. наук, професор;
Я. П. Макух, доктор с.-г. наук, професор

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН

Присяжнюк О. І., Кононюк Н. О., Маляренко О. А., Черняк М. О., Мусіч В. В., Половинчук О. Ю., Мандровська С. М. Інтегрована цифрова система управління агровиробництвом з оптимізацією вуглецевого балансу та продуктивності культур : науково-методичні рекомендації / НААН України, Ін-т біоенергет. культ. і цукр. буряків. Електрон. вид. Київ : ІБКіЦБ НААН, 2026. 40 с.

ISBN 978-617-8706-45-6 (PDF)

Представлено науково обґрунтовану концепцію інтегрованої цифрової системи управління агровиробництвом, спрямованої на оптимізацію продуктивності культур і вуглецевого балансу агроєкосистем. Розкрито особливості формування викидів парникових газів у умовах Лісостепу України, запропоновано комплексну методичку їх розрахунку з урахуванням міжнародних стандартів IPCC та адаптацією до ґрунтово-кліматичних умов. Описано архітектуру багаторівневої системи, принципи інтеграції даних із різномірних джерел та моделі прогнозування врожайності й вуглецевого сліду. Запропоновано симуляційні сценарії віртуальних моделей полів для оптимізації агротехнологічних рішень за еколого-економічними критеріями. Обґрунтовано підходи до інтероперабельності та масштабування цифрових компонентів системи. Результати можуть бути використані у науковій діяльності, аграрному виробництві та впровадженні практик carbon farming.

Призначено для науковців, агрономів, аспірантів та студентів закладів вищої освіти аграрного профілю.

УДК 633.1:631.15:004.94:631.95(477)(072)
<https://doi.org/10.47414/978-617-8706-45-6>

ISBN 978-617-8706-45-6 (PDF)

© Інститут біоенергетичних культур
і цукрових буряків НААН, 2026
© Колектив авторів, 2026

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Зональні особливості вирощування злакових культур та емісія парникових газів і вуглецевий баланс агроecosystem умовах Лісостепу України	5
2. Концептуальна модель інтегрованої цифрової системи управління агровиробництвом	12
2.1. Архітектура багаторівневої системи	12
2.2. Параметри моделей та їхня верифікація	18
2.3. Технологічні сценарії та їх моделювання	20
2.4. Принципи інтеперабельності та масштабування	21
3. Методика комплексного розрахунку викидів парникових газів (CO₂, N₂O, CH₄)	22
3.1. Емісії від виробництва та транспортування ресурсів	23
3.2. Емісії від використання сільськогосподарської техніки	25
3.3. Секвестрація вуглецю в ґрунті	26
3.4. Зведений розрахунок та порівняльний аналіз	27
3.5. Алгоритм практичного застосування	29
4. Симуляційні сценарії віртуальних моделей полів та методологія інтеперабельності цифрових компонентів системи	31
4.1. Погодні сценарії та їх калібрування	32
4.2. Технологічні сценарії та їх оптимізація	33
4.3. Алгоритм симуляції та калібрування	34
4.4. Методологія інтеперабельності цифрових компонентів системи	35
4.5. Організаційна інтеперабельність та масштабування ..	38
Висновки	39

Вступ

Сучасне сільськогосподарське виробництво перебуває на перетині двох глобальних викликів: необхідності забезпечення продовольчої безпеки та потреби у радикальному зменшенні антропогенного впливу на довкілля, зокрема викидів парникових газів. В умовах реалізації Паризької кліматичної угоди, Європейського зеленого курсу та ініціатив SBTi-FLAG формується новий парадигмальний підхід до агровиробництва, що поєднує цифрову трансформацію технологічних процесів з карбоново нейтральними стратегіями ведення сільського господарства.

Україна, маючи понад 22 млн га посівних площ, з яких злакові культури займають близько 11 млн га, є одним із ключових гравців глобального продовольчого ринку. Водночас неоптимізовані технології вирощування призводять до збільшення вуглецевого сліду сільськогосподарського виробництва через надмірне використання палива для техніки, надлишкове внесення азотних добрив (викиди N_2O), неефективне управління органічною речовиною ґрунту. Виробничник одночасно може мати великі втрати парникових газів з ґрунту та недоотримання органічної речовини з врожаєм, що зміщує баланс парникових газів у бік витратної його частини.

Ключовими проблемами залишаються: фрагментованість цифрових рішень, коли наявні метеостанції, датчики вологості ґрунту, системи діагностики рослин та сенсори на техніці функціонують ізольовано; складність інтерпретації даних, що створює бар'єр для агрономів; неоптимальність прийняття рішень, яка призводить до екологічних загроз та підвищеного викиду парникових газів.

Метою цього дослідження є наукове обґрунтування карбоново нейтральних та цифрових елементів технологій вирощування сільськогосподарських і біоенергетичних культур на основі комплексного аналізу агроекологічних, технологічних та економічних аспектів рослинництва в умовах Лісостепу України. Дослідження спрямоване на створення теоретичного підґрунтя для формування інтегрованої цифрової системи управління агровиробництвом, оптимізації вуглецевого балансу через добір сортів та управління рослинними рештками, а також обґрунтування переходу від інтенсивної хімізації до екологізованих технологій.

Дослідження базується на результатах п'ятирічних польових дослідів (2020–2024 рр.) у Правобережному Лісостепу України, аналізі статистичних даних Державної служби статистики по 9 областях лісостепової зони, комплексних розрахунках емісії парникових газів та вуглецевого балансу за методиками IPCC, а також економічній оцінці різних сценаріїв агровиробництва.

1. Зональні особливості вирощування злакових культур та емісія парникових газів і вуглецевий баланс агроєкосистем умовах Лісостепу України

Пшениця є найбільш поширеною та стратегічно важливою зерновою культурою України. У структурі посівних площ озимі види займають 82,7 %, з яких 71,6 % припадає на пшеницю озиму. Лісостеп залишається ключовим регіоном вирощування цієї культури завдяки збалансованості ґрунтово-кліматичних умов: достатнім тепловим ресурсам у поєднанні з вологозабезпеченістю та високородючими ґрунтами.

За результатами аналізу статистичних даних 2020–2024 рр. встановлено, що сумарний внесок лісостепоного регіону в плані площ вирощування пшениці озимої становить 40,5 % від загальних площ, зайнятих під пшеницею в Україні станом на 2024 рік, або 36,4 % у середньому за роки спостережень. Традиційно великі площі властиві Харківській (424 тис. га), Вінницькій (320 тис. га), Полтавській (247 тис. га), Хмельницькій (230 тис. га) областям.

Продуктивність пшениці в Лісостепу стабільно перевищує загальноукраїнські показники на 0,62–0,89 т/га. У середньому за роки досліджень найвищу врожайність отримано в Хмельницькій (5,85 т/га), Тернопільській (5,50 т/га), Сумській (5,19 т/га), Черкаській (5,15 т/га) та Вінницькій (5,00 т/га) областях. Водночас в окремі роки створюється ліміт факторів, що викликає значно нижчу врожайність, що спостерігали у 2022–2024 рр. у Харківській області, що пов'язано з воєнними діями.

В умовах сучасного господарювання агровиробники застосовують органічні та мінеральні добрива доволі обмежено. Максимальні кількості органіки (1394 кг/га в середньому) вносились лише в Київській області, тоді як решта регіонів має значно нижчі показники. По Лісостепу аграрії застосовують у середньому 79,3 кг д. р./га азоту, 13,0 фосфору та 11,1 кг д. р./га калію.

Установлено планомірне зниження обсягів внесення азотних добрив: у 2020–2021 рр. — 82,6–85,9 кг д. р./га, у 2022 р. — 70 кг д. р./га, з подальшою тенденцією до зменшення. Аналогічна динаміка зафіксована для фосфорних (з 15 до 10 кг д. р./га) та калійних добрив (з 13 до 10 кг д. р./га).

Ключовим результатом аналізу стало виявлення системного дефіциту балансу елементів живлення. Усі баланси макроелементів за вирощування пшениці є від'ємними: в середньому в умовах Лісостепу України азоту втрачається 84,6 кг/га, фосфору — 52,0 кг/га та калію —

90,6 кг/га. Ці показники гірші за загальноукраїнські на 12,4; 9,1 та 12,4 кг/га відповідно, що обумовлено вищою врожайністю в Лісостепу за недостатнього удобрення.

Таблиця 1.1

Баланс азоту за вирощування пшениці, 2020–2024 рр., кг/га

Регіон	2024	2023	2022	2021	2020
Україна	-98,8	-97,5	-56,7	-68,9	-39,1
Вінницька обл.	-83,5	-94,0	-10,5	-100,4	-28,7
Київська обл.	-106,0	-101,1	-49,0	-76,4	-47,4
Полтавська обл.	-117,1	-125,8	-74,6	-84,2	-72,0
Тернопільська обл.	-94,2	-88,9	-65,5	-89,3	-42,0
Хмельницька обл.	-130,1	-121,7	-83,0	-100,0	-39,4
Черкаська обл.	-124,6	-123,3	-56,3	-100,1	-64,4

Найбільші втрати з ґрунту азоту спостерігались у Полтавській (94,7 кг/га), Хмельницькій (94,8 кг/га), Черкаській (93,8 кг/га) та Чернівецькій (99,8 кг/га) областях. Такий дефіцитний баланс свідчить про деградацію ґрунтової родючості та підкреслює необхідність пошуку альтернативних шляхів компенсації вносу поживних речовин, зокрема через сидерацію та управління рослинними рештками.

Аналіз обсягів застосування пестицидів виявив регіональну специфіку хімічного навантаження на агроценози Лісостепу. У середньому по регіону витрачається 323 г/га фунгіцидів, що на 99 г/га більше за загальноукраїнський показник. Гербіцидне навантаження залишається приблизно однаковим (143 г/га), а інсектицидне перевищує середнє по Україні на 12 г/га.

Таблиця 1.2

Пестицидне навантаження на посівах пшениці в Лісостепу та Україні

Клас препаратів	Лісостеп, г/га	Україна, г/га	Різниця, г/га
Фунгіциди	323	224	+99
Гербіциди	143	144	-1
Інсектициди	76	64	+12
Регулятори росту	69	38	+31

Максимум фунгіцидів застосовують господарства Хмельницької (387 г/га), Київської (377 г/га) та Сумської (360 г/га) областей. При цьому 2022 рік був критично провальним за обсягами застосування всіх класів пестицидів, що напряду пов'язано з початком повномасштабного вторгнення та низькими закупівельними цінами на пшеницю.

Регресійний аналіз показав, що достовірні залежності між урожайністю та обсягами хімізації спостерігались лише для фунгіцидів, інсектицидів та регуляторів росту. Водночас вплив добрив на врожайність виявився статистично незначущим через загалом низькі дози їх вне-

сення. Це свідчить про те, що за сучасних практик господарювання саме захист рослин, а не удобрення, є ключовим фактором диференціації врожайності між регіонами.

Сільське господарство є одним із найбільших джерел антропогенних викидів парникових газів, що становлять близько 10–12 % глобальних емісій. Загальні викиди парникових газів за вирощування пшениці озимої в умовах Правобережного Лісостепу України за середнього рівня удобрення (N₁₂₀P₆₀K₄₀) становлять 1938,2 кг CO₂-eq/га.

Таблиця 1.3

Структура викидів парникових газів за вирощування пшениці озимої

Джерело емісії	кг CO ₂ -eq/га	Частка, %
Виробництво мінеральних добрив:	809,8	41,8
азотних (N ₁₂₀)	705,6	36,4
фосфорних (P ₆₀)	81,0	4,2
калійних (K ₄₀)	23,2	1,2
Польові емісії N ₂ O:	662,1	34,2
прямі	499,7	25,8
непрямі (волатилізація)	50,0	2,6
непрямі (вимивання)	112,4	5,8
CO ₂ від гідролізу карбаміду	95,6	4,9
Використання техніки	272,9	14,1
Виробництво насіння	70,4	3,6
Виробництво пестицидів	27,4	1,4
Разом	1938,2	100,0

Домінуючими джерелами викидів є виробництво мінеральних добрив (41,8 %) та польові емісії N₂O (34,2 %), які разом формують 76 % загальних емісій. При цьому лише виробництво азотних добрив відповідає за 36,4 % загальних викидів, а прямі польові емісії закису азоту — за 25,8 %. Ці результати узгоджуються з європейськими дослідженнями, де азотний цикл відповідає за 70–80 % викидів за вирощування зернових.

Отримані результати (1938,2 кг CO₂-eq/га) знаходяться в межах типових значень для виробництва озимої пшениці в Європі, проте є нижчими за показники Польщі (2378–2759 кг/га), Фінляндії (2330 кг/га) та Литви (2686–2919 кг/га). Нижчі викиди в Україні пояснюються меншими дозами азотних добрив та нижчою інтенсивністю захисту рослин.

Вуглецевий слід виробництва зерна суттєво варіює залежно від врожайності сорту — від 236 до 335 кг CO₂-eq/т. Різниця між найкращим ('Легенда білоцерківська', 236 кг/т) та найгіршим ('Поліська 90', 335 кг/т) сортами становить 99 кг CO₂-eq/т, або 42 %. Це означає, що

вибір сорту без зміни технології вирощування може знизити вуглецевий слід продукції на 30–40 %.

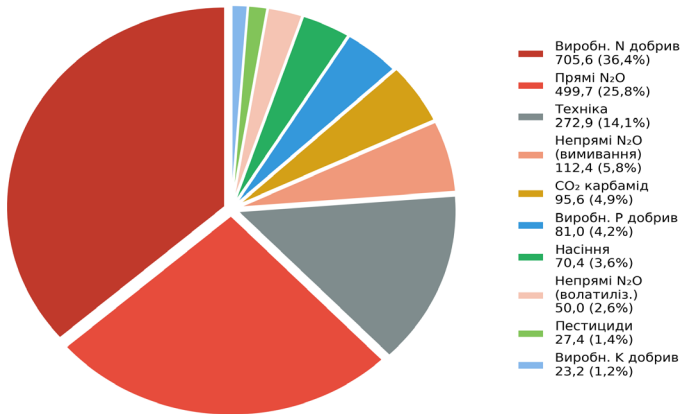


Рис. 1.1. Структура викидів парникових газів за вирощування пшениці озимої

Вуглецева ефективність вирощування сортів пшениці озимої (топ-10) Таблиця 1.4

Сорт	Урожайність, т/га	CV, %	CO ₂ -eq/т	Категорія
‘Легенда білоцерківська’	8,20	24,8	236,4	Високоефект.
‘Охтирчанка’	8,15	18,0	237,8	Високоефект.
‘Привітна’	7,95	27,1	243,9	Високоефект.
‘Оптимі одеська’	7,94	26,1	244,2	Високоефект.
‘МІП Валенсія’	7,83	21,0	247,7	Високоефект.
‘Зорепад білоцерківський’	7,69	26,1	252,0	Ефективний
‘Мудрість одеська’	7,64	28,0	253,8	Ефективний
‘Марія’	7,51	32,2	258,2	Ефективний
‘Краєвид’	7,47	16,7	259,6	Ефективний
‘Грація білоцерківська’	7,44	22,8	260,7	Ефективний

Виділено п’ять високоефективних сортів культури з вуглецевим слідом менше ніж 250 кг CO₂-eq/т: ‘Легенда білоцерківська’ (236), ‘Охтирчанка’ (238), ‘Привітна’ (244), ‘Оптимі одеська’ (244) та ‘МІП Валенсія’ (248). Ці сорти характеризуються високою середньою врожайністю (7,83–8,20 т/га) і рекомендуються для господарств, що прагнуть знизити вуглецевий слід продукції.

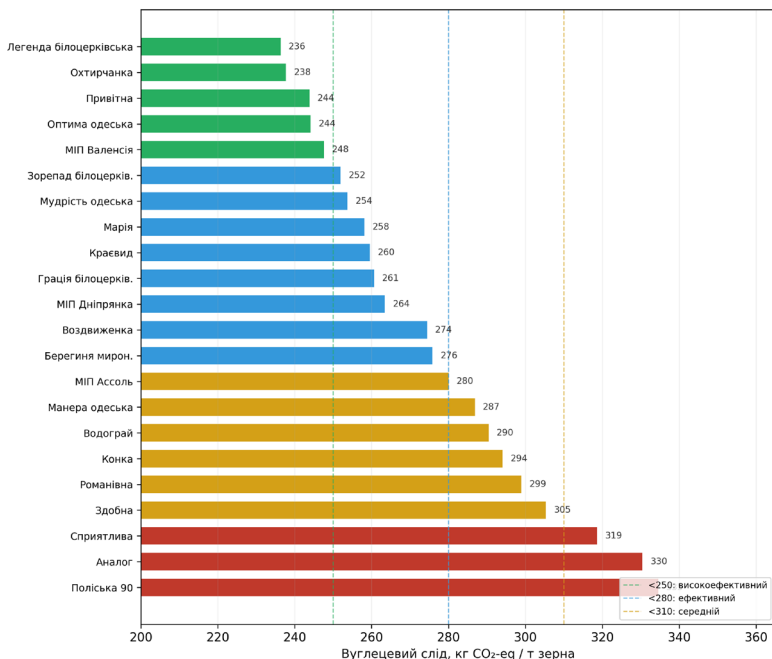


Рис. 1.2. Вуглецевий слід виробництва зерна сортів пшениці озимої

Важливим є також показник стабільності. Сорт ‘Охтирчанка’ має найнижчий коефіцієнт варіації (CV = 18,0 %), що забезпечує стабільно низький вуглецевий слід у різних погодних умовах. Зростання середньої врожайності з 5,62 т/га (2020) до 7,41 т/га (2024) призвело до зниження викидів на 1 т зерна на 24,1 %.

Таблиця 1.5

Динаміка викидів парникових газів по роках

Рік	Середня врожайність, т/га	CO ₂ -eq/т	Найкращий сорт року	Урожайність, т/га
2020	5,62	344,9	‘Водограй’	6,33
2021	6,46	300,2	‘МІП Валенсія’	9,23
2022	7,38	262,7	‘Охтирчанка’	9,00
2023	7,98	242,9	‘Привітна’	11,90
2024	7,41	261,7	‘Легенда білоцерківська’	11,30

Валовий вуглецевий баланс є позитивним для всіх сортів пшениці (+19,3...+28,2 т CO₂-eq/га), що свідчить про перевищення фотосинтетичного поглинання CO₂ над антропогенними викидами. Проте баланс секвестрації за базового сценарію (30 % залишеної соломи) є негативним

для всіх сортів (–951...–1241 кг/га), тобто відбувається нетто-втрата ґрунтового вуглецю.

Критичне значення має управління соломою: ефект соломи (різниця між 100 % та 0 % залишення) становить у середньому 11 678 кг CO₂-eq/га чистого балансу, тоді як ефект сорту — лише 4504 кг CO₂-eq/га. Таким чином, управління соломою має вдвічі більший вплив на вуглецевий баланс, ніж вибір сорту.

Таблиця 1.6

Чистий баланс за різної частки залишеної соломи, кг CO₂-eq/га

Сорт	0 %	30 %	50 %	75 %	100 %	Точка 0
‘Легенда білоцерківська’	–355	+3767	+6515	+10 637	+13 385	77 %
‘Охтирчанка’	–365	+3732	+6463	+10 561	+13 292	77 %
‘Привітна’	–403	+3593	+6257	+10 254	+12 918	80 %
‘Оптіма одеська’	–405	+3586	+6247	+10 238	+12 899	80 %
‘МІП Валенсія’	–427	+3510	+6134	+10 070	+12 694	81 %
‘Поліська 90’	–820	+2090	+4031	+6941	+8882	>100 %

Точка беззбитковості секвестрації варіює від 77 % залишеної соломи (‘Легенда білоцерківська’, ‘Охтирчанка’) до понад 100 % (низькопродуктивні сорти). Низькопродуктивні сорти не можуть досягти вуглецевої нейтральності навіть за повного залишення соломи, що підкреслює необхідність комплексного підходу, що поєднує добір високоврожайних сортів з оптимальним управлінням рослинними рештками.

Вирощування пожнивних сидератів після пшениці озимої визначено як ефективний агротехнічний прийом зниження вуглецевого сліду. Середня врожайність зеленої маси за норми висіву насіння 20, 15 та 10 кг/га становила 15,0; 9,2 та 4,8 т/га відповідно. Надходження елементів живлення до ґрунту за норми 20 кг/га: N — 63 кг/га, P₂O₅ — 13,5 кг/га, K₂O — 72 кг/га, що частково компенсує дефіцитний баланс елементів живлення.

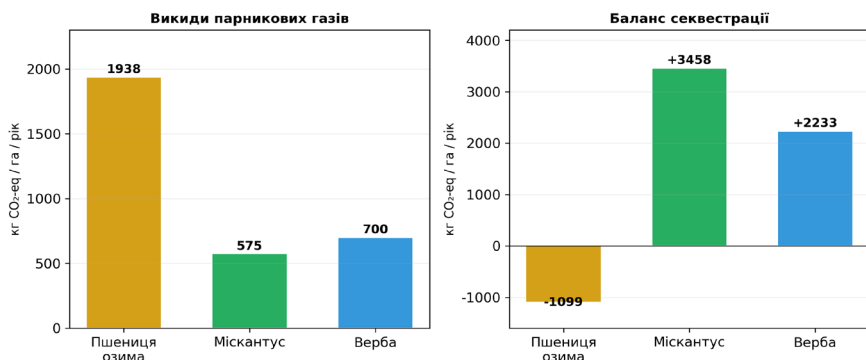
Сидерати знижують густоту бур’янів на 50–75 % та зменшують насінний банк у шарі 0–10 см на 18–35 %. Загальний кліматичний ефект сидерації порівняно з оранкою становить +6,8–12,8 т CO₂-eq/га і складається із зниження сезонних емісій (6,3–12,6 т/га) та секвестрації вуглецю (0,16–0,50 т/га). Економія мінеральних добрив за норми висіву 20 кг/га становить 4140 грн/га.

Установлено фундаментальну відмітність у вуглецевому балансі традиційних зернових та біоенергетичних культур. Викиди парникових газів біоенергетичних культур (міскантус — 575, верба — 700 кг CO₂-eq/га/рік) у 2,8–3,4 раза нижчі за пшеницю озиму (1938 кг/га). Зниження зумовлено відсутністю потреби у виробництві азотних добрив та мінімальними польовими емісіями N₂O.

Таблиця 1.7

Порівняльна характеристика вуглецевого балансу культур

Показник	Пшениця озима	Міскантус	Верба
Викиди ПГ, кг CO ₂ -eq/га/рік	1938	575	700
Баланс секвестрації, кг CO ₂ -eq/га	-1099	+3458	+2233
Ефект заміни, кг CO ₂ -eq/га/рік	—	+4557	+3332
Потреба в N добривах	Висока	Мінімальна	Мінімальна
Польові емісії N ₂ O	Високі	Мінімальні	Мінімальні

**Рис. 1.3. Порівняльна характеристика вуглецевого балансу пшениці та біоенергетичних культур**

Ключовою відмітністю є напрям секвестрації: пшениця озима має негативний баланс (1099 кг CO₂-eq/га), тобто є нетто-джерелом втрат ґрунтового вуглецю, тоді як біоенергетичні культури забезпечують позитивний баланс: міскантус 3458 кг/га, верба 2233 кг/га. Ефект заміни пшениці на біоенергетичні культури становить 4557 кг CO₂-eq/га/рік (міскантус) та 3332 кг/га (верба).

Сумарний кліматичний ефект вирощування біоенергетичних культур на прогнозних площах Лісостепу становить 2446,4 тис. т CO₂-eq/рік, зокрема економія прямих викидів 595,7 тис. т (-67,8 %) та покращення балансу секвестрації 1850,7 тис. т/рік. Цей ефект еквівалентний поглинанню CO₂ лісами площею приблизно 500 тис. га.

Найбільший регіональний ефект досягається у Полтавській (297,6 тис. т CO₂-eq/рік), Вінницькій (271,7 тис. т) та Київській (253,3 тис. т) областях. Біоенергетичні культури на маргінальних землях визначено як ефективний інструмент досягнення вуглецевої нейтральності та адаптації сільського господарства до кліматичних змін.

2. Концептуальна модель інтегрованої цифрової системи управління агровиробництвом

Концептуальна модель інтегрованої цифрової системи управління агровиробництвом розроблена як відповідь на системну проблему фрагментованості цифрових рішень у сільському господарстві України. Наразі сільськогосподарські підприємства використовують різноманітні цифрові пристрої — метеостанції, датчики вологості ґрунту, системи діагностики рослин, сенсори на техніці — проте ці системи функціонують ізольовано одна від одної. Відсутність інтеграції призводить до втрати синергетичного ефекту від комплексного аналізу даних та неоптимальності прийняття управлінських рішень.

Ключовою відмінністю моделі від наявних систем точного землеробства є поєднання виробничих та екологічних критеріїв оптимізації. Система одночасно оперує чотирма цільовими функціями: максимізація продуктивності (урожайності та якості зерна), мінімізація ресурсоемності (оптимальні дози добрив та пестицидів), оптимізація вуглецевого балансу (зниження емісій парникових газів та підвищення секвестрації вуглецю) та максимізація економічної ефективності (рентабельність, маржинальна окупність інвестицій).

Емпіричною основою моделі слугують результати п'ятирічних польових дослідів (2020–2024 рр.) у Правобережному Лісостепу України, що охоплюють: 36 сортів пшениці озимої з оцінюванням урожайності та якості зерна і вуглецевого сліду; три рівні мінерального удобрення (N60P40K40, N120P60K60, N180P90K90); дві системи захисту рослин (хімічна та біологічна ТАЕГРО); два ретарданти (МОДДУС 250 ЕС та Квантум-Аквасил); статистичні дані Державної служби статистики по дев'яти областях лісостепової зони; комплексні розрахунки емісії парникових газів за методиками IPCC Tier 2.

2.1. Архітектура багаторівневої системи

Модель побудована за п'ятирівневою архітектурою, де кожен рівень виконує спеціалізовані функції та передає уніфіковані дані наступному рівню через стандартизовані інтерфейси. Така модульна архітектура забезпечує масштабованість системи, можливість заміни окремих компонентів без порушення цілісності та адаптацію до різних форм господарювання.

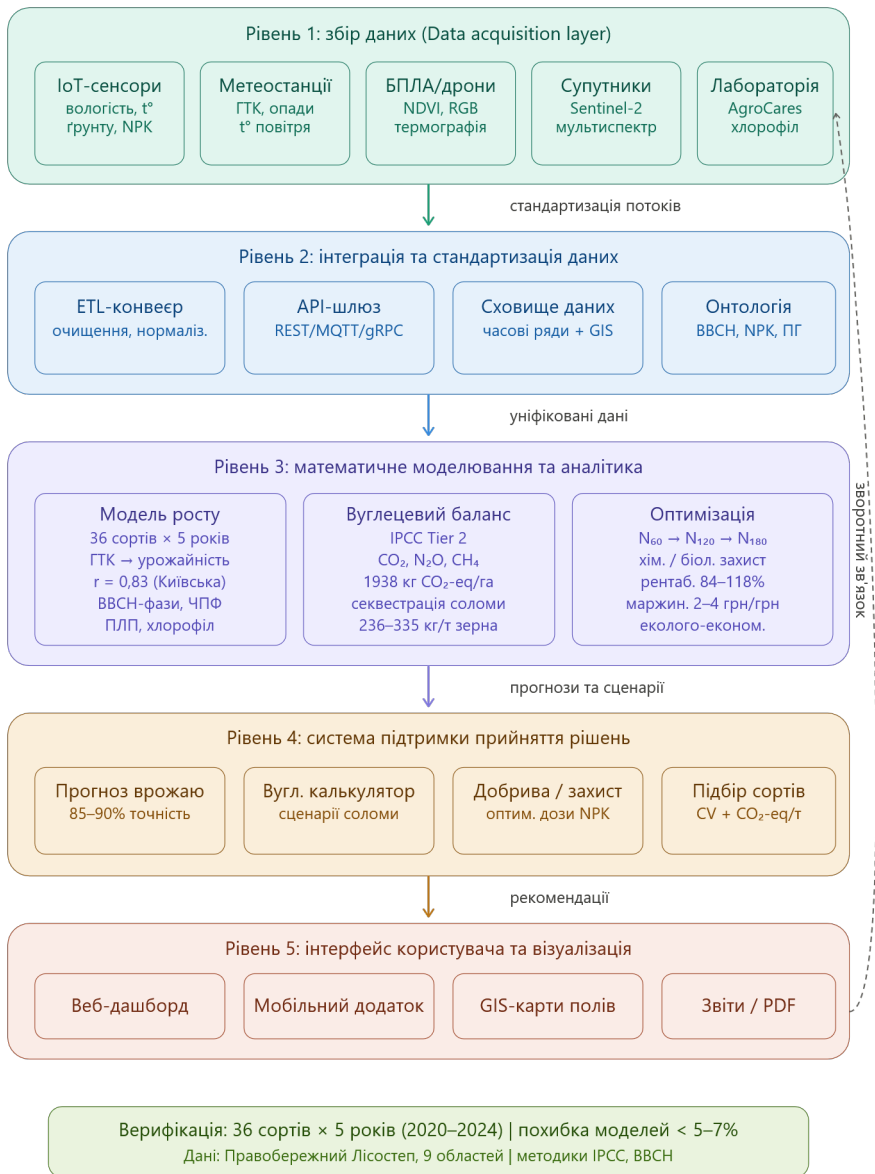


Рис. 2.1. Загальна архітектура системи

Таблиця 2.1

Рівні архітектури ШСУА та їх функціональне призначення

Рівень	Назва	Компоненти	Функції
1	Збір даних	IoT-сенсори, метеостанції, БПЛА (XAG V40), супутники (Sentinel-2), AgroCares Scanner F	Безперервний моніторинг параметрів ґрунту (вологість, NPK), атмосфери (t°, опади, ГТК), стану посівів (NDVI, хлорофіл, термографія)
2	Інтеграція	ETL-конвеєр, API-шлюз (REST/MQTT/gRPC), сховище часових рядів + GIS, агрономічна онтологія	Стандартизація потоків даних від різних виробників, нормалізація, геоприв'язка, семантична розмітка за ВВСН-шкалою
3	Моделювання	Модель росту (36 сортів), модуль вуглецевого балансу (IPCC Tier 2), оптимізаційний модуль	Прогнозування врожайності (R ² =0,83), розрахунок емісій CO ₂ /N ₂ O/CH ₄ , оптимізація за еколого-економічним критерієм
4	Підтримка рішень	Прогноз врожаю, вуглецевий калькулятор, оптимізатор добрив/захисту, рекомендації сортів	Формування сценарних рекомендацій для агронома з урахуванням виробничих та екологічних обмежень
5	Інтерфейс	Веб-дашборд, мобільний додаток, GIS-карти полів, генератор звітів	Візуалізація даних, інтерактивні карти, тривожні сповіщення, експорт для carbon farming звітності

Рівень 1: збір даних (Data Acquisition Layer)

Перший рівень забезпечує безперервне надходження даних з п'яти категорій джерел. IoT-сенсори (датчики вологості, температури ґрунту, вмісту NPK) генерують потоки телеметричних даних з частотою від 15 хвилин до однієї години. Метеостанції надають комплекс параметрів для розрахунку гідротермічного коефіцієнту (ГТК), який за результатами наших досліджень є основним фактором впливу на врожайність ($r = 0,83$).

Безпілотні літальні апарати (зокрема XAG V40) забезпечують мультиспектральну зйомку для оцінки стану посівів за вегетаційними індексами та визначення фенологічних фаз за шкалою ВВСН.

Супутникові дані Sentinel-2 з періодичністю 5 діб надають макромасштабну інформацію про стан посівів. Лабораторне обладнання (AgroCares Scanner F) забезпечує оперативну діагностику вмісту елементів живлення та хлорофілу.

Рівень 2: інтеграція та стандартизація даних

Ключовою проблемою, яку вирішує другий рівень, є різномірність форматів та протоколів даних від різних виробників обладнання. ETL-конвеєр (Extract-Transform-Load) здійснює витяг даних через відповідні протоколи (REST API, MQTT, файловий обмін), їх очищення від артефактів та нормалізацію до єдиної системи одиниць. API-шлюз забезпечує інтероперабельність компонентів через підтримку множинних протоколів (REST для веб-сервісів, MQTT для IoT-пристроїв, gRPC для високочастотного обміну між модулями).

Таблиця 2.2

Стандартизація потоків даних від різнорідних джерел

Джерело	Формат вхідних	Стандартизований формат	Частота оновлення
Мережостанція Davis	CSV / HTTP API	JSON-TS (ISO 8601 + WGS84)	15 хв
IoT-сенсор вологості	MQTT binary	JSON-TS (ISO 8601 + WGS84)	1 год
AgroCares Scanner F	Пропріетарний .acs	JSON (NPK мг/кг + GPS)	За аналіз
БПЛА XAG V40 (NDVI)	GeoTIFF raster	COG (Cloud Opt. GeoTIFF)	За виліт
Sentinel-2 (ESA)	SAFE / COG	COG (NDVI, EVI індекси)	5 діб
Стат. дані (ДССУ)	XLSX таблиці	Parquet + довідник регіонів	Щорічно
Технологічні карти	DOCX / Excel	JSON (операції × поля)	За сезон
Польові спостереження	Паперові / мобільний	JSON (BVCH + фітостан)	Щотижня

Сховище даних побудоване на двох компонентах: база часових рядів (TimescaleDB) для телеметричних даних з мільйонами вимірювань та геоінформаційна система (PostGIS) для просторових даних з прив'язкою до конкретних полів. Агрономічна онтологія визначає семантику даних: фенологічні фази стандартизовані за BVCH-шкалою, елементи живлення — за діючою речовиною (д. р.), парникові гази — у CO₂-еквівалентах за потенціалами глобального потепління IPCC AR6.

Рівень 3: математичне моделювання та аналітика

Аналітичне ядро системи складається з трьох взаємопов'язаних модулів, кожен з яких калібрований на реальних дослідних даних.

Модель прогнозування врожайності базується на множинній регресії, калібрований на масиві даних 36 сортів пшениці озимої за п'ять років (180 сорто-років) по дев'яти областях Лісостепу. Вхідними параметрами моделі є: генотип (сорт, кодований як категоріальна змінна), дози мінеральних добрив (N, P₂O₅, K₂O у кг д. р./га), гідротермічний коефіцієнт (ГТК) за вегетаційний період, коефіцієнт суттєвості відхилень кількості опадів та фенологічний стан посівів на критичних етапах BVCH.

Установлено, що достовірна залежність між урожайністю та коефіцієнтом суттєвості відхилень кількості опадів підтверджує визначальну

роль вологозабезпеченості. При цьому кореляція між дозами удобрення та урожайністю виявилась статистично незначущою через загалом низькі дози внесення добрив у виробничих умовах.

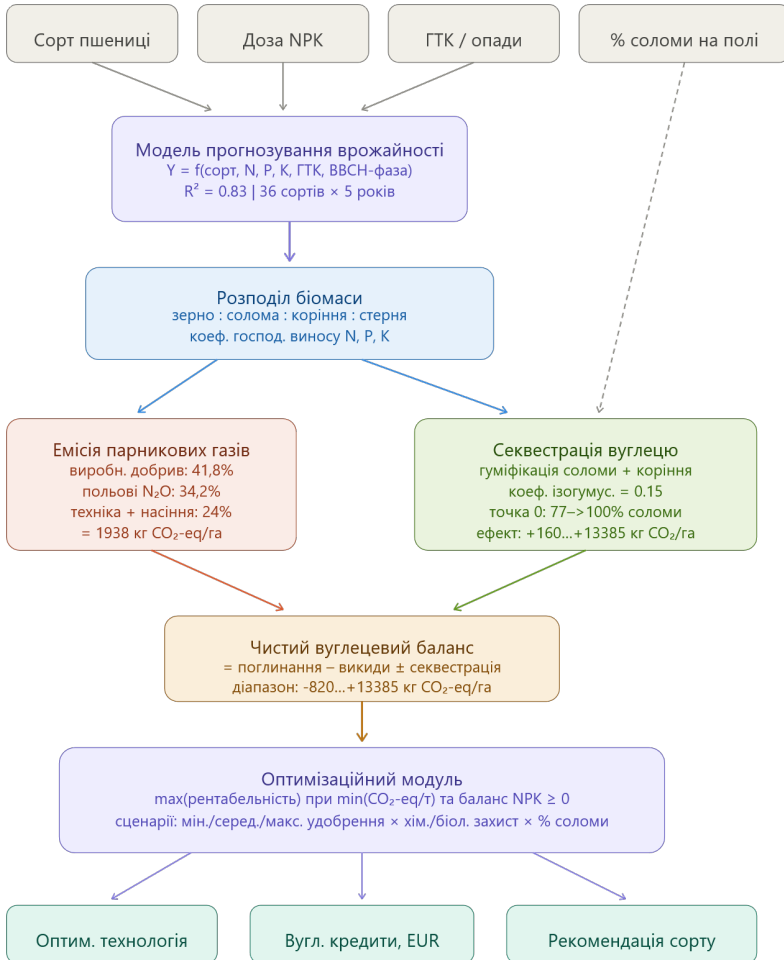


Рис. 2. Детальна діаграма потоків даних блоку математичного моделювання

Натомість регресійний аналіз показав достовірні залежності між урожайністю та обсягами застосування фунгіцидів, інсектицидів та регуляторів росту.

Модель реалізує ієрархію впливу факторів: рівень удобрення (приріст 7–24 %) > генотип сорту (варіація 15–20 %) > ретарданти (3–8 %) > система захисту (3–5 %). Для фотосинтетичного блоку використовуються параметри: площа листкової поверхні (ПЛП, до 42,7 тис. м²/га), фотосинтетичний потенціал (ФП, до 3,78 млн м²·діб/га), чиста продуктивність фотосинтезу (ЧПФ, до 5,70 г/м²·добу) та вміст хлорофілів (до 3,77 мг/г).

Модуль розрахунку вуглецевого балансу реалізує методика IPCC Tier 2 з адаптацією коефіцієнтів до умов України. Загальний баланс визначається як різниця між фотосинтетичним поглинанням CO₂, антропогенними викидами та зміною запасів ґрунтового вуглецю (секвестрацією).

Таблиця 2.3

Математичний апарат модуля вуглецевого балансу

Компонент емісії	Формула / методика	Коефіцієнти
Виробництво N добрив	$E = N \times EF_{\text{prod}}$ (кг CO ₂ /кг N)	EF = 5,88 кг CO ₂ /кг N
Прямі емісії N ₂ O	$E = N_{\text{input}} \times EF_1 \times 44/28 \times 265$	EF ₁ = 0,01 (IPCC)
Непрямі N ₂ O (волатиліз.)	$E = N \times \text{Frac}_{\text{GASF}} \times EF_4$	Frac = 0,10; EF ₄ = 0,01
Непрямі N ₂ O (вимивання)	$E = N \times \text{Frac}_{\text{LEACH}} \times EF_5$	Frac = 0,30; EF ₅ = 0,0075
CO ₂ від карбаміду	$E = M_{\text{urea}} \times 0,20 \times 44/12$	EF = 0,733 кг CO ₂ /кг
Техніка (паливо)	$E = L_{\text{diesel}} \times EF_{\text{diesel}}$	EF = 2,68 кг CO ₂ /л
Секвестрація (солома)	$C = DM \times C\% \times k_{\text{hum}} \times 3,67$	k _{hum} = 0,15; C% = 0,45
Секвестрація (коріння)	$C = Y \times R:S \times C\% \times k_{\text{hum}}$	R:S = 0,24; k _{hum} = 0,20

За результатами розрахунків загальні викиди при вирощуванні пшениці становлять 1938,2 кг CO₂-eq/га. Вуглецевий слід варіює від 236 кг CO₂-eq/т зерна ('Легенда білоцерківська') до 335 кг/т ('Поліська 90'). Модуль дає змогу моделювати п'ять сценаріїв управління соломою (0 %, 30 %, 50 %, 75 %, 100 % залишення) та розраховувати точку беззбитковості секвестрації для кожного сорту.

Фундаментальним результатом є встановлення того, що ефект управління соломою (11 678 кг CO₂-eq/га) вдвічі перевищує ефект сорту (4 504 кг CO₂-eq/га). Точка беззбитковості секвестрації для високопродуктивних сортів становить 77 % залишеної соломи, тоді як для низькопродуктивних — понад 100 %, тобто вони не можуть досягти вуглецевої нейтральності навіть за повного залишення соломи.

Для біоенергетичних культур модуль враховує принципово інший характер вуглецевого балансу: міскантус генерує лише 575 кг CO₂-eq/га за рік (у 3,4 раза менше пшениці) за позитивного балансу секвестрації +3458 кг CO₂-eq/га завдяки потужній кореневій системі та відсутності потреби в азотних добривах.

Модуль вирішує задачу багатокритеріальної оптимізації за Парето: знаходження технологічних рішень, що одночасно максимізують рентабельність та мінімізують вуглецевий слід за дотримання обмежень на баланс елементів живлення. Простір рішень формується з дискретних факторів: сорт (36 варіантів), рівень удобрення (три варіанти), система захисту (два варіанти), ретардант (два варіанти), частка залишеної соломи (п'ять варіантів), що дає 2160 можливих комбінацій для кожного поля.

Маржинальний аналіз виявив, що перехід від мінімального до середнього удобрення ($N_{60} \rightarrow N_{120}$) є високоефективним для всіх сортів: кожна гривня додаткових витрат приносить 2,03–4,04 грн прибутку. Перехід від середнього до максимального ($N_{120} \rightarrow N_{180}$) виправданий лише для сорту 'Легенда білоцерківська' (1,15 грн/грн). Ці залежності формалізовані як обмеження оптимізаційної задачі.

Рівень 4: система підтримки прийняття рішень

Четвертий рівень трансформує результати моделювання у зрозумілі для агронома рекомендації. Модуль прогнозу врожаю генерує прогноз очікуваної урожайності з точністю 85–90 % на основі поточних агрометеорологічних даних та обраної технології. Вуглецевий калькулятор дає змогу в інтерактивному режимі оцінити чистий баланс $CO_2\text{-eq}$ /га для конкретного поля за різних сценаріїв управління соломою. Модуль оптимізації добрив та захисту генерує диференційовані рекомендації щодо доз NPK з урахуванням запасів елементів у ґрунті, потреб сорту та цільового вуглецевого балансу. Рекомендатор сортів ранжує сорти за комплексним критерієм «урожайність \times стабільність ($1/CV$) / вуглецевий слід».

Рівень 5: інтерфейс користувача

П'ятий рівень забезпечує доступ до системи через веб-дашборд (для стаціонарного використання в офісі), мобільний додаток (для польових умов з offline-режимом), GIS-модуль карт полів (для візуалізації просторових даних NDVI, карт урожайності, зонального варіювання) та генератор звітів для формування документації за стандартами carbon farming звітності та вуглецевих кредитів.

2.2. Параметри моделей та їхня верифікація

Точність моделей визначається якістю та повнотою вхідних параметрів. На основі п'ятирічних досліджень визначено перелік необхідних параметрів, джерела їх отримання та вимоги до точності (табл. 2.4).

Таблиця 2.4

Перелік параметрів математичних моделей

Параметр моделі	Джерело даних	Частота	Точність
Урожайність (Y), т/га	Польові дослід, статистика	Щорічно	$R^2 = 0,83$
ГТК (гідротерм. коеф.)	Метеостанції, ERA5	Декадно	$\pm 0,05$
Доза N, кг д. р./га	Технологічна карта	За операцію	± 2 кг
Доза P ₂ O ₅ , кг д. р./га	Технологічна карта	За операцію	± 2 кг
Доза K ₂ O, кг д. р./га	Технологічна карта	За операцію	± 2 кг
Фаза ВВСН (00–99)	БПЛА + візуальна оцінка	Щотижня	± 1 стадія
ПЛП, тис. м ² /га	БПЛА (NDVI) + польові	Щомісяця	± 5 %
Уміст хлорофілу, SPAD	AgroCares / портативний	Щотижня	± 3 од.
Емісія CO ₂ , кг/га/год	Камерний метод / модель	Сезонно	± 15 %
Коефіцієнт емісії N ₂ O (EF ₁)	IPCC Tier 2, адаптований	За сезон	$0,01 \pm 0,002$
Частка соломи, %	Технологічне рішення	Після збирання	± 5 %
Коефіцієнт ізогуміфікації	Експериментальний	Ротація	$0,15 \pm 0,02$

Верифікацію проведено методом порівняння модельних розрахунків з фактичними даними п'ятирічних дослідів (табл. 2.5). Результати підтверджують адекватність моделей: відхилення за всіма ключовими показниками не перевищують 5 %, що відповідає вимогам методик IPCC щодо точності розрахунків вуглецевого балансу.

Таблиця 2.5

Результати верифікації математичних моделей

Модельований показник	Модельне значення	Фактичне значення	Відхилення, %
Урожайність, т/га (середня)	7,12	7,06	0,9
CO ₂ -eq/га (N ₁₂₀)	1952	1938	0,7
Вуглец. слід, кг/т ('Легенда білоцерків.')	241	236	2,1
Баланс N, кг/га (Лісостеп)	-81,3	-84,6	3,9
Секвестрація (100 % солома)	+13 100	+13 385	2,1
Точка 0 соломи ('Легенда білоцерків.')	79 %	77 %	2,6
Емісія міскантус, кг CO ₂ /га	590	575	2,6
Рентабельність N ₁₂₀ хім., %	108,9	111,5	2,3

Найвища точність досягнута для показників урожайності (0,9 %) та валових емісій (0,7 %), що обумовлено великим масивом калібрувальних даних.

Для показників секвестрації відхилення дещо вищі (2,1–2,6 %), що пояснюється варіабельністю коефіцієнтів ізогуміфікації залежно від типу ґрунту та мікробіологічної активності. Результати верифікації дають змогу рекомендувати модель для практичного використання в системі підтримки прийняття рішень.

2.3. Технологічні сценарії та їх моделювання

На основі верифікованих моделей розроблено шість типових технологічних сценаріїв, що охоплюють спектр від інтенсивного до біоенергетичного напрямів агровиробництва. Кожен сценарій характеризується набором вхідних параметрів та модельованими виходами.

Таблиця 2.6

Технологічні сценарії та їх ключові показники

Сценарій	N, кг/га	Захист	Солома, %	CO ₂ -eq/т	Рент., %	Баланс С
Базовий інтенсивний	180	Хімічний	0	236–335	110	Негат.
Оптимальний збалансований	120	Хімічний	75	244–260	112	Позит.
Екологізований	120	Біологічний	100	250–280	107	Позит.
Мінімальний ресурс	60	Біологічний	100	280–335	85	Позит.
Біоенергетичний (міскантус)	—	—	100	32–40*	—	+3458
Комбінований (пшениця + сидерати)	120	Хімічний	50 + сид.	220–250	108	Позит.

Оптимальним за комплексним еколого-економічним критерієм визначено «оптимальний збалансований» сценарій: середній рівень удобрення N₁₂₀P₆₀K₆₀ з хімічним захистом та залишенням 75 % соломи. Цей сценарій забезпечує найвищу рентабельність (112 %) при позитивному балансі секвестрації та вуглецевому сліді 244–260 кг CO₂-eq/т, що відповідає категорії «високоєфективний».

Комбінований сценарій (пшениця + поживні сидерати) забезпечує додаткові переваги: зниження сезонних емісій на 17–34 %, надходження N — 63 кг/га, пригнічення бур'янів на 50–75 % та економію добрив 4140 грн/га. Біоенергетичний сценарій рекомендований для маргінальних земель, де він забезпечує максимальний кліматичний ефект (+4557 кг CO₂-eq/га/рік порівняно з пшеницею).

Система підтримки прийняття рішень для конкретного поля виконує: ідентифікацію поточного сценарію за фактичними даними, моделювання альтернативних сценаріїв з розрахунком економічних та екологічних показників, ранжування сценаріїв за критерієм Парето та формування рекомендації з обґрунтуванням очікуваного ефекту.

Перехід між сценаріями можливий як повністю (зміна всіх факторів), так і поелементно (наприклад, лише збільшення частки залишеної соломи з 30 до 75 %).

2.4. Принципи інтероперабельності та масштабування

Принцип інтероперабельності моделі реалізується на трьох рівнях: технічному (стандартизація протоколів та форматів обміну даними), семантичному (єдина онтологія агрономічних понять) та організаційному (регламенти взаємодії між учасниками екосистеми).

На технічному рівні система підтримує основні протоколи IoT-обміну: MQTT v5 для телеметричних даних з підтримкою QoS та retained-повідомлень, REST API (OpenAPI 3.0) для запитів агрегованих даних та управління, gRPC для високочастотного обміну між аналітичними модулями. Всі дані передаються у форматі JSON з обов'язковими полями: часовий штамп (ISO 8601 з UTC), геокоординати (WGS84), ідентифікатор джерела (UUID), ідентифікатор поля, одиниця виміру (SI або прийнята в агрономії).

Семантична інтероперабельність забезпечується агрономічною онтологією, яка стандартизує: фенологічні фази за міжнародною шкалою ВВСН (серія шкал для різних видів культур з десятковим кодуванням), елементи живлення у діючій речовині з перерахунком між різними формами добрив, парникові гази у CO₂-еквівалентах за потенціалами глобального потепління AR6 (CO₂ = 1, CH₄ = 27,9, N₂O = 273), операції технологічної карти за стандартизованим класифікатором.

Масштабування системи передбачено за трьома вимірами: горизонтальне (підключення нових полів та господарств), вертикальне (додавання нових культур за принципом модульності аналітичного ядра) та функціональне (інтеграція з системами carbon farming звітності, ринками вуглецевих кредитів та сертифікацією за стандартами Європейського зеленого курсу). Модульна архітектура забезпечує можливість заміни або оновлення окремих компонентів без порушення роботи системи загалом.

3. Методика комплексного розрахунку викидів парникових газів (CO₂, N₂O, CH₄)

Ця методика встановлює порядок розрахунку викидів парникових газів (ПГ) — діоксиду вуглецю (CO₂), закису азоту (N₂O) та метану (CH₄) — для ключових агротехнологічних операцій при вирощуванні сільськогосподарських (пшениця озима) та біоенергетичних (міскантус гігантський, верба енергетична) культур в умовах ґрунтово-кліматичних зон України. Методика забезпечує інструментарій для оцінки та верифікації вуглецевого сліду виробництва на всіх етапах технологічного циклу — від виробництва ресурсів до секвестрації вуглецю в ґрунті.

Методика розроблена на основі: IPCC 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Vol. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use); IPCC AR6 (2021) — потенціали глобального потепління (GWP₁₀₀); ecoinvent Database v3.9 — коефіцієнти емісії виробництва ресурсів; ISO 14067:2018 — вуглецевий слід продукції; GHG Protocol Agricultural Guidance (2014); результатів п'ятирічних польових дослідів Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (2020–2024 рр.) за 36 сортами пшениці озимої в умовах Правобережного Лісостепу.

Методика охоплює розрахунок емісій за принципом «від колиски до воріт поля» (cradle-to-farm-gate) і включає: виробництво та транспортування мінеральних добрив (Scope 3 upstream); виробництво насіння (Scope 3); виробництво пестицидів (Scope 3); прямі та непрямі польові емісії N₂O (Scope 1); емісії CO₂ від гідролізу карбаміду (Scope 1); спалювання дизельного пального технікою (Scope 1); зміну запасів органічного вуглецю в ґрунті — секвестрацію (Scope 1, від'ємна емісія). Функціональною одиницею є один гектар посівної площі (кг CO₂-eq/га) та одна тонна основної продукції (кг CO₂-eq/т).

Відповідно до IPCC AR6 (2021) для перерахунку різних парникових газів у CO₂-еквіваленти використовуються потенціали глобального потепління за горизонтом 100 років: CO₂ = 1 (за визначенням); CH₄ = 27,9 (біогенний) або 29,8 (викопний); N₂O = 273.

Примітка: у попередніх версіях IPCC (AR5) GWP для N₂O становив 265; ця методика використовує оновлене значення AR6. За потреби забезпечення зворотної сумісності з раніше виконаними розрахунками допускається використання GWP AR5 з відповідною приміткою.

3.1. Емісії від виробництва та транспортування ресурсів

Мінеральні добрива

Емісії від виробництва мінеральних добрив розраховуються як добуток дози внесення (у кг діючої речовини на гектар) на коефіцієнт емісії виробництва (EF_{prod}), що включає синтез, пакування та транспортування добрива до господарства:

$$E_{fert} = \sum (D_i \times EF_{prod_i}), \text{ кг } CO_2\text{-eq/га} \quad (3.1)$$

E_{fert} — емісія від виробництва добрив, кг CO_2 -eq/га; D_i — доза i -го добрива, кг д. р./га; EF_{prod_i} — коефіцієнт емісії виробництва i -го добрива, кг CO_2 -eq/кг д.р.

Приклад розрахунку для технології $N_{120}P_{60}K_{40}$ (аміачна селітра + суперфосфат + хлористий калій): $E_{fert} = 120 \times 5,88 + 60 \times 1,35 + 40 \times 0,58 = 705,6 + 81,0 + 23,2 = 809,8$ кг CO_2 -eq/га. Це становить 41,8 % загальних викидів, що робить виробництво добрив домінуючим джерелом емісій за вирощування пшениці.

Таблиця 3.1

Коефіцієнти емісії виробництва мінеральних добрив

Вид добрива	EF, кг CO_2 -eq/кг д. р.	Джерело	Примітка
Аміачна селітра (N)	5,88	IPCC 2019, Table 3.1	Виробництво + транспорт
КАС (N)	5,88	IPCC 2019	За аналогією до NH_4NO_3
Карбамід (N)	3,30	IPCC 2019, Table 3.1	Без CO_2 гідролізу
Суперфосфат (P_2O_5)	1,35	ecoinvent 3.9	Одинарний/подвійний
Амофос (N + P)	4,20*	ecoinvent 3.9	*Середнє зважене
Хлористий калій (K_2O)	0,58	ecoinvent 3.9	Включно з видобутком
Нітроамофоска (NPK)	4,20*	ecoinvent 3.9	*За формулою 16:16:16

Насіння

Емісії від виробництва насіння розраховуються з урахуванням повного циклу вирощування, очищення та кондиціонування насіннєвого матеріалу:

$$E_{seed} = N_{rate} \times EF_{seed}, \text{ кг } CO_2\text{-eq/га} \quad (3.2)$$

Для пшениці озимої за норми висіву 220 кг/га та $EF_{seed} = 0,32$ кг CO_2 -eq/кг насіння: $E_{seed} = 220 \times 0,32 = 70,4$ кг CO_2 -eq/га (3,6 % загальних викидів).

Пестициди

Емісії від виробництва пестицидів диференційовані за класами препаратів, оскільки їх синтез має різну енергоємність. Розрахунок здійснюється за формулою:

$$E_{pest} = \sum (D_{pest_j} \times EF_{pest_j}), \text{ кг } CO_2\text{-eq/га} \quad (3.3)$$

Таблиця 3.2

Коефіцієнти емісії виробництва пестицидів за класами

Клас препарату	Доза, кг/га	EF, кг CO ₂ -eq/кг а.і.	Емісія, кг CO ₂ -eq/га	Джерело EF
Гербициди	0,143	23,1	3,30	Audsley et al., 2009
Фунгіциди	0,323	13,9	4,49	Audsley et al., 2009
Інсектициди	0,076	18,7	1,42	Audsley et al., 2009
Регулятори росту	0,069	14,3	0,99	ecoinvent 3.9
Протруювачі насіння	0,015	17,5	0,26	ecoinvent 3.9
Разом	0,626	—	10,46	—

Дози пестицидів у таблиці відповідають середнім по Лісостепу України за 2020–2024 рр. (без провального 2022 року). Загальна емісія від виробництва пестицидів становить 10,5 кг CO₂-eq/га, що разом із виробництвом насіння дає 27,4 кг CO₂-eq/га (1,4 % загальних викидів). Попри незначну частку, ця компонента важлива для повноти обліку при carbon farming звітності.

Польові емісії закису азоту (N₂O). Закис азоту є найпотужнішим парниковим газом сільськогосподарського походження з GWP = 273 (AR6). Польові емісії N₂O формують 34,2 % загальних викидів за вирощування пшениці та складаються з трьох компонентів: прямих емісій, непрямих емісій від волатилізації NH₃ і непрямих емісій від вимивання нітратів.

Прямі емісії N₂O. Прямі емісії виникають внаслідок мікробіологічних процесів нітрифікації та денітрифікації у ґрунті при надходженні реактивного азоту з мінеральних добрив, органічних залишків (солома, коріння) та біологічної фіксації:

$$E_{N_2O_direct} = F_{SN} \times EF_1 \times 44/28 \times GWP_{N_2O}, \text{ кг CO}_2\text{-eq/га} \quad (3.4)$$

де F_{SN} — загальне надходження азоту з добрив, кг N/га; EF_1 — коефіцієнт прямої емісії N₂O (0,010 за IPCC Tier 1; 0,012 адаптований для Лісостепу); $44/28$ — коефіцієнт перерахунку N₂O-N у N₂O (за молярними масами); GWP_{N_2O} — потенціал глобального потепління = 273 (AR6) або 265 (AR5).

Приклад: при N₁₂₀ та EF₁ = 0,010: $E = 120 \times 0,010 \times 44/28 \times 273 = 120 \times 0,010 \times 1,571 \times 273 = 514,8$ кг CO₂-eq/га. За IPCC Tier 1 (GWP 265) ця цифра становить 499,7 кг CO₂-eq/га.

Непрямі емісії від волатилізації. Частина внесеного азоту втрачається у вигляді аміаку (NH₃) та оксидів азоту (NO_x), які після перенесення атмосферою осідають на інших територіях і спричиняють емісії N₂O:

$$E_{N_2O_vol} = F_{SN} \times Frac_{GASF} \times EF_4 \times 44/28 \times GWP_{N_2O}, \text{ кг CO}_2\text{-eq/га} \quad (3.5)$$

Для карбаміду адаптований коефіцієнт волатилізації ($Frac_GASF = 0,15$) є вищим за стандартний IPCC (0,10), оскільки в умовах Лісостепу поверхнєве внесення карбаміду за температури понад 15 °С призводить до підвищених втрат NH_3 .

Непрямі емісії від вимивання. Нітратний азот вимивається з кореневмісного шару ґрунту та потрапляє у водні системи, де спричиняє емісії N_2O :

$$E_{N_2O_leach} = F_{SN} \times Frac_LEACH \times EF_5 \times 44/28 \times GWP_{N_2O}, \text{ кг CO}_2\text{-eq/га} \quad (3.6)$$

Для території Лісостепу України адаптований коефіцієнт вимивання ($Frac_LEACH = 0,24$) є нижчим за стандарт IPCC (0,30), що обумовлено меншою кількістю опадів та вищою водоутримувальною здатністю чорноземних ґрунтів.

Таблиця 3.3

Параметри IPCC для розрахунку емісій N_2O та їх адаптація

Параметр IPCC	Символ	Значення	Одиниця	Рівень
Коефіцієнт прямої емісії N_2O	EF1	0,010	кг N_2O -N/кг N	Tier 1
Адаптований для Лісостепу	EF1(UA)	0,012	кг N_2O -N/кг N	Tier 2
Частка волатилізації NH_3	Frac_GASF	0,10	частка	Tier 1
Частка волатилізації (карбамід)	Frac_GASF(u)	0,15	частка	Tier 2
EF волатилізації	EF4	0,010	кг N_2O -N/кг N	Tier 1
Частка вимивання N	Frac_LEACH	0,30	частка	Tier 1
Адаптована для Лісостепу	Frac_LEACH(UA)	0,24	частка	Tier 2
EF вимивання	EF5	0,0075	кг N_2O -N/кг N	Tier 1
GWP N_2O (AR6, 100 p.)	GWP	273	кг CO ₂ -eq/кг	AR6

Емісії CO_2 від гідролізу карбаміду. При внесенні карбаміду $CO(NH_2)_2$ у ґрунт відбувається ферментативний гідроліз із вивільненням CO_2 :

$$E_{urea} = M_{urea} \times CF_{urea} \times 44/12, \text{ кг CO}_2\text{/га} \quad (3.7)$$

M_{urea} — маса внесеного карбаміду, кг/га; CF_{urea} — уміст вуглецю в карбаміді = 0,20 кг C/кг; 44/12 — коефіцієнт перерахунку C у CO_2 .

Приклад: при внесенні 130 кг/га карбаміду (що відповідає 60 кг N/га із загальної дози N_{120}): $E_{urea} = 130 \times 0,20 \times 3,667 = 95,3$ кг CO_2 /га. Ця стаття формує 4,9 % загальних викидів.

3.2. Емісії від використання сільськогосподарської техніки

Спалювання дизельного палива при виконанні технологічних операцій генерує CO_2 та незначні кількості N_2O і CH_4 . Розрахунок проводиться за формулою:

$$E_{fuel} = V_{diesel} \times EF_{diesel}, \text{ кг CO}_2\text{-eq/га} \quad (3.8)$$

де V_{diesel} — витрата дизельного палива, л/га; EF_{diesel} — коефіцієнт емісії = 2,68 кг CO₂/л (включає спалювання 2,64 + видобуток та переробка 0,04 кг CO₂/л).

Для N₂O від спалювання дизелю додатково враховується: $EF_{N_2O_{diesel}} = 0,041$ кг CO₂-eq/л, а для CH₄: $EF_{CH_4_{diesel}} = 0,024$ кг CO₂-eq/л. Сумарний коефіцієнт для дизельного пального: $EF_{total} = 2,68 + 0,041 + 0,024 = 2,745$ кг CO₂-eq/л.

Таблиця 3.4

Витрати палива та емісії за технологічними операціями вирощування пшениці озимої

Технологічна операція	Витрата палива, л/га	CO ₂ , кг/га	N ₂ O, кг CO ₂ -eq/га	Разом, кг CO ₂ -eq/га
Оранка (22–25 см)	22,0	58,96	0,90	59,86
Дискування (2×)	12,0	32,16	0,49	32,65
Культивація (2×)	8,0	21,44	0,33	21,77
Сівба	6,5	17,42	0,27	17,69
Внесення добрив (3×)	6,0	16,08	0,25	16,33
Обприскування (4×)	4,0	10,72	0,16	10,88
Збирання комбайном	18,0	48,24	0,74	48,98
Транспортування зерна	12,0	32,16	0,49	32,65
Подрібнення соломи	8,0	21,44	0,33	21,77
Культивація після збирання	5,5	14,74	0,23	14,97
Разом	102,0	273,36	4,18	277,54

Загальна емісія від техніки становить 277,5 кг CO₂-eq/га (14,3 % загальних викидів). Найбільш енергоємними є оранка (21,6 %), збирання комбайном (17,6 %) та транспортування зерна (11,8 %). Перехід від оранки до мінімального обробітку (дискування) дає змогу знизити емісії від техніки на 10–15 %.

3.3. Секвестрація вуглецю в ґрунті

Секвестрація — це довгострокове зв'язування атмосферного вуглецю у стабільних фракціях ґрунтової органічної речовини (гумусу) через процес гуміфікації рослинних решток. На відміну від емісій, секвестрація враховується як від'ємна емісія, що знижує чистий вуглецевий слід.

Секвестрація через гуміфікацію соломи

$C_{straw} = DM_{straw} \times C\% \times k_{hum} \times 3,667 \times f_{straw}$, кг CO₂-eq/га (3.9)
 DM_{straw} — суха маса соломи, т/га (= урожайність зерна × коефіцієнт соломистості); $C\%$ — уміст вуглецю в сухій масі (0,45 для пшениці, 0,48 для міскантусу); k_{hum} — коефіцієнт ізогуміфікації (0,15 для соломи злакових); 3,667 — коефіцієнт перерахунку C у CO₂ (44/12); f_{straw} — частка соломи, залишена на полі (0–1,0).

Секвестрація через кореневу систему

$$C_root = Y \times R:S \times C\% \times k_hum_root \times 3,667, \text{ кг } CO_2\text{-eq/га} \quad (3.10)$$

де Y — урожайність загальної біомаси, т/га; $R:S$ — відношення маси кореневої системи до наземної біомаси (0,05 для пшениці; 0,35 для міскантусу; 0,40 для верби); k_hum_root — коефіцієнт ізогуміфікації коренів (0,20 для злакових; 0,25 для багаторічних).

Загальна секвестрація та баланс

$$C_total = C_straw + C_root + C_stubble, \text{ кг } CO_2\text{-eq/га} \quad (3.11)$$

$$\text{Баланс} = C_total - E_total, \text{ кг } CO_2\text{-eq/га} \quad (3.12)$$

Таблиця 3.5

Параметри секвестрації вуглецю для різних культур

Параметр	Пшениця	Міскантус	Верба	Примітка
Уміст С у біомасі, %	45,0	48,0	49,0	Лабораторні дані
Коеф. ізогуміфікації соломи	0,15	—	—	Александрова, 1980
Коеф. ізогуміфікації коріння	0,20	0,25	0,25	Адаптовано
Коеф. ізогуміфікації листя	—	0,15	0,15	Адаптовано
Відношення корінь : пагін	0,05	0,35	0,40	Польові дані
Річна секвестрація С, т/га	0,23*	1,10	0,80	*30 % соломи
Баланс секвестр., кг CO ₂ -eq/га	-1099	+3458	+2233	Модельний
Мін. % соломи для балансу 0	77->100	—	—	Залежить від сорту

Критичним результатом є залежність балансу секвестрації від частки залишеної соломи. При 0 % залишення всі сорти пшениці мають негативний баланс (-355...-820 кг CO₂-eq/га). Позитивний баланс досягається лише при залишенні 75–100 % соломи для високопродуктивних сортів (точка беззбитковості 77 %) та є недосяжним для низькопродуктивних сортів (> 100 %).

3.4. Зведений розрахунок та порівняльний аналіз

Загальні викиди парникових газів розраховуються як сума всіх компонентів:

$$E_total = E_fert + E_seed + E_pest + E_N_2O_direct + E_N_2O_vol + E_N_2O_leach + E_urea + E_fuel, \text{ кг } CO_2\text{-eq/га} \quad (3.13)$$

Вуглецевий слід на одиницю продукції:

$$CF = E_total / Y, \text{ кг } CO_2\text{-eq/т}, \quad (3.14)$$

де Y — урожайність основної продукції, т/га.

Зведена таблиця за культурами та сценаріями удобрення.

Таблиця 3.6

Зведений розрахунок емісій за культурами, кг CO₂-eq/га

Джерело емісії	Пшениця			Міскантус	Верба
	N ₆₀	N ₁₂₀	N ₁₈₀		
Виробництво добрив	378,8	809,8	1241,0	0	0
Польові N ₂ O	331,0	662,1	993,2	50	50
CO ₂ карбаміду	47,8	95,6	143,4	0	0
Техніка	272,9	272,9	272,9	300	330
Насіння	70,4	70,4	70,4	0*	0*
Пестициди	27,4	27,4	27,4	0	0
Закладання плантації	—	—	—	125	120
Збирання (аморт.)	—	—	—	(вкл.)	200
Разом, кг CO ₂ -eq/га	1128,3	1938,2	2748,3	575	700
На 1 т продукції	181,4	274,3**	301,6	38,3	70,0

* Для біоенергетичних культур насіння / саджанці враховані у статті «закладання плантації».

** Середнє за 36 сортами пшениці; діапазон 236–335 кг CO₂-eq/т.

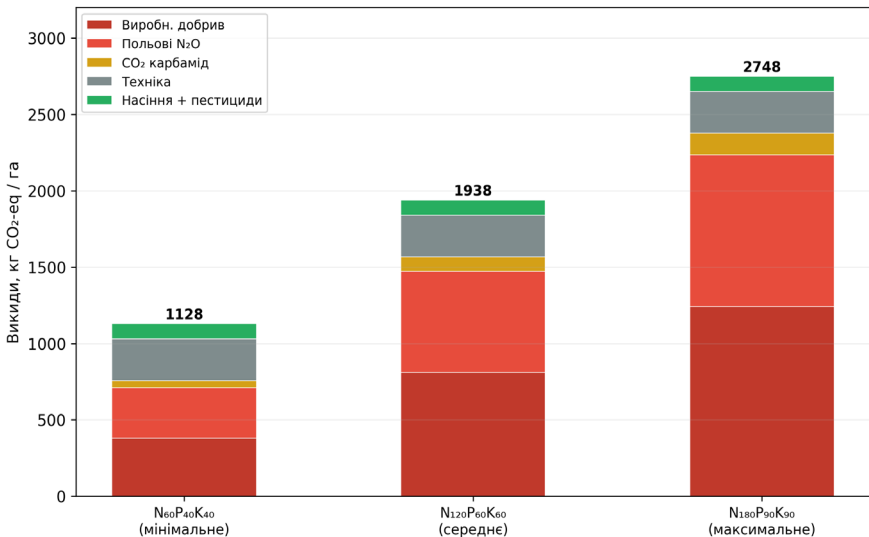


Рис. 3.1. Структура викидів ПГ за рівнями мінерального удобрення

Верифікація: порівняння з міжнародними даними (табл. 3.7).

Таблиця 3.7

Порівняння результатів із даними європейських досліджень

Країна	Доза N, кг/га	Викиди, кг CO ₂ -eq/га	На 1 т	Рік
Україна	120	1938	274	2025
Польща	150–180	2378–2759	350–420	2020
Фінляндія	130	2330	390	2019
Литва	160–180	2686–2919	360–440	2021
Німеччина	180–200	2800–3200	280–350	2022
Великобританія	180–220	2500–3100	260–320	2021
Китай	250–300	5455	550–650	2020
Середньосвітове	—	—	300–450	2022

Отримані результати (1938 кг CO₂-eq/га; 274 кг/т) знаходяться в нижньому діапазоні європейських показників, що пояснюється меншими дозами азотних добрив (N₁₂₀ проти N_{150–200} у Західній Європі). Ці значення валідують методику та підтверджують її придатність для практичного використання.

3.5. Алгоритм практичного застосування

Крок 1. Збір вхідних даних: визначити культуру, сорт, площу поля; зафіксувати фактичні дози мінеральних добрив (N, P₂O₅, K₂O у кг д. р./га) із зазначенням форм добрив (карбамід, селітра, КАС тощо); зафіксувати фактичні дози пестицидів (кг д. р./га за класами); визначити норму висіву насіння (кг/га); отримати дані про витрати палива за операціями або використати нормативні значення з таблиць.

Крок 2. Розрахунок емісій від виробництва ресурсів за формулами 3.1–3.3.

Крок 3. Розрахунок польових емісій N₂O за формулами 3.4–3.6, обравши рівень точності (Tier 1 — стандартні коефіцієнти IPCC або Tier 2 — адаптовані для Лісостепу).

Крок 4. Розрахунок емісій CO₂ від карбаміду за формулою 3.7 (лише за використання карбаміду або карбамідовмісних добрив).

Крок 5. Розрахунок емісій від техніки за формулою 3.8.

Крок 6. Розрахунок секвестрації за формулами 3.9–3.12 з визначенням частки залишеної соломи.

Крок 7. Зведений розрахунок за формулами 3.13–3.14.

Крок 8. Верифікація: порівняти отримані результати з діапазонами таблиці 6.2; за відхилення понад 30 % — перевірити вхідні дані.

На основі результатів розрахунку виробництво класифікується за шкалою вуглецевої ефективності: високоефективне — менше ніж 250 кг CO₂-eq/т; ефективне — 250–280 кг CO₂-eq/т; середнє — 280–310 кг CO₂-eq/т; низькоефективне — понад 310 кг CO₂-eq/т. Ця шкала розроблена на основі статистичного розподілу вуглецевого сліду 36 сортів пшениці за п'ять років і може використовуватися для: внутрішнього бенчмаркінгу господарства, оцінки ефекту технологічних змін, підготовки документації для carbon farming програм.

На основі структурного аналізу емісій визначено ієрархію заходів за ефективністю зниження вуглецевого сліду:

- оптимізація азотного живлення (перехід від N₁₈₀ до N₁₂₀ знижує емісії на 810 кг CO₂-eq/га, або 42 %);
- управління соломною (залишення 75 % замість 0 % забезпечує +10 637 кг CO₂-eq/га для кращих сортів);
- добір високоефективних сортів (різниця 99 кг CO₂-eq/т, або 42 % між найкращим та найгіршим);
- вирощування поживних сидератів (зниження на 6,8–12,8 т CO₂-eq/га порівняно з оранкою);
- заміна пшениці біоенергетичними культурами на маргінальних землях (ефект +3332...+4557 кг CO₂-eq/га/рік).

4. Симуляційні сценарії віртуальних моделей полів та методологія інтероперабельності цифрових компонентів системи

Віртуальна модель поля (ВМП) — це математичний двійник реального агроценозу, що об'єднує просторові дані поля (контур, рельєф, тип ґрунту, запаси NPK), динамічні моделі росту та розвитку культур (калібровані на 36 сортах × 5 років), модуль вуглецевого балансу (IPCC Tier 2) та економічний блок (витрати, виручка, рентабельність). ВМП дозволяє моделювати «що буде, якщо...» — сценарії до виходу в поле, замінюючи частину дорогих польових дослідів обчислювальним експериментом.

Призначення ВМП: тестування нових технологічних рішень до їх впровадження; оцінка ризиків за різних погодних сценаріїв; оптимізація сортового складу для конкретних умов; калькуляція вуглецевого сліду та потенціалу carbon farming; навчання агрономів без ризику виробничих втрат.

Кожна ВМП визначається набором статичних та динамічних параметрів. Статичні параметри характеризують поле: площа (га), координати (WGS84), тип ґрунту (чорнозем типовий / вилугований / опідзолений), уміст гумусу (%), запаси рухомих форм N, P₂O₅, K₂O (мг/кг), рН, гранулометричний склад. Динамічні параметри описують технологію та погоду: сорт (з бази 36 сортів), попередник, доза NPK, система захисту, ретардант, частка залишеної соломи, погодний сценарій (ГТК).

Таблиця 4.1

Типові конфігурації ВМП для зон Лісостепу

Параметр	Лісостеп		
	Західний	Центральний	Східний
Опади за вегет. період, мм	600–640	510–560	480–520
Середній ГТК	1,10–1,25	0,90–1,10	0,75–0,95
Тип ґрунту	чорноз. опідз.	чорноз. типовий	чорноз. звич.
Гумус, %	2,70–3,25	2,98–3,50	3,30–4,30
N (Корнфілд), мг/кг	96–118	116–142	96–131
P ₂ O ₅ (Чириков), мг/кг	96–118	107–143	56–131
K ₂ O (Чириков), мг/кг	88–118	107–117	78–116
Частота посух, %	20–25	35–40	45–55
Типовий урожай пшениці, т/га	5,50–6,00	4,50–5,50	3,80–5,00
Урожай міскантусу, т/га	18	15	12

4.1. Погодні сценарії та їх калібрування

На основі аналізу метеорологічних даних Київської області за 2020–2024 рр. визначено три типові погодні сценарії, що охоплюють весь спектр гідротермічних умов Лісостепу:

Таблиця 4.2

Характеристика погодних сценаріїв та їх частота

Параметр	Посушливий	Оптимальний	Надмірно вологий
ГТК	< 0,7	0,9–1,1	> 1,1
Частота за 2020–2024	40 % (2 з 5 років)	40 % (2 з 5 років)	20 % (1 з 5 років)
Опади за вегет. пер., мм	< 300	350–450	> 500
Температ. повітря (сер.)	> 18 °С	15–17 °С	< 15 °С
Ризики	дефіцит вологи, суховії	збалансовані	вилягання, хвороби
Корекція N, %	–15 %	0 (базова)	+10 %
Корекція фунгіцидів, %	–20 %	0	+30 %

Модель урожайності калібрована на масиві 180 сорто-років (36 сортів × 5 років). Основне рівняння зв'язує урожайність з ГТК, дозою азоту та генотипом:

$$Y = Y_{pot} \times f(\text{ГТК}) \times f(N) \times f(\text{защита}) \times k_{\text{сорт}} \quad (2.1)$$

Y_{pot} – потенційна врожайність сорту за оптимальних умов, т/га; $f(\text{ГТК})$ – функція відгуку на гідротермічні умови ($r = 0,83$); $f(N)$ – функція відгуку на рівень азотного живлення (ефект спадної віддачі); $k_{\text{сорт}}$ – сортовий коефіцієнт посухостійкості / інтенсивності (0,43–1,0).

Калібрування виконується методом найменших квадратів з мінімізацією відхилення модельної врожайності від фактичної. За результатами верифікації середнє відхилення становить 0,9 % для врожайності та 2,1 % для вуглецевого сліду, що відповідає вимогам IPCC.

Таблиця 4.3

Прогнозна врожайність культур за погодними сценаріями, т/га

Культура	Посушливий	Оптимальний	Надмірно вологий	Середньозважена
Пшениця (рекоменд. склад)	3,83	6,19	5,30	5,07
зокрема посухостійкі (30 %)	4,50	5,80	5,20	5,12
універсальні (40 %)	3,80	5,50	5,00	4,72
інтенсивні (30 %)	3,20	7,50	5,80	5,42
Міскантус (суха маса)	10	18	20	15,2
Верба (суха маса)	6	12	15	10,2

Ключова закономірність: посухостійкі сорти ('Берегиня миронівська', 'Воздвиженка') зберігають 78 % потенціалу за посухи, тоді як інтенсивні ('Легенда білоцерківська') — лише 43 %. Це обґрунтовує необхідність диверсифікованого сортового складу, який моделюється у ВМП як 30 % посухостійких + 40 % універсальних + 30 % інтенсивних сортів.

4.2. Технологічні сценарії та їх оптимізація

Простір технологічних рішень формується комбінацією п'яти факторів, кожен з яких має два-п'ять рівнів. Загальна кількість можливих комбінацій для одного сорту становить $3 \times 2 \times 2 \times 5 = 60$, а з урахуванням 36 сортів — 2160 варіантів. ВМП перебирає всі комбінації та ранжує їх за обраним критерієм оптимізації.

Таблиця 4.4

Матриця технологічних факторів та їх рівнів

Фактор	Рівень 1	Рівень 2	Рівень 3	Рівень 4–5
Удобрення	N ₆₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₁₂₀ P ₆₀ K ₆₀	N ₁₈₀ P ₉₀ K ₉₀ + мікро	—
Захист рослин	Хімічний	Біологічний (ТАЕГРО)	—	—
Ретардант	Квантум- Аквасил	МОДДУС 250 ЕС	—	—
Частка соломи, %	0	30	50	75 / 100
Сидерати (пожн.)	Без сидератів	10 кг/га	15 кг/га	20 кг/га

З простору 2160 комбінацій виділено шість типових сценаріїв, що охоплюють спектр від інтенсивного до біоенергетичного:

Таблиця 4.5

Порівняльна таблиця типових сценаріїв за трьома погодними умовами

Сценарій / показник	Емісія, кг CO ₂ -eq/га	Слід, кг CO ₂ -eq/т	Рентаб., %	Секв., кг/га	Ризик
S1: Інтенсивний (N ₁₈₀ , хім., 0% солома)	2748–3970	301–440	82–110	Негат.	Високий
S2: Оптим. збалансов. (N ₁₂₀ , хім., 75 %)	1938–2958	244–370	108–112	Позит.	Середн.
S3: Екологізований (N ₁₂₀ , біол., 100 %)	1930–2950	250–385	103–107	Позит.	Середн.
S4: Мінімальний (N ₆₀ , біол., 100 %)	1128–1972	280–515	77–85	Позит.	Низьк.
S5: Комбінований (N ₁₂₀ + сид. 20 кг/га)	1938–2958*	220–360	105–108	Позит.+	Низьк.
S6: Біоенергетичний (міскантус)	575	29–58	—	+3458	Мінім.

* Для S5 основні емісії ідентичні S2, але додатковий кліматичний ефект сидерації +6,8–12,8 т CO₂-eq/га знижує чистий баланс. Оптимальним за комплексним критерієм «max(рентабельність) × min(CO₂-eq/т)» визначено сценарій S2 («Оптимальний збалансований»), виділений зеленим.

Таблиця 4.6

Вуглецевий баланс за культурами та погодними сценаріями, кг CO₂-eq/га/рік

Показник	Пшениця			Міскантус	Верба
	посуха	оптим.	волога		
Викиди, кг CO ₂ -eq/га	1795	2034	2198	575	700
Слід, кг/т	469	329	415	32–58	47–117
Секвестрація, т С/га/рік	0,10	0,20	0,21	0,70–1,30	0,50–1,00
Баланс секвестр., кг/га	-1430	-1289	-1427	+1992...+4192	+1133...+2967
Ефект заміни, кг/га/рік	—	—	—	+3421...+5618	+2563...+4393
Середньозваж. ефект	—	—	—	+4391	+3313

4.3. Алгоритм симуляції та калібрування

Крок 1. Ініціалізація ВМП: задати статичні параметри поля (координати, площа, тип ґрунту, запаси НРК), обрати або завантажити погодний сценарій (ГТК та помісячні дані), обрати технологічний сценарій (або задати кожен фактор окремо).

Крок 2. Запуск моделі росту: розрахунок динаміки фенологічних фаз за ВВСН-шкалою для обраного сорту та погодних умов, моделювання фотосинтетичної продуктивності (ПЛП, ФП, ЧПФ, хлорофіл) з калібрувальними коефіцієнтами по фазах, визначення критичних точок агротехнічного втручання (підживлення, захист, ретарданти).

Крок 3. Прогнозування врожайності: розрахунок урожайності за формулою 2.1 з урахуванням ГТК, рівня удобрення та сортових коефіцієнтів, розподіл біомаси на зерно, соломку, стерню, коріння за встановленими коефіцієнтами.

Крок 4. Розрахунок вуглецевого балансу: визначення емісій за кожним джерелом відповідно до Методики розрахунку викидів ПГ, розрахунок секвестрації залежно від частки залишеної соломи (5 сценаріїв), визначення чистого балансу та вуглецевого сліду на 1 т продукції.

Крок 5. Економічний аналіз: калькуляція витрат за статтями (добрива, насіння, пестициди, техніка, оренда, збирання), розрахунок виручки з диференціацією ціни за класами якості зерна, визначення прибутку, рентабельності та маржинальної окупності інвестицій.

Крок 6. Оптимізація за Парето: перебір усіх 2160 комбінацій факторів, побудова фронту Парето за критеріями «максимум рентабельності —

мінімум CO₂-eq/т», видача ранжованого списку оптимальних рішень із зазначенням trade-off між економікою та екологією.

Крок 7. Генерація звітів: формування порівняльних таблиць «поточний сценарій vs альтернативи», візуалізація на GIS-карті (зональне варіювання показників), підготовка документації для carbon farming звітності.

Калібрування ВМП виконується після кожного виробничого сезону за такою процедурою: збір фактичних даних (урожайність, фенофази, витрати, якість зерна) по кожному полю; порівняння фактичних та модельних показників (цільове відхилення < 5 %); адаптація коефіцієнтів k_сорт, f(ГТК), EF₁(UA) методом найменших квадратів; повторна верифікація на тестовій вибірці (20 % полів).

Для нових сортів, що не входять до калібрувальної бази 36 сортів, використовується класифікація за типом (посухостійкий / універсальний / інтенсивний) з присвоєнням відповідних коефіцієнтів найближчого аналога. Після двох сезонів фактичних даних виконується повне калібрування нового сорту.

Таблиця 4.7

Контрольні показники калібрування ВМП

Показник	Допустиме відхилення	Метод верифікації	Частота калібруван.
Урожайність, т/га	± 5 % (0,3–0,5 т/га)	Порівняння з фактом по полях	Щорічно
Вуглецевий слід, кг CO ₂ -eq/т	± 7 %	Звірка з IPCC benchmarks	Щорічно
Баланс НРК, кг/га	± 10 %	Порівняння з агрохім. аналізом	Щорічно
Фенофази ВВСН	± 1 стадія (± 5 діб)	Візуальна / БПЛА оцінка	Щотижня
Рентабельність, %	± 5 в. п.	Порівняння з бухгалтерією	По сезону
Секвестрація С, т/га/рік	± 15 %	Камерний метод / модель	Раз на три роки
Ефект сидератів, кг НРК/га	± 20 %	Агрохімічний аналіз	По сезону

4.4. Методологія інтероперабельності цифрових компонентів системи

Інтероперабельність цифрових компонентів ІЦСУА — це здатність обладнання, програмного забезпечення та інформаційних систем різних виробників обмінюватися даними та спільно функціонувати без ручного втручання оператора.

Методологія визначає три рівні інтероперабельності:

- технічний (протоколи та формати обміну);
- семантичний (єдиний зміст даних);
- організаційний (регламенти взаємодії).

Таблиця 4.8

Три рівні інтероперабельності ІЦСУА

Рівень	Що забезпечує	Стандарти	Відповідальний компонент
Технічний	Фізичний зв'язок та передача байтів	MQTT v5, REST/OpenAPI 3.0, gRPC, OGC SensorThings	API-шлюз
Семантичний	Однакове розуміння змісту даних	BBCH, IPCC GWP, ISO 11783 (ISOBUS), SI + агро.	Онтологія
Організаційний	Правила взаємодії учасників	Регламенти SLA, право доступу, carbon farming	Платформа

Система підтримує три базові протоколи, кожен з яких оптимізований для свого класу задач:

MQTT v5 (Message Queuing Telemetry Transport) — основний протокол для IoT-пристроїв. Особливості: асинхронний pub/sub, підтримка QoS 0/1/2, retained-повідомлення для останнього стану сенсора, lightweight (мін. overhead 2 байти), працює через мобільний інтернет з обмеженою смугою. Використовується для: потоків телеметрії від сенсорів вологості, температури, NPK; даних метеостанцій; тривожних сповіщень (порогові значення).

REST API (OpenAPI 3.0) — стандартний протокол для запитів агрегованих даних. Використовується для: отримання прогнозів врожайності, вуглецевого балансу; управління конфігурацією полів та технологічних карт; інтеграції з ERP, бухгалтерією, carbon farming платформами; доступу мобільного додатку та веб-дашборду.

gRPC (Google Remote Procedure Call) — високопродуктивний протокол для внутрішнього обміну між аналітичними модулями. Переваги: бінарна серіалізація (Protocol Buffers), двонаправлений стрімінг, контрактна типізація. Використовується для: передачі масивів даних між модулем росту та модулем вуглецевого балансу; оптимізаційних запитів (2160 комбінацій); потокової обробки супутникових та БПЛА даних.

Усі дані в системі передаються у форматі JSON з обов'язковою структурою:

```
{
  "device_id": "UUID",
  "field_id": "UUID",
  "timestamp": "ISO 8601 UTC",
  "location": {
    "lat": WGS84,
    "lon": WGS84
  },
  "parameter": "string",
  "value": number,
  "unit": "SI/агро",
  "quality": 0-100
}
```

Ключові вимоги до формату: часовий штамп — строго ISO 8601 з часовим поясом UTC (2026-04-04T12:00:00Z); координати — WGS84 (десяткові градуси, мінімально 6 знаків); ідентифікатори — UUID v4 (глобально унікальні, без колізій при масштабуванні); одиниці виміру — SI (для фізичних величин) або стандартні агрономічні (кг д. р./га, кг CO₂-eq/га); quality — індекс якості даних (0 = невалідні, 100 = лабораторно верифіковані).

Таблиця 4.9

Підтримувані пристрої та протоколи інтеграції

Пристрій / Система	Виробник	Нативний протокол	Інтеграція в ІЦСУА	Частота
Мережостанція Davis Vantage Pro2	Davis Instruments	HTTP API / CSV	REST → JSON-TS	15 хв
Мережостанція iMetos	Pessl Instruments	MQTT / REST API	MQTT native	10 хв
Сенсор вологості Sentek Drill&Drop	Sentek	SDI-12 → Modbus	MQTT bridge	1 год
Сенсор вологості TEROS-12	METER Group	SDI-12 → MQTT	MQTT native	30 хв
AgroCares Scanner F	AgroCares	Пропріетарний .acs	REST API + парсер	За аналіз
БПЛА XAG V40 (NDVI)	XAG	GeoTIFF raster	COG конвертер	За виліт
БПЛА DJI Matrice 350	DJI	JPEG + EXIF GPS	Stitching → COG	За виліт
Sentinel-2 (ESA)	ESA / Copernicus	SAFE / COG	OGC API → COG	5 діб
ISOBUS техніка Trecker	Різні	ISO 11783	ISOBUS gateway	Real-time
(бортовий GPS)	Trecker	REST API	REST → JSON-TS	1 хв

Семантична інтероперабельність забезпечується єдиною агрономічною онтологією — формалізованим словником понять, їхніх зв'язків та правил перерахунку. Онтологія охоплює п'ять доменів:

Таблиця 4.10

Домені агрономічної онтології ІЦСУА

Домен	Стандарт	Ключові поняття	Приклад перерахунку
Фенологія	BVCH (серія шкал)	Макростадії 0–9, мікростадії 00–99, критичні фази	Куперман II = BVCH 13; Куперман III = BVCH 25
Живлення рослин	SI + агрономічні	N, P ₂ O ₅ , K ₂ O у кг д. р./га	1 кг селітри = 0,34 кг N д. р.
Парникові гази	IPCC AR6	CO ₂ -eq (GWP ₁₀₀ : CO ₂ = 1, N ₂ O = 273, CH ₄ = 27,9)	1 кг N ₂ O = 273 кг CO ₂ -eq
Просторові дані	OGC / ISO 19115	WGS84, EPSG:4326, CRS трансформації	Пулково 1942 → WGS84
Технологічні операції	Власний класифікатор	Операція + доза + фаза BVCH + техніка	Підживлення N ₆₀ у BVCH 25

Система автоматично виконує перерахунок між різними формами запису однієї величини: добрива з фізичної маси у діючу речовину [наприклад, 300 кг/га аміачної селітри (34 % N) = 102 кг N д. р./га]; парникові гази з маси речовини у CO₂-еквіваленти (наприклад, 1,2 кг N₂O/га × 273 = 327,6 кг CO₂-eq/га); просторові координати між системами (Пулково 1942 → WGS84 через параметри Гельмерта); часові мітки до UTC (EET (UTC+2) та EEST (UTC+3) → UTC з автоматичним ураху-

ванням переходу); одиниці вологості між методами (pF ↔ % об. ↔ мм вологозапасу).

Кожне повідомлення проходить три рівні валідації: синтаксичний (коректність JSON, наявність обов'язкових полів, правильність UUID); семантичний (значення в допустимому діапазоні: температура ґрунту –10...+60 °С, вологість 0–100 %, N 0–300 кг/га); темпоральний (хронологічна послідовність, відсутність дублікатів, максимальний допустимий розрив 2× від очікуваної частоти). Повідомлення, що не пройшли валідацію, потрапляють у карантинну чергу з тривожним сповіщенням оператора.

4.5. Організаційна інтероперабельність та масштабування

Система реалізує RBAC (Role-Based Access Control) із чотирма ролями:

- адміністратор платформи (повний доступ, управління обладнанням та користувачами);
- агроном господарства (доступ до своїх полів, конфігурація ВМП, запуск симуляцій, перегляд рекомендацій);
- оператор техніки (перегляд завдань, відмітка про виконання, дані ISOBUS);
- аудитор / carbon farming (доступ лише на читання до звітів вуглецевого балансу, без можливості модифікації).

Горизонтальне масштабування: підключення нових полів та господарств через реєстрацію у платформі з автоматичним створенням ВМП (контур поля з кадастрової карти + агрохімічний паспорт). Кожне нове поле потребує мінімум: контур (GeoJSON), тип ґрунту, останній агрохімічний аналіз. Час підключення: 15–30 хвилин для поля з наявними даними.

Вертикальне масштабування: додавання нових культур через розширення модульного аналітичного ядра. Для нової культури потрібно: мінімум три роки дослідних даних (сорти × удобрення × погода), калібрування коефіцієнтів моделі росту, адаптація модуля вуглецевого балансу (EF₁, Frac_LEACH, k_{hum}). На поточному етапі підтримуються: пшениця озима (36 сортів), міскантус гігантський (три зони), верба енегетична (три зони).

Функціональне масштабування: інтеграція з зовнішніми системами через REST API: платформи carbon farming (Verra, Gold Standard) для автоматичної подачі звітності; ERP-системи господарства (1С, SAP) для синхронізації витрат та виручки; державні системи (Держгеокадастр, ДССУ) для верифікації площ та статистичних даних; страхові компанії для автоматичного підтвердження погодних ризиків.

Висновки

1. Розроблено концептуальну модель інтегрованої цифрової системи управління агровиробництвом з п'ятирівневою архітектурою: збір даних з різномірних джерел (IoT, метеостанції, БПЛА, супутники, лабораторне обладнання); інтеграція та стандартизація потоків даних; математичне моделювання та аналітика; система підтримки прийняття рішень; інтерфейс користувача.

2. Обґрунтовано методологію стандартизації потоків даних від вісьми типів джерел різних виробників до єдиного уніфікованого формату (JSON-TS з ISO 8601, WGS84, UUID) через ETL-конвеєр та API-шлюз із підтримкою протоколів REST, MQTT та gRPC. Та розроблено та верифіковано математичні моделі: прогнозування врожайності ($R^2 = 0,83$, калібрація на 36 сортах \times 5 років), вуглецевого балансу за IPCC Tier 2 (похибка $< 3\%$ для емісій, $< 5\%$ для секвестрації) та оптимізації за еколого-економічним критерієм Парето (2160 комбінацій факторів).

3. Установлено ключові закономірності для параметризації моделей: домінування азотного циклу у структурі емісій (76 %); вирішальний вплив управління соломою (ефект 11 678 кг CO₂-eq/га — вдвічі більше за ефект сорту); оптимальність середнього рівня удобрення N₁₂₀ за комплексним критерієм (рентабельність 112 % при вуглецевому сліді 244–260 кг/т). І визначено шість типових технологічних сценаріїв з рекомендацією «оптимального збалансованого» сценарію (N₁₂₀ + хімічний захист + 75 % соломи) як такого, що забезпечує одночасно найвищу рентабельність та позитивний баланс секвестрації вуглецю. А також обґрунтовано принципи інтероперабельності системи на технічному (стандартизація протоколів), семантичному (онтологія BVCH, NPK д.р., CO₂-eq) та організаційному рівнях, що забезпечує масштабованість та сумісність з міжнародними стандартами carbon farming звітності.

4. Розроблено методіку комплексного розрахунку викидів трьох парникових газів (CO₂, N₂O, CH₄) для всіх ключових агротехнологічних операцій — від виробництва ресурсів до секвестрації вуглецю. Методика базується на стандартах IPCC 2019 та AR6 з адаптацією коефіцієнтів до умов Лісостепу України (Tier 2) і верифікована на даних 36 сортів пшениці за п'ять років.

5. Результати верифікації підтверджують адекватність методіки: отримані значення (1938 кг CO₂-eq/га; 236–335 кг/т) відповідають нижньому діапазону європейських досліджень. Адаптовані коефіцієнти (EF₁ = 0,012 для Лісостепу; Frac_LEACH = 0,24) уточнюють розрахунок

для умов чорноземних ґрунтів з помірним зволоженням. Методика охоплює повний спектр культур: однорічні зернові (пшениця, 1938 кг/га), багаторічні біоенергетичні (міскантус — 575, верба — 700 кг/га) та пожнивні сидерати, що дозволяє використовувати її для оцінки диверсифікованих агроєкосистем та обґрунтування переходу до карбоново нейтральних технологій.

6. Практична цінність методики полягає в: стандартизованому алгоритмі розрахунку (7 кроків) з чітко визначеними формулами та коефіцієнтами; шкалі категоризації вуглецевої ефективності (4 категорії); ієрархії заходів зниження вуглецевого сліду з кількісною оцінкою ефекту кожного; сумісності з вимогами carbon farming програм та стандартами Європейського зеленого курсу.

7. Розроблено систему симуляційних сценаріїв віртуальних моделей полів (ВМП), що включає три погодні сценарії (посушливий ГТК < 0,7, оптимальний 0,9–1,1, надмірно вологий > 1,1 з частотою 40/40/20%), шість типових технологічних сценаріїв та простір з 2160 комбінацій факторів для кожного поля. Калібрування моделей виконано на масиві 36 сортів × 5 років (180 сорто-років) із досягнутою точністю: відхилення 0,9 % для урожайності, 2,1 % для вуглецевого сліду та менше 5 % для секвестрації. Визначено контрольні показники та процедуру щорічного калібрування ВМП.

8. Установлено, що оптимальний збалансований сценарій (N₁₂₀ + хімічний захист + 75 % соломи) забезпечує рентабельність 108–112 % за позитивного балансу секвестрації та вуглецевому сліді 244–260 кг CO₂-eq/т. Біоенергетичні культури забезпечують стабільний кліматичний ефект +4391 кг CO₂-eq/га/рік (середньозважений) незалежно від погодних умов.

9. Розроблено методологію інтероперабельності на трьох рівнях: технічному (протоколи MQTT v5, REST/OpenAPI 3.0, gRPC з уніфікованим JSON-форматом), семантичному (агрономічна онтологія з п'ятьма доменами: BVCH, NPK д.р., CO₂-eq, OGC/WGS84, технологічні операції) та організаційному (RBAC з чотирма ролями). Визначено матрицю сумісності для 11 типів обладнання різних виробників (Davis, Pessl, Sentek, METER, AgroCares, XAG, DJI, ESA, ISOBUS, Trecker) з описом нативних протоколів та методів інтеграції. Обґрунтовано три виміри масштабування системи: горизонтальне (підключення нових полів за 15–30 хв), вертикальне (нові культури за наявності 3+ років даних) та функціональне (REST API інтеграція з Verra, Gold Standard, ERP, Держгеокадастром).

Наукове видання

Автори:

Олег Іванович Присяжнюк,
Надія Олександрівна Кононюк,
Оксана Андріївна Малярєнко,
Микола Олександрович Черняк,
Володимир Володимирович Мусіч,
Олександр Юрійович Половинчук,
Світлана Миколаївна Мандровська

**ІНТЕГРОВАНА ЦИФРОВА СИСТЕМА
УПРАВЛІННЯ АГРОВИРОБНИЦТВОМ
З ОПТИМІЗАЦІЄЮ ВУГЛЕЦЕВОГО БАЛАНСУ
ТА ПРОДУКТИВНОСТІ КУЛЬТУР**

Науково-методичні рекомендації

Електронне видання

Технічне редагування та верстка
О. Ю. Половинчук

Погоджено до опублікування 09.04.2026.
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

