

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-89>

УДК 004.9

ВОЙЧУР ЮРІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3085-7315>

e-mail: voichury@khmnhu.edu.ua

МЕДЗАТИЙ ДМИТРО

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0004-3247-6406>

e-mail: medza@ukr.net

КРИШТОФОР ОЛЕГ

Хмельницький національний університет

e-mail: kryshthofor@gmail.com

БАЧУК В'ЯЧЕСЛАВ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0007-8465-8908>

e-mail: v.bachuk@i.ua

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ВУГЛЕЦЮ В ҐРУНТАХ В УМОВАХ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Стаття присвячена актуальній проблемі розроблення кіберфізичної системи для високоточного моніторингу вмісту органічного вуглецю в ґрунтах в умовах інтенсивного антропогенного навантаження. У роботі обґрунтовано, що декарбонізація земель, спричинена інтенсивним землеробством, промисловим забрудненням та військовою агресією, є критичною загрозою екологічній та продовольчій безпеці України. Встановлено, що традиційні лабораторні методи аналізу ґрунту є занадто інертними та вартісними для оперативного управління ресурсами, що створює потребу в переході до автоматизованих рішень на базі концепції Інтернету речей. Авторами проведено детальний порівняльний аналіз існуючих методів та мобільних сенсорних рішень, що дозволило ідентифікувати ключові недоліки поодинокого використання оптичних датчиків, зокрема, їхню високу чутливість до вологості. Запропоновано інноваційну апаратну конфігурацію, що базується на синергії мультиспектрального сенсора AS7265x та електромагнітного датчика LDC1612 під управлінням мікроконтролера ESP32-S3. Такий мультисенсорний підхід дозволяє реалізувати інтелектуальну обробку даних на рівні Edge Computing, де результати електромагнітного зондування використовуються для автоматичної компенсації «ефекту вологості», що суттєво підвищує достовірність вимірювань безпосередньо в польових умовах. У статті детально описано спроектовану тривірневу ієрархічну архітектуру та алгоритм функціонування КФС, які охоплюють сенсорний рівень збору первинних параметрів, середній рівень інтелектуального шлюзу та верхній рівень хмарної аналітики й прийняття рішень. Гібридна комунікаційна схема, що поєднує LoRaWAN для дистанційної передачі та Bluetooth LE для локального налаштування, забезпечує високу автономність та енергонезалежність системи, роблячи її придатною для використання на великих площах сільськогосподарських угідь, що відкриває нові перспективи для реалізації стратегій кліматично нейтрального розвитку аграрного сектору та сприяє цифровій трансформації екологічного моніторингу в Україні.

Ключові слова: кіберфізична система, органічний вуглець ґрунту, декарбонізація, мультисенсорний підхід, датчик AS7265x, датчик LDC1612, контролер ESP32-S3, LoRaWAN, Bluetooth LE, edge computing, хмарна аналітика.

VOICHUR YURIY, MEDZATYI DMYTRO, KRYSHTOFOR OLEH, BACHUK VLADYSLAV

Khmelnytskyi National University

CYBERPHYSICAL SYSTEM FOR DETERMINING CARBON CONTENT IN SOILS UNDER ANTHROPOGENIC LOADING

The article is devoted to the topical problem of developing a cyber-physical system for high-precision monitoring of organic carbon content in soils under conditions of intense anthropogenic load. The paper argues that land decarbonization caused by intensive agriculture, industrial pollution, and military aggression is a critical threat to Ukraine's environmental and food security. It has been established that traditional laboratory methods of soil analysis are too slow and costly for operational resource management, which creates a need to transition to automated solutions based on the Internet of Things concept. The authors conducted a detailed comparative analysis of existing methods and mobile sensor solutions, which allowed them to identify the key shortcomings of the isolated use of optical sensors, in particular their high sensitivity to humidity. An innovative hardware configuration is proposed, based on the synergy of the AS7265x multispectral sensor and the LDC1612 electromagnetic sensor controlled by the ESP32-S3 microcontroller. This multi-sensor approach allows for intelligent data processing at the Edge Computing level, where the results of electromagnetic sensing are used to automatically compensate for the "humidity effect," which significantly increases the reliability of measurements directly in the field. The article describes in detail the designed three-level hierarchical architecture of the KFS, which covers the sensor level of collecting primary parameters, the middle level of the intelligent gateway, and the upper level of cloud analytics and decision-making. Particular attention is paid to the development of the system's operating algorithm, which is divided into four phases: initialization, local noise filtering, data transmission via the energy-efficient LoRaWAN protocol, and final soil condition classification based on a knowledge base. A hybrid communication scheme combining LoRaWAN for remote transmission and Bluetooth LE for local configuration ensures high autonomy and energy independence of the system, making it suitable for use on large areas of agricultural land, which opens up new prospects for the implementation of climate-neutral development strategies in the agricultural sector and contributes to the digital transformation of environmental monitoring in Ukraine.

Keywords: cyber-physical system, soil organic carbon, decarbonization, multi-sensory approach, AS7265x sensor, LDC1612 sensor, ESP32-S3 controller, LoRaWAN, Bluetooth LE, edge computing, cloud analytics.

Стаття надійшла до редакції / Received 07.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Войчур Юрій, Медзатий Дмитро, Криштофор Олег, Бачук В'ячеслав

Вступ

Вміст вуглецю в ґрунті є динамічним показником, норма якого суттєво варіюється залежно від типу ґрунту, кліматичної зони та екосистеми, проте для найбільш родючих чорноземів оптимальним вважається рівень органічного вуглецю в межах від 3% до 5% [1]. У лісових або заторфованих ґрунтах цей показник може бути значно вищим, тоді як у піщаних або деградованих землях він часто опускається нижче 1%, що сигналізує про критичне виснаження ресурсів [2]. Важливо розуміти, що вуглець перебуває у стані постійного колаобігу, і його «норма» визначається здатністю конкретного ландшафту утримувати органічну речовину у формі гумусу, який забезпечує структуру, вологоємність та біологічну активність ґрунтового середовища [3, 4].

Під впливом антропогенного навантаження в більшості регіонів світу спостерігається стійка тенденція до зменшення вмісту вуглецю в ґрунтах, що науковці називають декарбонізацією земель [5]. Інтенсивне землеробство з глибокою оранкою, відсутність сівозмін, спалювання стерні та надмірне використання мінеральних добрив прискорюють процеси мінералізації органічної речовини, через що вуглець, який накопичувався століттями, вивільняється у вигляді вуглекислого газу. Промислове забруднення та урбанізація додатково погіршують ситуацію, порушуючи мікробіологічні процеси, відповідальні за гумусоутворення, що призводить до фізичного руйнування ґрунтових агрегатів та втрати здатності ґрунту до самовідновлення [6, 7].

Наслідки зниження рівня вуглецю мають катастрофічний характер як для сільського господарства, так і для екологічної стабільності планети в цілому [8]. Зменшення концентрації органічної речовини призводить до втрати ґрунтом його структурності, через що він стає вразливим до водної та вітрової ерозії, гірше утримує вологу та стає менш стійким до посух [9, 10]. З боку клімату цей процес перетворює ґрунти з потужного резервуара вуглецю на джерело парникових газів, що значно прискорює глобальне потепління. У підсумку це спричиняє падіння врожайності, ріст витрат на добрива для підтримки продуктивності та деградацію біорізноманіття, що ставить під загрозу продовольчу безпеку та стійкість природних екосистем до зовнішніх впливів [11, 12].

В Україні процес декарбонізації ґрунтів є однією з найгостріших екологічних проблем, що за останні роки набула статусу національної загрози. Згідно з даними Національного наукового центру «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», за останні 130 років українські чорноземи втратили близько 30% свого гумусу, а в окремих регіонах цей показник ще вищий [13]. Станом на 2024-2025 роки понад 25% усіх ґрунтів країни офіційно визнані деградованими, що охоплює площу близько 10-12 мільйонів гектарів сільськогосподарських угідь [14]. Основною причиною такого стрімкого падіння вмісту вуглецю є надмірна розораність земель, яка в Україні сягає майже 54%, що є одним із найвищих показників у світі та значно перевищує аналогічні цифри у США чи країнах Європейського Союзу [15].

Конкретні приклади декарбонізації яскраво простежуються в динаміці вмісту органічної речовини – якщо у 1980-х роках середній вміст гумусу в ґрунтах України становив близько 3,36%, то до 2020-х років він знизився до 3,14% і продовжує падати. Особливо критична ситуація спостерігається в зонах інтенсивного землеробства степу та лісостепу, де через відсутність достатньої кількості органічних добрив та ігнорування сівозмін баланс вуглецю стає від'ємним. За оцінками експертів, щорічні втрати гумусу через мінералізацію та ерозію становлять від 0,5 до 1 тонни на гектар, що в масштабах країни призводить до економічних збитків, які ще до початку повномасштабного вторгнення оцінювалися у 40 мільярдів гривень щорічно [16, 17].

Додатковим і надзвичайно важким фактором декарбонізації в сучасних умовах стала військова агресія, яка спричинила фізичне руйнування та хімічне забруднення величезних масивів земель [18, 19]. Викиди парникових газів внаслідок воєнних дій, за оцінками ініціативи IGGAW, становлять сотні мільйонів тонн CO₂-еквівалента, а значна частина вуглецю вивільняється безпосередньо через пожежі на полях та знищення лісосмуг [20, 21]. Водночас Україна активно інтегрується у світові процеси протидії цим змінам – у 2025 році було затверджено Другий національно визначений внесок (НВВ2), який ставить амбітну мету скоротити викиди на 65% до 2035 року. В агросекторі це проявляється через впровадження технологій No-till та Strip-till, розвиток ринку карбонових сертифікатів та запуск пілотних проектів із регенеративного землеробства, спрямованих на повернення вуглецю в ґрунт.

Необхідність розроблення кіберфізичної системи визначення вмісту вуглецю в ґрунтах в умовах антропогенного навантаження обумовлена критичною необхідністю розв'язання глобальних екологічних викликів, серед яких деградація земель та зміна клімату посідають чільне місце [22]. Вуглець є фундаментальним показником родючості ґрунту та ключовим компонентом глобального циклу колаобігу речовин, що безпосередньо впливає на продовольчу безпеку та здатність екосистем до самовідновлення. В умовах інтенсивного антропогенного впливу, що проявляється через надмірне сільськогосподарське використання, промислове забруднення та урбанізацію, природний баланс вуглецю порушується, призводячи до масштабних викидів парникових газів у атмосферу. Відтак, розробка точних методів моніторингу та оцінки запасів органічного вуглецю стає стратегічним завданням для сталого розвитку аграрного сектору та збереження природних ресурсів.

Традиційні методи аналізу ґрунту, що базуються на лабораторних хімічних дослідженнях, у сучасних реаліях демонструють значні обмеження через свою тривалість, високу вартість та неможливість оперативного отримання даних у просторово-часовому масштабі [23]. Це створює інформаційний розрив між реальними змінами у стані ґрунтового покриву та швидкістю прийняття управлінських рішень, що особливо критично в зонах з високим антропогенним навантаженням. Виникає гостра потреба у переході до автоматизованих рішень, які дозволяють

здійснювати дистанційний та контактний моніторинг у режимі реального часу. Саме тому впровадження кіберфізичних систем (КФС) стає логічним етапом цифрової трансформації екологічного моніторингу, об'єднуючи фізичні процеси вимірювання з потужними обчислювальними алгоритмами аналізу даних.

Актуальність використання саме кіберфізичного підходу полягає у можливості створення інтегрованого середовища, де сенсорні мережі, засоби передачі даних та інтелектуальні системи обробки інформації працюють як єдиний механізм [24]. Такі системи здатні враховувати гетерогенність ґрунтового покриву та динаміку антропогенних чинників, забезпечуючи високу точність прогнозування деградаційних процесів. Застосування КФС дозволяє не лише констатувати поточний стан вмісту вуглецю, але й моделювати різні сценарії землекористування, що є незамінним інструментом для впровадження методів регенеративного землеробства та виконання міжнародних зобов'язань щодо декарбонізації економіки. Інтеграція технологій Інтернету речей (IoT) та хмарних обчислень у структуру КФС створює підґрунтя для формування глобальних мереж моніторингу ґрунтів.

Окремої уваги заслуговує наукова значущість розробки алгоритмічного забезпечення для таких систем, оскільки робота в умовах антропогенного навантаження вимагає фільтрації численних завад та врахування специфічних забруднювачів. Математичне моделювання динаміки вуглецю у складі кіберфізичної платформи дає змогу виявити приховані закономірності трансформації органічної речовини під впливом техногенних факторів. Це відкриває нові перспективи для фундаментальної ґрунтознавчої науки та прикладної екології, дозволяючи перейти від дискретного спостереження до безперервного контролю життєво важливих параметрів екосистеми. Таким чином, створення КФС для визначення вуглецю є відповіддю на запит суспільства щодо прозорого та об'єктивного контролю за станом довкілля.

Практична реалізація дослідження має безпосереднє значення для розробки національних та регіональних стратегій адаптації до кліматичних змін та управління земельними ресурсами. Впровадження автоматизованих систем визначення вуглецю сприятиме підвищенню інвестиційної привабливості агропромислового комплексу через верифікацію карбонових сертифікатів та підтвердження екологічності продукції. Враховуючи вищезазначене, розробка кіберфізичної системи моніторингу вуглецю в ґрунтах в умовах антропогенного навантаження є своєчасною та необхідною науково-технічною відповіддю на сучасні виклики, що стоять перед Україною та світовою спільнотою в контексті збереження біосфери та переходу до кліматично нейтральної моделі розвитку [25].

Огляд відомих методів та засобів

Проведемо огляд відомих методів та засобів щодо визначення вмісту вуглецю в ґрунтах в умовах антропогенного навантаження.

Точне кількісне визначення вмісту органічного вуглецю у ґрунті є важливим для оцінки вуглецевих кредитів. Метою дослідження [26] було визначити, який аналітичний метод слід використовувати для визначення вмісту органічного вуглецю в ґрунті для оцінки вуглецевих кредитів. Дослідження показало, що метод повного сухого згоряння (TDC) все ще слід вважати кращим методом визначення вмісту органічного вуглецю у ґрунті для оцінки вуглецевих кредитів у Південній Африці. Методу Уоклі-Блека (WB) слід уникати, якщо очікується, що ґрунт матиме високий вміст органічного вуглецю у ґрунті, тоді як метод втрат при прогорянні (LOI) все ще можна використовувати для визначення органічного складу ґрунту, однак цього методу слід уникати при визначенні вмісту органічного вуглецю у ґрунті.

Дослідження [27] довело, що для вимірювання вмісту органічного вуглецю в міських ґрунтах, що містять карбонати, особливо доломіт, слід застосовувати метод дихроматного окислення. Було виявлено, що метод дихроматного окислення є простим, швидким і надійно визначає вміст органічного вуглецю.

Автори [28] досліджували видове багатство рослин та надземну біомасу, вміст органічного вуглецю та азоту у ґрунті, а також утримання води в ґрунті та інші фізичні параметри в степових екосистемах вздовж кліматичного трансекту, який охоплює пустельні степи, типові степові та лучно-степові зони Північного Китаю внаслідок чого виявили, що утримання органічної речовини та концентрація органічної речовини рослин, рівень насичення та концентрація вуглецю ґрунту, а також вміст органічного вуглецю та вміст солі суттєво взаємопов'язані та збільшуються зі збільшенням вологості клімату.

У довгострокових польових дослідженнях [29] було виявлено зв'язок між рівнем органічного вуглецю в ґрунтах та їх рН, а також вмістом доступних форм фосфору, калію та магнію. Вміст вуглецю виявився ефективним інструментом як для оптимізації рН, так і для збільшення використання Mg та фосфору, накопичених в агроекосистемах у формах, недоступних для рослин.

У статті [30] описано виготовлення нового потенціометричного сенсора для визначення іона церію на основі вуглецевого пастового електрода як індикаторного електрода. Для виготовлення вуглецевого пастового електрода було використано чотири компоненти. Відсоток кожного компонента вуглецевого пастового електрода було оптимізовано за допомогою симплексної ґратчастої суміші, включаючи 20 експериментальних прогонів. Сенсор був успішно використаний для аналізу зразків ґрунту та реальної води з відновленням від 90,7 до 104,2%. Переваги сенсора включають просте виготовлення, низьку вартість, легкість експлуатації, широкий лінійний діапазон, короткий час відгуку, високий термін служби та відповідну селективність.

Запаси органічного вуглецю у ґрунті суттєво зазнають впливу від експлуатації відкритих вугільних шахт, а взаємозв'язки факторів, що впливають на запаси органічного вуглецю у ґрунті, є складними. Фактори впливу запасів органічного вуглецю у ґрунті на рекультивованих землях незрозумілі, а існуючі моделі не

можуть достатньою мірою охарактеризувати складні взаємозв'язки запасів органічного вуглецю у ґрунті. У статті [31] проаналізовано фактори впливу запасів органічного вуглецю у ґрунті за допомогою теорії складних мереж. Було проведено дослідження ґрунту, топографії та рослинності на 50 рекультивованих ділянках. Були розраховані характеристики мережі, включаючи ступінь, проміжність та середній найкоротший шлях тощо. Це дослідження надало орієнтир для вибору раціональних заходів з рекультивації земель для збільшення запасів вуглецю в ґрунті.

Органічний вуглець ґрунту відіграє життєво важливу роль у рості та розвитку рослин, і тому вважається одним з найважливіших показників якості ґрунту. Дослідження [32] було проведено в центральному регіоні Саудівської Аравії з метою вивчення потенціалу спектроскопії у визначенні концентрації органічного вуглецю у ґрунті з низькою родючістю. Збільшення концентрації органічного вуглецю у ґрунті було пов'язане зі зменшенням відповідного спектрального відбиття. Регресійний аналіз показав лінійні залежності з високою значущою кореляцією між спектральним коефіцієнтом відбиття та вмістом органічного вуглецю. Результати цього дослідження показали можливість та потенціал використання методу спектрального відбиття для прогнозування концентрації органічного вуглецю.

Спектроскопія відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні має потенціал бути надійним методом для точного кількісного визначення органічного вуглецю ґрунту. Метою дослідження [33] було оцінити ефективність спектроскопії відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні для точного кількісного прогнозування органічного вуглецю ґрунту. Були виявлені значні взаємозв'язки для прогнозованого органічного вуглецю ґрунту у порівнянні з лабораторно виміряним органічним вуглецем ґрунту для всіх оцінених моделей, незалежно від методу валідації. Аналогічно у дослідженні [34] для визначення органічного вуглецю, загального азоту та їх співвідношення у чорноземі Північно-Східного Китаю було використано ближню інфрачервону відбивну спектроскопію.

Моделі миттєвого витоку CO₂ з ґрунту є критично важливими для розуміння потенційних рушійних сил втрати вуглецю з ґрунту. Метою дослідження [35] було порівняти та перевірити вибрані рівняння на основі температури ґрунту та вмісту води для моделювання миттєвого витоку CO₂ з ґрунту серед різних систем вирощування сільськогосподарських культур та практик управління земельними ресурсами.

Дослідження [36] оцінювало сезонний відтік CO₂ з ґрунту з 5 га сільськогосподарських угідь у Мерседі, Каліфорнія, регіоні з спекотним середземноморським кліматом, під час переходу від пасовищ, що зрошуються затопленням, до сільськогосподарських угідь, що зрошуються дощами. Швидкість витоку CO₂ вимірювалася за допомогою недорогих портативних датчиків CO₂ під час синоптичних кампаній відбору проб з літа/осені 2022 року до осені 2024 року.

Автори [37] пропонують нову спектрально-часово-просторову систему об'єднання для картографування органічного вуглецю ґрунту, яка інтегрує гіперспектральні супутникові знімки з багаточасовими мультиспектральними даними Landsat-8. Вони вводять напівконтрольовану спектрально-часово-просторову мережу об'єднання на основі регіонального енергетично-зваженого дискретного вейвлет-перетворення (RDWT-SSTSFN) для оптимізації процесу об'єднання. Оцінюючи чотири прогностичні моделі, включаючи Random Forest (RF), Extreme Gradient Boosting (XGBoost), Categorical Boosting (CatBoost) та 1D Convolutional Neural Network (1D CNN), автори демонструють, що RF-моделі, побудовані з використанням даних, об'єднаних STS, досягають оптимальної продуктивності прогнозування та картування органічного вуглецю ґрунту. Це дослідження пропонує масштабоване супутникове рішення для моніторингу динаміки органічного вуглецю ґрунту в інтенсивних сільськогосподарських системах, безпосередньо підтримуючи точне збереження ґрунтів та кліматично розумні методи ведення сільського господарства.

Огляд [38] оцінює застосування двох дешевих кольорових датчиків NixPro та вимірювача магнітної сприйнятливості (κ) KT10 для оцінки органічного вуглецю ґрунту та потенційно токсичних металів у цих ґрунтах. Кольоровий датчик NixPro показав більш прийнятну точність прогнозування органічного вуглецю ґрунту у повітряно-сухих поверхневих ґрунтах, але його точність знизилась у вологих та гетерогенних умовах. Обидва датчики обмежені невеликою глибиною зондування, чутливістю до вологи та поганою переносимістю моделей. Однак їхнє спільне використання шляхом інтеграції оптичних та магнітних даних підвищує точність прогнозування, особливо в поєднанні з машинним навчанням, методами попередньої обробки та об'єднанням датчиків.

Дослідження [39] має на меті створити базову карту ґрунтового органічного вуглецю з просторовою роздільною здатністю 10 м, використовуючи супутникові знімки Sentinel-1 (синтетичний апертурний радар) та Sentinel-2 (багатоспектральний прилад), інтегровані з відбором ґрунтових проб. Прогнози ґрунтового органічного вуглецю були зроблені за допомогою моделі машинного навчання класифікаційного та регресійного дерева (CART) на платформі Google Earth Engine, використовуючи 40 змінних-предикторів, включаючи спектральні смуги та похідні індекси.

Мікро-ближня інфрачервона (мікро-NIR) спектроскопія стала перспективним методом для точної та економічно ефективної оцінки характеристик ґрунту порівняно з традиційними методами вологої хімії та звичайною ближньою інфрачервоною спектроскопією. У дослідженні [40] оцінено потенціал недорогого мікро-NIR-сенсора для прогнозування вмісту органічного вуглецю у ґрунті та глини в сільськогосподарських ґрунтах. Дослідження показує, що мікро-NIR-датчик є потенційною інновацією та може точно прогнозувати вміст органічного вуглецю та глини з досить помірною точністю для нормально розподіленого набору даних.

У статті [41] електромагнітний датчик розроблено з комбінацією індуктивності та ємності з використанням міжпальцевої та спіральної конструкції, яка була виготовлена на друкованих платах для перевірки імпедансу різних зразків ґрунту з метою визначення відсотка органічного вуглецю в ґрунті. Для перевірки запропонованої конструкції електромагнітного датчика спочатку органічний вуглець визначається за стандартною процедурою методу Уоклі-Блека (WB). Для виявлення вуглецю в ґрунті зразки були зібрані з різних пасторальних районів навколо Північного Сіднея, Австралія. Далі, імпеданс ґрунту вимірюється за допомогою запропонованого електромагнітного датчика та будується залежність між відсотком органічного вуглецю та вимірним імпедансом. Розроблена модель також перевірена експериментальними даними для прогнозування відсотка органічного вуглецю. Запропонований електромагнітний датчик має потенціал для використання на землі для виявлення вуглецю в ґрунті, враховуючи вплив температури, вологості та води.

Проведений огляд наукових досліджень свідчить про значне різноманіття підходів до визначення органічного вуглецю, проте водночас висвітлює суттєві обмеження традиційних методів у контексті оперативного моніторингу. Класичні лабораторні методи, такі як повне сухе згоряння або дихроматне окислення, залишаються еталонними за точністю, проте вони є занадто вартісними та інертними для використання в динамічних умовах антропогенного навантаження. Сучасні розробки все частіше схильються до використання непрямих методів, зокрема спектроскопії в ближньому інфрачервоному діапазоні та потенціометричних сенсорів, які забезпечують швидке отримання результатів. Проте аналіз показує, що поодинокі використання таких датчиків часто супроводжується зниженням точності через вплив вологості, температури та гетерогенності ґрунту, що вимагає розробки більш складних інтегрованих рішень.

Особливого значення набуває інтеграція апаратних засобів із методами машинного навчання та дистанційного зондування Землі, що дозволяє масштабувати локальні вимірювання до рівня карт територіального розподілу вуглецю. Використання супутникових даних Sentinel та Landsat у поєднанні з наземними електромагнітними та оптичними датчиками відкриває шлях до створення багаторівневих систем моніторингу. Однак існуючі моделі часто не враховують складні взаємозв'язки в екосистемах, що зазнали значного техногенного впливу, наприклад, на рекультивованих землях або в зонах інтенсивного видобутку копалин. Це підкреслює необхідність переходу від ізольованих інструментів до комплексних архітектур, здатних об'єднувати фізичний рівень збору даних із потужним аналітичним центром для прийняття рішень у режимі реального часу.

Таким чином, метою даного дослідження є розроблення спеціалізованої кіберфізичної системи, яка дозволить нівелювати недоліки окремих методів шляхом синергії датчиків та обробки сигналів. Створення такої системи спрямоване на забезпечення високої точності визначення вмісту вуглецю безпосередньо в польових умовах, враховуючи специфічні фактори антропогенного навантаження, такі як забруднення та зміна фізико-хімічних параметрів ґрунту. Майбутня кіберфізична система має стати надійним інструментом не лише для наукових досліджень, а й для практичного впровадження механізмів вуглецевих кредитів та сталого управління земельними ресурсами в умовах сучасних екологічних викликів.

Кіберфізична система визначення вмісту вуглецю в ґрунтах в умовах антропогенного навантаження

Розглянемо різні датчики визначення вмісту вуглецю в ґрунтах. Порівняльна характеристика таких датчиків вуглецю представлена у Таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика датчиків вуглецю

Тип датчика / Технологія	Принцип роботи	Переваги	Обмеження
Ближня інфрачервона спектроскопія (Vis-NIR)	Вимірює відбиття світла в діапазоні 350–2500 нм	Швидкий аналіз, не руйнує зразок, можливість встановлення на трактор	Чутливість до вологості ґрунту та його агрегатного стану (потребує калібрування)
Спектроскопія ПЛІС (LIBS)	Використання лазерного імпульсу для створення мікроплазми на поверхні ґрунту	Висока точність, здатність виявляти загальний вуглець (C) безпосередньо	Дороге обладнання, складність у польовому виконанні через вимоги до безпеки лазера
Неупруге розсіювання нейтронів (INS)	Обстріл ґрунту швидкими нейтронами та вимірювання гамма-випромінювання	Аналізує великий об'єм ґрунту (до 30-50 см вглиб) без відбору проб	Громіздке обладнання, використання радіоактивних джерел, висока ціна
Електропровідність та резистивність (EC)	Вимірювання здатності ґрунту проводити струм	Дуже дешевий та надійний метод для картування неоднорідності	Непрямий метод: кореляція з вуглецем залежить від типу глини та вологості
Дистанційне зондування (Супутники/БПЛА)	Аналіз спектральних індексів поверхні відкритого ґрунту	Можливість охоплення величезних територій одночасно	Працює лише на відкритому ґрунті (без рослинності), низька точність для глибоких шарів

Вибір технології зазвичай залежить від балансу між точністю та масштабованістю. Для точного картографування поля найкраще підходять мобільні Vis-NIR датчики, що монтуються на плуг або культиватор. Більшість оптичних датчиків (Vis-NIR) дуже чутливі до води. Оскільки вода поглинає світло в тих же діапазонах, що й органічні сполуки, результати можуть бути викривлені. Сучасні датчики часто оснащуються додатковим сенсором вологості для автоматичної корекції показників. Для наукових досліджень використовують LIBS, оскільки він дає найбільш наближені до хімічного аналізу результати. Для національного моніторингу оптимальним є поєднання супутникових даних з мережею наземних опорних точок (ground-truthing).

Порівняльний аналіз провідних комерційних рішень на ринку мобільних Vis-NIR датчиків представлені у Таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз провідних комерційних рішень на ринку мобільних Vis-NIR датчиків

Модель / Виробник	Країна	Тип інтеграції	Ключові вимірювальні можливості	Особливості та переваги
Precision Planting SmartDepth (з сенсором SmartFirmer)	США	Монтується на сошник сівалки	Органічна речовина (ОМ), вологість, температура, чистота борозни	Найпопулярніше рішення для посівної. Автоматично регулює глибину посіву залежно від вологості та вмісту гумусу
Veris iScan / MSP3	США	Окремий модуль на рамі (культиватор/ножі)	Органічна речовина (ОМ), рН, електропровідність (ЕС), вологість	MSP3 – це «золотий стандарт» галузі. Використовує сапфірове вікно, яке контактує з ґрунтом під тиском, що мінімізує перешкоди.
Topcon (NORAC) Soil-Max	Японія / Канада	Монтується на культиватор або плуг	Органічна речовина, текстура ґрунту, вологість	Використовує технологію спектроскопії для створення високоточних карт диференційованого внесення добрив (VRA)
CropScan 3300H (Next Instruments)	Австралія	Монтується на бункер або ґрунтообробне обладнання	Вуглець (SOC), азот, вологість	Спеціалізується на аналізі зерна та ґрунту. Має потужну хмарну платформу для аналітики накопичених даних
Geoprospectors Topsoil Mapper (TSM)	Австрія	Фронтальна навіска трактора (безконтактний + Vis-NIR модуль)	Ущільнення, вологість, вуглець (непрямо через ЕС та оптику)	Унікальний тим, що поєднує безконтактне електромагнітне зондування з оптичними даними для глибинного аналізу

Аналітичні параметри порівняння трьох найбільш поширених мобільних Vis-NIR датчиків представлені у Таблиці 3.

Таблиця 3

Аналітичні параметри порівняння трьох найбільш поширених мобільних Vis-NIR датчиків

Параметр	Veris MSP3	SmartFirmer	Topcon Soil-Max
Глибина аналізу	Регульована (до 15-20 см)	Глибина посіву (5-10 см)	Фіксована (в зоні контакту ножа)
Стійкість до зношення	Висока (сапфірове скло)	Середня (змінні накладки)	Висока
Складність калібрування	Потребує локальних проб	Передкалібрований (база даних)	Потребує локальних проб
Основна мета	Карти диференційованого внесення	Оптимізація посіву в борозну	Карти родючості

Переваги використання таких моделей: висока щільність даних (отримують тисячі точок вимірювання на гектар, що неможливо при ручному відборі проб), автоматизація (дані автоматично прив'язуються до GPS-координат і завантажуються в системи управління), економія (зниження витрат на лабораторні аналізи в довгостроковій перспективі).

Недоліки використання таких моделей: «ефект вологості» (якщо ґрунт занадто мокрий, Vis-NIR датчики схильні завищувати показники вуглецю), абразивний знос (оптичне вікно постійно контактує з камінням та піском, що потребує регулярного обслуговування), вартість входу (початкові інвестиції в обладнання Veris або Topcon можуть становити від \$15000 до \$40000).

Для побудови кіберфізичної системи визначення вмісту вуглецю в ґрунтах в умовах антропогенного навантаження важливо обрати датчики для визначення вмісту вуглецю в ґрунтах.

Для побудови ефективної кіберфізичної системи (КФС) вибір датчиків має базуватися на принципі багаторівневого збору даних, оскільки вміст вуглецю неможливо виміряти одним простим параметром у польових умовах. Результати порівняльного аналізу датчиків вуглецю для кіберфізичної системи визначення вмісту вуглецю в ґрунтах представлена у Таблиці 4. Оскільки КФС передбачає збір даних з різних рівнів, таблиця розділена за функціональним призначенням компонентів.

Таблиця 4

Результати порівняльного аналізу датчиків вуглецю для кіберфізичної системи визначення вмісту вуглецю в ґрунтах

Тип датчика	Приклад моделі	Параметр вимірювання	Точність / Надійність	Складність інтеграції	Переваги та обмеження в умовах КФС
Мультиспектральний	AS7265x (Triad)	Спектральне відбиття (18 каналів)	Висока (у сухому ґрунті)	Середня (I2C інтерфейс)	Дозволяє виявити специфічні «підписи» гумусу; чутливий до вологи
Мікро-NIR	Texas Instruments DLP NIRscan	Ближня ІЧ-спектроскопія	Дуже висока	Висока (потребує калібрування)	Найкращий для кількісного аналізу вуглецю; висока вартість модуля
Електромагнітний	Custom EM Sensor (LDC1612)	Імпеданс та діелектрична проникність	Середня	Висока (власна розробка)	Пряма кореляція з вуглецем через фізико-хімічні властивості; стійкий до бруду
Колориметричний	Nix Pro 2 / TCS34725	Колірні координати (CIELAB/RGB)	Помірна	Низька	Простий у використанні; потребує стабільного освітлення та ідеально рівної поверхні
Газовий NDIR	Sensirion SCD4x / MH-Z19	Концентрація CO ₂ (емісія)	Висока	Низька (I2C/UART)	Дозволяє оцінити динаміку втрати вуглецю в реальному часі через «дихання» ґрунту
Комбінований (TDR)	TEROS 12	Вологість, температура, провідність	Еталонна	Середня	Критично важливий для корекції даних інших датчиків (нівелювання впливу вологи)

При розробці КФС в умовах антропогенного навантаження (забруднення, ущільнення ґрунту) використання лише одного типу датчика призведе до значних похибок. Оптимальним рішенням для нашої роботи є інтеграція мультиспектрального датчика AS7265x (Triad) (для визначення хімічного складу) та електромагнітного датчика Custom EM Sensor (LDC1612) (для аналізу структури та вологості). Такий підхід дозволить програмному рівню КФС автоматично коригувати значення вмісту вуглецю, враховуючи зовнішні завади. Завдяки використанню таких недорогих модулів кіберфізична система матиме перевагу в

масштабованості, що дозволить створювати мережі датчиків для моніторингу великих площ у режимі реального часу, що є ключовим для оцінки вмісту вуглецю в ґрунтах.

Для забезпечення роботи кіберфізичної системи, яка поєднує спектральні та електромагнітні датчики, контролер повинен мати достатню обчислювальну потужність для алгоритмів машинного навчання (сенсорного злиття) та розвинені інтерфейси зв'язку. У Таблиці 5 наведено порівняння контролерів, які найкраще підходять для інтеграції обраних нами мультиспектрального та електромагнітного датчиків.

Таблиця 5

Порівняльний аналіз контролерів

Характеристика	ESP32-S3 (WROOM)	STM32H7 Series	Raspberry Pi Pico 2 (RP2350)	Arduino Portenta H7
Процесор	Двоядерний Xtensa® LX7 (240 MHz)	ARM® Cortex®-M7 (до 480 MHz)	Двоядерний ARM Cortex-M33 (150 MHz)	Dual-core M7 + M4 (480 MHz + 240 MHz)
Пам'ять (RAM/Flash)	512KB / 16MB	1MB / 2MB	520KB / 4MB+	8MB / 16MB
Бездротовий зв'язок	Wi-Fi 4, Bluetooth 5 (LE)	Відсутній (потребує модулів)	Відсутній (або версія W)	Wi-Fi, Bluetooth, Ethernet
Інтерфейси (I2C/UART/ADC)	Багато (гнучка матриця GPIO)	Дуже багато (промисловий стандарт)	Помірно (висока якість ADC)	Максимальна кількість (High-density)
Підтримка AI/ML	Спеціальні інструкції для прискорення ШІ	STM32Cube.AI (оптимізація)	Гарна підтримка TensorFlow Lite	Підтримка Edge Impulse
Енергоспоживання	Низьке (чудовий Deep Sleep)	Середнє	Дуже низьке	Високе
Орієнтовна вартість	Низька	Висока	Дуже низька	Дуже висока

Для кіберфізичної системи визначення вмісту вуглецю в ґрунтах в умовах антропогенного навантаження оптимальним вибором є контролер ESP32-S3, оскільки він найкраще відповідає концепції недорогої, але потужної кіберфізичної системи, що є актуальним для масового моніторингу сільськогосподарських угідь. Він має вбудовані апаратні прискорювачі для обчислень, що важливо для обробки спектральних даних на місці (Edge Computing). Наявність Wi-Fi та Bluetooth дозволяє легко передавати дані в мрежу без додаткових витрат.

Для кіберфізичної системи визначення вмісту вуглецю в ґрунтах вибір критичним є також вибір каналу зв'язку, оскільки він визначає автономність пристрою, дальність передачі даних у польових умовах та енергоспоживання. Обраний контролер ESP32-S3 вже має вбудовані Wi-Fi та Bluetooth, проте для професійного аграрного або екологічного моніторингу можуть знадобитися додаткові модулі. Порівняльний аналіз каналів зв'язку представлений у Таблиці 6.

Таблиця 6

Порівняльний аналіз каналів зв'язку

Технологія	Дальність	Енергоспоживання	Пропускна здатність	Переваги та обмеження для КФС
Wi-Fi (вбудовано)	До 100 м	Високе	Дуже висока	Ідеально для передачі великих масивів спектральних даних, але потребує наявності роутера поблизу (наприклад, у теплиці)
Bluetooth LE (вбудовано)	До 10-30 м	Дуже низьке	Низька	Найкращий варіант для польового зчитування даних агрономом безпосередньо на смартфон біля датчика
LoRaWAN (зовнішній модуль)	5–15 км	Мінімальне	Дуже низька	Оптимально для відкритих полів. Дозволяє передавати дані на великі відстані без мобільного покриття та працювати роками від батареї
NB-IoT / LTE-M	Покриття веж	Середнє	Середня	Надійний зв'язок через мережі мобільних операторів. Потребує SIM-карту та абонплату, але працює всюди, де є зв'язок
GSM (GPRS)	Покриття веж	Високе	Низька	Застарілий стандарт, високе споживання під час передачі, проте найдешевший серед модулів стільникового зв'язку

Враховуючи специфіку визначення вуглецю в умовах антропогенного навантаження (великі площі, віддалені ділянки), використаємо гібридний підхід, який підтримує ESP32-S3: LoRaWAN – як основний канал для автоматичної передачі результатів вимірювань раз на годину на центральний сервер, Bluetooth LE – як сервісний канал для калібрування спектрального та електромагнітного датчиків через мобільний застосунок безпосередньо на місці встановлення. Така комбінація зробить кіберфізичну систему енергонезалежною (здатною працювати від невеликої сонячної панелі) та максимальною адаптованою до реальних умов експлуатації в агросекторі України.

Підібрана апаратна конфігурація кіберфізичної системи базується на принципі синергії спектральних та електромагнітних методів, що забезпечує високу достовірність визначення вмісту вуглецю в умовах інтенсивного антропогенного навантаження. Використання мультиспектрального сенсора серії AS726x у поєднанні з електромагнітним датчиком LDC1612 дозволяє системі не лише фіксувати хімічні маркери органічної речовини, а й динамічно враховувати фізичні параметри ґрунту, такі як вологість та щільність, які часто викривляють результати поодиноких вимірювань. Такий мультисенсорний підхід у поєднанні з обчислювальною потужністю контролера ESP32-S3 закладає фундамент для реалізації алгоритмів обробки даних безпосередньо на місці збору, що мінімізує похибки та підвищує адаптивність системи до різних типів техногенно змінених ландшафтів.

Інтегрована комунікаційна архітектура, що поєднує енергоефективний протокол LoRaWAN для дистанційної передачі даних та Bluetooth LE для локального налаштування, перетворює окремі вимірювальні пристрої на повноцінний вузол глобальної мережі екологічного моніторингу. Обрані компоненти відзначаються оптимальним співвідношенням вартості та функціональності, що робить розроблену кіберфізичну систему масштабованою та придатною для масового впровадження в агропромисловому секторі України. Це дозволяє перейти від епізодичних лабораторних аналізів до безперервного контролю динаміки вуглецю, забезпечуючи надійну базу для верифікації екологічних ініціатив та ефективного управління земельними ресурсами в умовах кліматичних змін.

Отже, основні елементи кіберфізичної системи визначення вмісту вуглецю в ґрунтах в умовах антропогенного навантаження:

- 1) мультиспектральний датчик AS7265x;
- 2) електромагнітний датчик LDC1612;
- 3) контролер ESP32;
- 4) стандарт передачі даних – енергоефективний протокол LoRaWAN для дистанційної передачі даних та Bluetooth LE для локального налаштування.

Запропонована архітектура кіберфізичної системи визначення вмісту вуглецю в ґрунтах в умовах антропогенного навантаження базується на тривірневій ієрархії, що забезпечує ефективний збір та аналіз даних про стан ґрунту. Нижній (сенсорний) рівень представлений модулями AS7265x та LDC1612, які здійснюють зчитування первинних фізико-хімічних параметрів ґрунту. Середній рівень базується на мікроконтролері ESP32, який виконує функції інтелектуального шлюзу – здійснює агрегацію даних від датчиків через Bluetooth LE, проводить їх попередню фільтрацію та забезпечує подальшу трансляцію за допомогою енергоефективного протоколу LoRaWAN. Верхній рівень системи інтегрує аналітичне ядро та базу знань, де за допомогою методів опрацювання даних, які порівнюють отримані профілі ґрунту з еталонними значеннями в базі знань, відбувається інтерпретація комплексних показників і розпізнавання поточного стану ґрунту. Фінальний етап функціонування КФС передбачає генерацію керуючого впливу у вигляді інформаційного повідомлення для користувача про вміст вуглецю через мобільний застосунок або хмарне середовище, що дозволяє оперативно оцінювати рівень декарбонізації та приймати рішення щодо рекультивативної земелі.

Спроектуюмо архітектуру кіберфізичної системи визначення вмісту вуглецю в ґрунтах в умовах антропогенного навантаження – рис. 1.

Алгоритм функціонування кіберфізичної системи визначення вмісту вуглецю в ґрунтах в умовах антропогенного навантаження – логіка роботи системи розділена на чотири ключові фази, які забезпечують перетворення фізичного сигналу в інтелектуальне рішення:

1) фаза ініціалізації та збору (сенсорний рівень) - система активується за розкладом або запитом користувача; контролер ESP32 ініціює одночасне зчитування 18-канального спектрального профілю з датчика AS7265x та параметрів імпедансу з LDC1612; це дозволяє отримати комплексну картину стану ґрунту, де спектр відповідає за хімічний склад, а електромагнітні дані – за структуру та вологість;

2) фаза локальної обробки (рівень Edge Computing) – на контролері ESP32 виконується попередня фільтрація шумів; головне завдання цього етапу – валідація даних: якщо датчик зафіксував некоректні значення (наприклад, через критичне забруднення), система видає помилку; після перевірки дані агрегуються у компактний пакет для передачі;

3) фаза трансляції та хмарного аналізу (мережевий рівень) – використовуючи LoRaWAN, пакет даних передається на шлюз і далі у хмару; тут вступає в дію аналітичне ядро системи; проводиться порівняння отриманих спектральних «відбитків» із базою знань, що містить моделі антропогенного навантаження; застосовуються правила для встановлення аномалій рівня вуглецю;

4) фаза прийняття рішень (прикладний рівень) – на основі розрахованого вмісту вуглецю система автоматично класифікує стан ґрунту (норма, деградація, критичний стан); кінцевий результат із

рекомендаціями надсилається у мобільний застосунок користувача у вигляді push-повідомлення або оновлення графіку на дашборді.

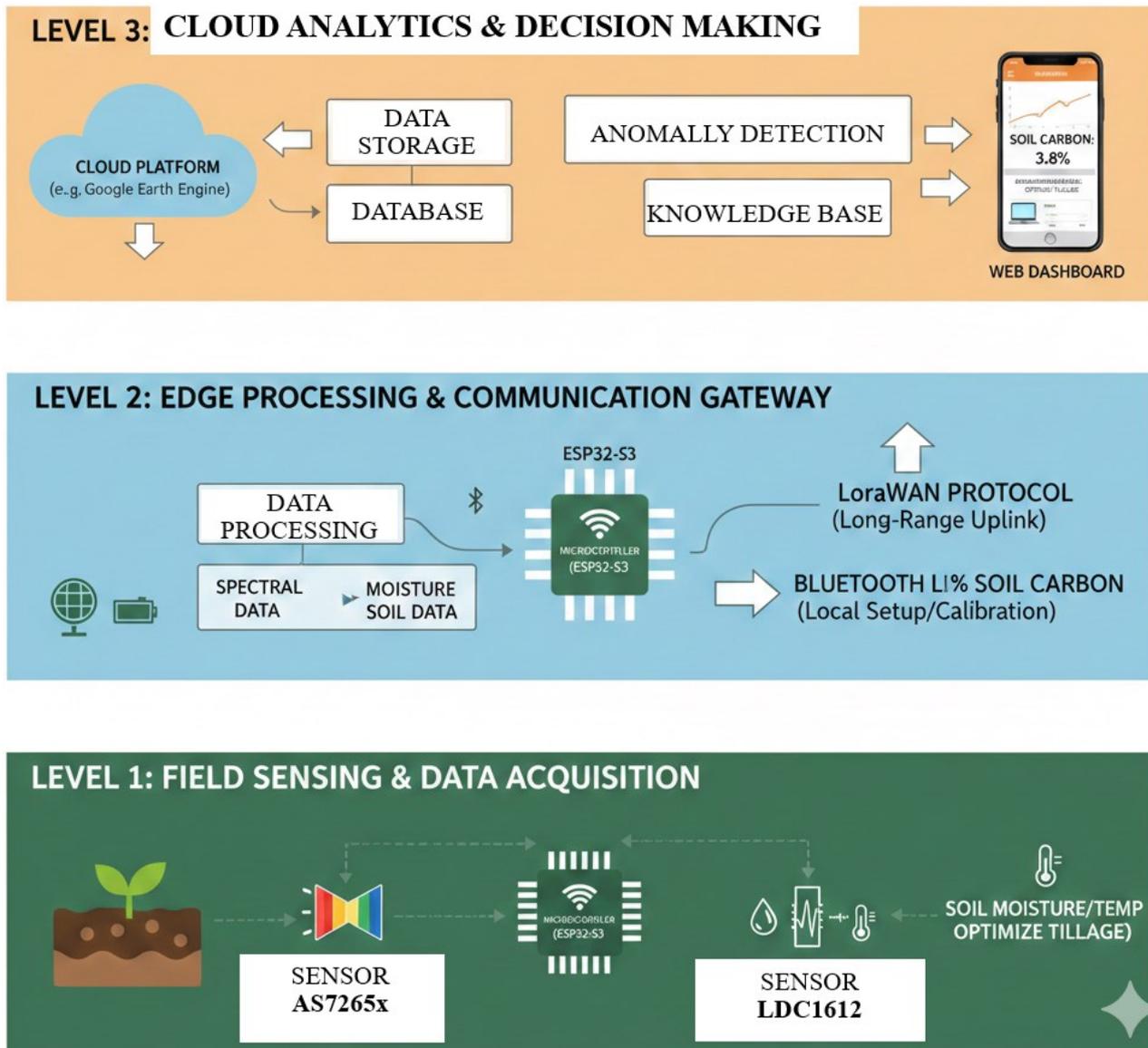


Рис. 1. Архітектура кіберфізичної системи визначення вмісту вуглецю в ґрунтах в умовах антропогенного навантаження

Переваги розробленої кіберфізичної системи визначення вмісту вуглецю в ґрунтах в умовах антропогенного навантаження полягають у синергії спектрального аналізу на базі сенсора AS7265x та електромагнітного зондування за допомогою LDC1612, що дозволяє отримувати точні кількісні показники органічного вуглецю в режимі реального часу без руйнівного впливу на ґрунтовий покрив. Застосування контролера ESP32-S3 забезпечує можливість інтелектуальної обробки сигналів на місці, що критично важливо для нівелювання похибок від вологості та специфічних антропогенних забруднювачів, а використання LoRaWAN гарантує стабільну передачу даних на великі відстані за мінімальних енерговитрат. Водночас основними обмеженнями системи є необхідність ретельного початкового калібрування спектральних моделей під конкретні типи техногенно змінених ґрунтів та певна залежність точності оптичних вимірювань від ступеня механічної підготовки поверхні зразка. Проте впровадження такої системи створює надійне підґрунтя для автоматизованого аудиту карбонових кредитів, дозволяючи аграріям та екологам оперативно виявляти зони деградації та впроваджувати заходи з рекуперації земель у найбільш критичних точках антропогенного навантаження.

Висновки

У результаті проведеного дослідження було обґрунтовано необхідність переходу від традиційних лабораторних методів аналізу ґрунту до автоматизованих кіберфізичних систем, що дозволяють здійснювати оперативний моніторинг вмісту вуглецю в умовах інтенсивного антропогенного навантаження. Аналіз сучасних технологічних рішень продемонстрував, що найбільш перспективним підходом є синергія спектрального аналізу на базі сенсора AS7265x та електромагнітного зондування за допомогою датчика LDC1612. Така апаратна конфігурація під управлінням контролера ESP32-S3 дозволяє динамічно враховувати

фізичні параметри ґрунту, мінімізуючи похибки вимірювань та забезпечуючи високу достовірність даних безпосередньо в польових умовах. Важливою перевагою обраного підходу є можливість компенсації «ефекту вологості», який часто викривляє результати оптичних датчиків, шляхом інтеграції даних від електромагнітного сенсора на рівні програмних алгоритмів системи.

Розроблена тривінева архітектура кіберфізичної системи визначення вмісту вуглецю в ґрунтах в умовах антропогенного навантаження забезпечує ефективний цикл перетворення первинних фізичних сигналів у конкретні управлінські рішення завдяки інтеграції методів інтелектуальної обробки даних на рівні Edge Computing та хмарної аналітики. Використання гібридної комунікаційної схеми, що поєднує протоколи LoRaWAN та Bluetooth LE, гарантує автономність, енергоефективність та масштабованість системи, роблячи її придатною для масового впровадження в агропромисловому секторі України. Впровадження такої кіберфізичної платформи створює надійну базу для верифікації карбонових кредитів та реалізації стратегій сталого землекористування, що є критично важливим для збереження біосфери та протидії глобальним кліматичним змінам.

Література

1. Soil organic carbon fractions and their associated bacterial and fungal abundance in alpine ecosystems / I. Fracasso et al. *Scientific Reports*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-31187-8>.
2. Song Q., Zhang W. Estimation and spatial distribution of soil organic carbon content in farmland using unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing technology. *Scientific Reports*. 2026. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-026-35096-2>.
3. Response of soil aggregate carbon and stability to simulated deposition of nitrogen and phosphorus in Pinus koraiensis forests / Y. Li et al. *Journal of Forestry Research*. 2026. Vol. 37, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s11676-026-01993-5>.
4. Partitioning soil carbon emissions in a temperate oak forest: insights from metabolic theory and the role of fine roots and microbial biomass / Y. Zhang et al. *Journal of Forestry Research*. 2025. Vol. 37, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s11676-025-01954-4>.
5. Tittor A. Postfossil extractivism. A new lens on decarbonization's land and material intensity. *The Journal of Peasant Studies*. 2026. P. 1–24. URL: <https://doi.org/10.1080/03066150.2025.2606878>.
6. HE K., WANG L., LIU Z. Global decarbonization corresponding with unseasonal land cover change. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63144-4>.
7. Mobilizing mine lands for biobased decarbonization strategies / M. Wahlstrom et al. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1002/bbb.2766>.
8. Mutual reinforcement of land-based carbon dioxide removal and international emissions trading in deep decarbonization scenarios / J. Morris et al. *Nature Communications*. 2024. Vol. 15, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49502-8>.
9. Planning the Built Environment and Land Use Towards Deep Decarbonization of the United States / D. Hsu et al. *Journal of Planning Literature*. 2022. P. 088541222210979. URL: <https://doi.org/10.1177/08854122221097977>.
10. Janus J., Ertunç E. Impact of land consolidation on agricultural decarbonization: Estimation of changes in carbon dioxide emissions due to farm transport. *Science of The Total Environment*. 2023. P. 162391. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162391>.
11. Deep decarbonization options for the agriculture, forestry, and other land use (AFOLU) sector in Africa: a systematic literature review / C. N. Anyanwu et al. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. Vol. 195, no. 5. URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11184-y>.
12. Estimating land cover-based soil organic carbon to support decarbonization and climate resilience planning in Massachusetts / S. Gutwein et al. *Soil Security*. 2022. P. 100076. URL: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100076>.
13. Black soil in Ukraine has lost its nutrients. URL: <https://ua.korrespondent.net/business/3792523-chornozemy-v-ukraini-vtratyly-pozhyvni-rechovyny-ekspert>.
14. The proportion of degraded soils in Ukraine exceeds 25%. URL: <https://surl.li/leuxbh>.
15. The condition of Ukrainian soil is becoming a problem for the country's environmental security. URL: <https://superagronom.com/news/9421-stan-ukrayinskih-gruntiv-staye-problemoyu-ekologichnoyi-bezpeki-krayini>.
16. If no action is taken, 95% of the Earth's surface will be degraded soil by 2050. URL: <https://superagronom.com/news/16404-yakscho-ne-vjivati-zahodiv-to-do-2050-roku-95-zemnoyi-poverhni-budut-stanoviti-degradovani-grunti--ekspertka>.
17. What is Soil Degradation? URL: <https://surl.li/indy1x>.
18. Total losses of the Ukrainian agricultural sector from the full-scale invasion reached almost \$84 billion. URL: <https://superagronom.com/news/21979-zagalni-vtrati-ukrayinskogo-apk-vid-povnomasshtabnogo-vtorgnennya-syagnuli-mayje-84-mlrd>.
19. Ukraine estimates the environmental damage caused by the war at \$44 billion: why this is important for the environment and for responsible business. URL: <https://ueco.com.ua/news/ukrajina-ocinyuye-ekologichni-zbitki-viyni-u-44-mlrd-chomu-ce-vazhlivo-dlya-dovkillya-ta-dlya-vidpovidalnogo-biznesu>.
20. The war has turned Ukraine's black soil into the most damaged soil. URL: <https://landlord.ua/news/150402>.

21. War: Ukraine's soil has suffered. URL: <https://www.zerno-ua.com/news/vijna-postrazhdaly-grunty-ukrayiny/>.
22. Baliuk S., Shymel' V. On the state and tasks of soil organic carbon management. *Visnyk agrarnoi nauky*. 2024. Vol. 102, no. 6. P. 5–13. URL: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202406-01>.
23. Hutsol H. V., Kovalenko N. V. The carbon deposition in soils and its impact on crop yield: basic concepts. *Taurian Scientific Herald*. 2024. No. 140. P. 119–124. URL: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.140.15>.
24. Carbon farming. Making agriculture fit for 2030. URL: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/695482/IPOL_STU%282021%29695482_EN.pdf.
25. Environmental management in the system of digital innovations for sustainable development: strategies for the green economy, metallurgy, and business: collective monograph / edited by Prof. V. G. Voronkova, PhD in Philosophy, and Prof. N. G. Metelenko, PhD in Economics. Lviv – Toruń: Liha-Pres, 2025. 742 p.
26. Cloete W. H., du Preez G., Van Zijl G. M. The carbon credit conundrum: Which analytical method should be used for determining soil organic carbon content in South Africa?. *Geoderma Regional*. 2025. P. e00947. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e00947>.
27. Comparison of methods for determining organic carbon content of urban soils in Central Ohio / T. D. Burgos Hernández et al. *Geoderma Regional*. 2023. Vol. 34. P. e00680. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00680>.
28. Soil water retention capacity surpasses climate humidity in determining soil organic carbon content but not plant production in the steppe zone of Northern China / K. Tang et al. *Ecological Indicators*. 2022. Vol. 141. P. 109129. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109129>.
29. Kuśmierz S. Węgiel organiczny jako czynnik determinujący pH i zawartość składników pokarmowych w glebach. *PRZEMYSŁ CHEMICZNY*. 2021. Vol. 1, no. 8. P. 60–63. URL: <https://doi.org/10.15199/62.2021.8.7>.
30. Fakhrabad A. H., Khoshnood R. S., Abedi M. R., Ebrahimi M. Sensitive and Selective Potentiometric Sensor Based on Carbon Paste Electrode for Determining Cerium(III) Ions in Soil and Water Samples; Simplex Lattice Mixture Design Application. *Analytical and Bioanalytical Electrochemistry*. 2022.
31. Zhang Z., Wang J., Li B. Determining the influence factors of soil organic carbon stock in opencast coal-mine dumps based on complex network theory. *CATENA*. 2019. Vol. 173. P. 433–444. URL: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.030>.
32. Determining soil organic carbon concentration in agricultural fields using a handheld spectroradiometer: Implication for soil fertility measurement / E. Tola et al. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018. Vol. 11, no. 6. P. 13–19. URL: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181106.4061>.
33. Bushong J. T., Norman R. J., Slaton N. A. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy as a Method for Determining Organic Carbon Concentrations in Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2015. Vol. 46, no. 14. P. 1791–1801. URL: <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1048250>.
34. Shen Y., Zhang X.-P., Liang Ai-Z., Shi X.-H., Fan Ru-Q., Yang X.-M. Near infrared spectroscopy in determining organic carbon and total nitrogen in black soil of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2010.
35. Comparison of Models for Determining Soil-Surface Carbon Dioxide Effluxes in Different Agricultural Systems / A. L. Daigh et al. *Agronomy Journal*. 2015. Vol. 107, no. 3. P. 1077–1086. URL: <https://doi.org/10.2134/agronj14.0423>.
36. Low-Cost CO₂ Sensors Reveal Seasonal and Management-Driven Soil Carbon Fluxes in a Mediterranean Agroecosystem / H. Flores-Landeros et al. *Environmental Technology & Innovation*. 2026. P. 104743. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104743>.
37. Enhanced mapping of soil organic carbon in China's Black Soil Region using spectral-temporal-spatial fusion of multi-sensor satellite data / J. Lv et al. *Soil and Tillage Research*. 2026. Vol. 257. P. 106965. URL: <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106965>.
38. Low-Cost Proximal Sensors for Assessing Organic Carbon and Potentially Toxic Metals in Highly Weathered Soils: A Systematic Review / M. D. Cascante et al. *Soil Security*. 2025. P. 100208. URL: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2025.100208>.
39. Spatial distribution of mangrove soil organic carbon in Indus Delta, Pakistan: A multi-sensor remote sensing and machine learning approach / H. Gilani et al. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2025. Vol. 323. P. 109435. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2025.109435>.
40. Liu J., Munnaf M. A., Mouazen A. M. Micro-Near-Infrared (Micro-NIR) sensor for predicting organic carbon and clay contents in agricultural soil. *Soil and Tillage Research*. 2024. Vol. 242. P. 106155. URL: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106155>.
41. Design an Electromagnetic Sensor to Measure the Organic Carbon in Soil and its Validation with Standard Walkley-Black Method / W. A. K. Afridi et al. *IEEE Sensors Letters*. 2023. P. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/lSENS.2023.3328591>.

References

1. Soil organic carbon fractions and their associated bacterial and fungal abundance in alpine ecosystems / I. Fracasso et al. *Scientific Reports*. 2025.
2. Song Q., Zhang W. Estimation and spatial distribution of soil organic carbon content in farmland using unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing technology. *Scientific Reports*. 2026.

3. Response of soil aggregate carbon and stability to simulated deposition of nitrogen and phosphorus in *Pinus koraiensis* forests / Y. Li et al. *Journal of Forestry Research*. 2026. Vol. 37, no. 1.
4. Partitioning soil carbon emissions in a temperate oak forest: insights from metabolic theory and the role of fine roots and microbial biomass / Y. Zhang et al. *Journal of Forestry Research*. 2025. Vol. 37, no. 1.
5. Tittor A. Postfossil extractivism. A new lens on decarbonization's land and material intensity. *The Journal of Peasant Studies*. 2026. P. 1–24.
6. HE K., WANG L., LIU Z. Global decarbonization corresponding with unseasonal land cover change. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16, no. 1.
7. Mobilizing mine lands for biobased decarbonization strategies / M. Wahlstrom et al. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2025.
8. Mutual reinforcement of land-based carbon dioxide removal and international emissions trading in deep decarbonization scenarios / J. Morris et al. *Nature Communications*. 2024. Vol. 15, no. 1.
9. Planning the Built Environment and Land Use Towards Deep Decarbonization of the United States / D. Hsu et al. *Journal of Planning Literature*. 2022. P. 088541222210979.
10. Janus J., Ertunç E. Impact of land consolidation on agricultural decarbonization: Estimation of changes in carbon dioxide emissions due to farm transport. *Science of The Total Environment*. 2023. P. 162391.
11. Deep decarbonization options for the agriculture, forestry, and other land use (AFOLU) sector in Africa: a systematic literature review / C. N. Anyanwu et al. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. Vol. 195, no. 5.
12. Estimating land cover-based soil organic carbon to support decarbonization and climate resilience planning in Massachusetts / S. Gutwein et al. *Soil Security*. 2022. P. 100076.
13. Black soil in Ukraine has lost its nutrients. URL: <https://ua.korrespondent.net/business/3792523-chomozemy-v-ukraini-vtratyly-pozhyvni-rechovyny-ekspert>.
14. The proportion of degraded soils in Ukraine exceeds 25%. URL: <https://surl.li/leuxbh>.
15. The condition of Ukrainian soil is becoming a problem for the country's environmental security. URL: <https://superagronom.com/news/9421-stan-ukrayinskih-gruntiv-staye-problemoyu-ekologichnoyi-bezpeki-krayini>.
16. If no action is taken, 95% of the Earth's surface will be degraded soil by 2050. URL: <https://superagronom.com/news/16404-yakscho-ne-vjivati-zahodiv-to-do-2050-roku-95-zemnoyi-poverhni-budut-stanoviti-degradovani-grunti--ekspertka>.
17. What is Soil Degradation? URL: <https://surl.li/indylyx>.
18. Total losses of the Ukrainian agricultural sector from the full-scale invasion reached almost \$84 billion. URL: <https://superagronom.com/news/21979-zagalni-vtrati-ukrayinskogo-apk-vid-povnomasshtabnogo-vtorgnennya-syagnuli-mayje-84-mlrd>.
19. Ukraine estimates the environmental damage caused by the war at \$44 billion: why this is important for the environment and for responsible business. URL: <https://ueco.com.ua/news/ukrajina-ocinyuye-ekologichni-zbitki-viyini-u-44-mlrd-chomu-ce-vazhlivo-dlya-dovkilliya-ta-dlya-vidpovidalogo-biznesu>.
20. The war has turned Ukraine's black soil into the most damaged soil. URL: <https://landlord.ua/news/150402>.
21. War: Ukraine's soil has suffered. URL: <https://www.zerno-ua.com/news/vijna-postrazhdaly-grunt-yukrayiny/>.
22. Baliuk S., Shymel' V. On the state and tasks of soil organic carbon management. *Visnyk agrarnoi nauky*. 2024. Vol. 102, no. 6. P. 5–13.
23. Hutsol H. V., Kovalenko N. V. The carbon deposition in soils and its impact on crop yield: basic concepts. *Taurian Scientific Herald*. 2024. No. 140. P. 119–124.
24. Carbon farming. Making agriculture fit for 2030. URL: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/695482/IPOL_STU%282021%29695482_EN.pdf.
25. Environmental management in the system of digital innovations for sustainable development: strategies for the green economy, metallurgy, and business: collective monograph / edited by Prof. V. G. Voronkova, PhD in Philosophy, and Prof. N. G. Metelenko, PhD in Economics. Lviv – Toruń: Liha-Pres, 2025. 742 p.
26. Cloete W. H., du Preez G., Van Zijl G. M. The carbon credit conundrum: Which analytical method should be used for determining soil organic carbon content in South Africa?. *Geoderma Regional*. 2025. P. e00947.
27. Comparison of methods for determining organic carbon content of urban soils in Central Ohio / T. D. Burgos Hernández et al. *Geoderma Regional*. 2023. Vol. 34. P. e00680.
28. Soil water retention capacity surpasses climate humidity in determining soil organic carbon content but not plant production in the steppe zone of Northern China / K. Tang et al. *Ecological Indicators*. 2022. Vol. 141. P. 109129.
29. Kuśmierz S. Węgiel organiczny jako czynnik determinujący pH i zawartość składników pokarmowych w glebach. *PRZEMYSŁ CHEMICZNY*. 2021. Vol. 1, no. 8. P. 60–63.
30. Fakhrabad A. H., Khoshnood R. S., Abedi M. R., Ebrahimi M. Sensitive and Selective Potentiometric Sensor Based on Carbon Paste Electrode for Determining Cerium(III) Ions in Soil and Water Samples; Simplex Lattice Mixture Design Application. *Analytical and Bioanalytical Electrochemistry*. 2022.
31. Zhang Z., Wang J., Li B. Determining the influence factors of soil organic carbon stock in opencast coal-mine dumps based on complex network theory. *CATENA*. 2019. Vol. 173. P. 433–444.
32. Determining soil organic carbon concentration in agricultural fields using a handheld spectroradiometer: Implication for soil fertility measurement / E. Tola et al. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018. Vol. 11, no. 6. P. 13–19.
33. Bushong J. T., Norman R. J., Slaton N. A. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy as a Method for Determining Organic Carbon Concentrations in Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2015. Vol. 46, no. 14. P. 1791–1801.
34. Shen Y., Zhang X.-P., Liang Ai-Z., Shi X.-H., Fan Ru-Q., Yang X.-M. Near infrared spectroscopy in determining organic carbon and total nitrogen in black soil of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2010.
35. Comparison of Models for Determining Soil-Surface Carbon Dioxide Effluxes in Different Agricultural Systems / A. L. Daigh et al. *Agronomy Journal*. 2015. Vol. 107, no. 3. P. 1077–1086.
36. Low-Cost CO₂ Sensors Reveal Seasonal and Management-Driven Soil Carbon Fluxes in a Mediterranean Agroecosystem / H. Flores-Landeros et al. *Environmental Technology & Innovation*. 2026. P. 104743.
37. Enhanced mapping of soil organic carbon in China's Black Soil Region using spectral-temporal-spatial fusion of multi-sensor satellite data / J. Lv et al. *Soil and Tillage Research*. 2026. Vol. 257. P. 106965.
38. Low-Cost Proximal Sensors for Assessing Organic Carbon and Potentially Toxic Metals in Highly Weathered Soils: A Systematic Review / M. D. Cascante et al. *Soil Security*. 2025. P. 100208.
39. Spatial distribution of mangrove soil organic carbon in Indus Delta, Pakistan: A multi-sensor remote sensing and machine learning approach / H. Gilani et al. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2025. Vol. 323. P. 109435.
40. Liu J., Munaf M. A., Mouazen A. M. Micro-Near-Infrared (Micro-NIR) sensor for predicting organic carbon and clay contents in agricultural soil. *Soil and Tillage Research*. 2024. Vol. 242. P. 106155.
41. Design an Electromagnetic Sensor to Measure the Organic Carbon in Soil and its Validation with Standard Walkley-Black Method / W. A. K. Afridi et al. *IEEE Sensors Letters*. 2023. P. 1–4.