

## МОНІТОРИНГ І ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТУ MONITORING AND SOIL PROPERTIES

УДК 631.417.1:632.125(4+477)

### Моніторинг деградації ґрунтів та динаміки органічного вуглецю: адаптація європейського досвіду та дорожня карта для України

Ю. М. Дмитрук<sup>1, 2, а, в</sup>, В. Р. Черлінка<sup>3, б</sup>, Н. П. Горбачова<sup>4, с</sup><sup>1</sup>ЗВО Подільський державний університет, Кам'янець-Подільський, Україна;<sup>2</sup>ДУ «Інститут охорони ґрунтів України», Київ, Україна;<sup>3</sup>Research & Solutions, Торонто, Канада,<sup>4</sup>Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
<p>Отримано 15.02.2026 Отримано після доопрацювання 02.06.2026 Затверджено до видання 08.06.2026 Доступно онлайн 30.06.2026</p> <hr/> <p><i>Ключові слова:</i></p> <p>деградація ґрунтів; органічний вуглець ґрунту; моніторинг; європейські стандарти; сільськогосподарські угіддя; гармонізація національного законодавства</p>	<p>Деградація ґрунтів є однією з найкритичніших екологічних проблем, що загрожує сільськогосподарській стійкості та продовольчій безпеці в Європі та в усьому світі. Європейський Союз, визнаючи актуальність цього питання, створив комплексні системи для моніторингу та захисту ґрунтів, що завершилося нещодавніми законодавчими ініціативами. Однак впровадження ефективних систем моніторингу ґрунтів вимагає значних фінансових та технічних ресурсів, що створює особливі труднощі для країн з економікою, що розвивається. Основна мета цього дослідження полягає в тому, щоб надати рекомендації для створення функціональної системи моніторингу ґрунту в Україні, яка б збалансувала наукову точність з економічною доцільністю, забезпечуючи при цьому сумісність з європейськими стандартами. Особливий акцент робиться на методах запобігання поширенню деградації та збереженню запасів органічного вуглецю у ґрунтах на сільськогосподарських землях. Україна входить до числа провідних світових виробників сільськогосподарської продукції, але стикається зі зростаючим тиском на виробництво і через процеси деградації ґрунтів. Плани європейської інтеграції вимагають узгодження зі стандартами ЄС щодо захисту ґрунтів, водночас діючи в умовах жорстких бюджетних обмежень. Це створює нагальну потребу критично оцінити європейський досвід та визначити економічно ефективні підходи до моніторингу, адаптовані до українських умов. На основі огляду доступних джерел проведено комплексний аналіз європейського досвіду моніторингу деградації ґрунтів та управління органічним вуглецем (SOC) на сільськогосподарських землях. Проаналізовано десятиліття європейських досліджень з оцінки деградації ґрунтів, динаміки органічного вуглецю та методологій моніторингу з особливим акцентом на сільськогосподарські угіддя. Дослідження охоплює огляд 54 рецензованих публікацій, систематизованих навколо методологічних кластерів: 1) деградація ґрунтів у Європі; 2) моніторинг та картування ґрунтів; 3) релевантність європейського досвіду для України. Показано, що Європейський центр даних про ґрунти (ESDAC) та база даних LUCAS (близько 20 тис. точок на 4,2 млн км<sup>2</sup>) забезпечують стандартизовану платформу для моніторингу стану ґрунтів у масштабі континенту. Встановлено, що втрати SOC на орних землях Європи за останнє десятиліття становлять 0,3–0,5 % щорічно, що реально загрожує продуктивності агроєкосистем. Критичний аналіз економічних витрат від деградації ґрунтів в Англії та Уельсі (£0,9–1,4 млрд щорічно) підтверджує необхідність превентивних заходів. Для умов України запропоновано поетапне впровадження системи моніторингу ґрунтів, яка включає: 1) впровадження мережі реперних ділянок (щонайменше 650–700 точок для базової сітки; повне охоплення контрольованої на 2026 рік території — близько 2000 точок) для довгострокового спостереження за SOC; 2) створення національної бази даних ґрунтів (з вико-ристанням ДСТУ ISO 28258 як «інтерфейсу» бази даних), а також термінологічних та методичних стандартів (ISO 11074, ISO 25177) і стандартів геоінформаційних систем; 3) використання супутникових даних Sentinel-2 для картування деградації ґрунтів, насамперед ерозії; 4) застосування методів машинного навчання для цифрового картування властивостей ґрунтів при обмежених фінансових ресурсах. Серед запропонованих підходів: впровадження новітніх економічно ефективних методів (pXRF, vis-NIR спектроскопія), краудсорсингове залучення громадськості (Soil Citizen Science) для верифікації моделей дистанційного зондування, а також MRV-підходи для оцінювання ефективності агропрактик (4R, покривні культури, мінімальний обробіток ґрунту). Запропоновані рекомендації сприятимуть збереженню родючості ґрунтів і дозволять забезпечити гармонізацію української системи моніторингу ґрунтів з ЄС відповідно до вимог Soil Monitoring Law.</p>

✉ dmytruk.yur@gmail.com

ORCID: <sup>a</sup> 0000-0002-3157-0503, <sup>b</sup> 0000-0001-5354-4851, <sup>c</sup> 0009-0007-9862-2463

*Форма цитування:* Дмитрук Ю. М., Черлінка В. Р., Горбачова Н. П. Моніторинг деградації ґрунтів та динаміки органічного вуглецю: адаптація європейського досвіду та дорожня карта для України. *Агрохімія і ґрунтознавство* / ННЦ «Ін-т ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського». Харків, 2026. Вип. 100. С. 4–20. <https://doi.org/10.31073/acss100-01>

*Поширення статті здійснюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY-NC 4.0*

## 1. Вступ. Політика управління ґрунтами в ЄС

Сучасна політика ЄС базується на визнанні ґрунтів, як обмеженого ресурсу, що перебуває під критичним тиском [1]. Управління ґрунтами в Європі більше не розглядається лише в межах сільського господарства; воно інтегроване в глобальний порядок денний Цілей сталого розвитку ООН (ЦСР ООН). Ґрунти мають прямий вплив на досягнення більшості з 17 цілей, зокрема щодо продовольчої безпеки, чистих вод та кліматичних дій [2]. Тому основним трендом європейської «ґрунтової» політики є перехід від вузькоспеціалізованого ґрунтознавства до трансдисциплінарного управління, де ґрунт є ключовим інструментом досягнення ЦСР ООН. Політика управління в ЄС адаптується до зростаючого тиску глобальних змін. Інтенсивне землекористування та зміна клімату визнані основними драйверами деградації, що вимагає впровадження практик «сталого управління ґрунтами» для пом'якшення наслідків викидів парникових газів [3]. Ключовим викликом для політики ЄС вважають розрив між науковими знаннями та їх впровадженням. Тому Ґрунтова місія ЄС передбачає трансдисциплінарні дослідження, які об'єднують ґрунтознавців, землекористувачів, соціум та політиків [4]. Метою є перетворення наукових дескрипторів ґрунту на зрозумілі показники «екосистемних послуг», що дозволяє аргументувати політичні рішення на рівні Єврокомісії. Важливо підкреслити, що рішення розробляються з врахуванням регіональних проблем та особливостей, як наприклад для ідентифікації зон ризику деградації та опустелювання в реальному часі для Середземномор'я [5, 6].

## 2. Матеріали та методи. Дизайн та охоплення дослідження

Дослідження проведено у форматі систематизованого аналітичного огляду рецензованої наукової літератури та офіційних програмно-цілевих публікацій, присвячених процесам деградації ґрунтів, динаміці органічного вуглецю ґрунту (ОВГ), а також системам моніторингу ґрунтів в агроландшафтах Європи, з особливим акцентом на можливості їх застосування в Україні. Дизайн огляду передбачав досягнення таких цілей: – синтез сучасних наукових знань щодо домінуючих загроз деградації ґрунтів у Європі; – аналіз методологічних підходів до моніторингу ґрунтів та оцінки вмісту ОВГ; – ідентифікація адаптивних елементів європейських структур моніторингу ґрунтів, придатних для впровадження на національному рівні в умовах економічних обмежень.

*Критерії відбору літератури.* Процес відбирання літературних джерел здійснювали у три етапи. *Бази даних та джерела.* Пошук наукових публікацій проводили у таких міжнародних бібліографічних базах даних: Web of Science (Core Collection), Scopus, Google Scholar (для пошуку «сірої» літератури та останніх звітів). Крім того, було залучено офіційні документи та масиви даних європейських інституцій, зокрема: Європейського центру ґрунтових даних (ESDAC), публікації Спільного дослідницького центру (JRC), а також звіти Європейської Комісії щодо захисту та моніторингу ґрунтів.

*Часові межі.* Основний період огляду охоплює 2010–2024 роки, що відображає стрімку методологічну еволюцію у сферах моніторингу ґрунтів, цифрового ґрунтового картографування та моделювання динаміки ОВГ протягом цього часу. Для забезпечення концептуальної наступності було включено окремі класичні дослідження, опубліковані до 2010 року, які заклали фундаментальні методологічні засади (наприклад, ранні оцінки запасів ОВГ, концепції моделювання ерозії).

*Критерії включення та виключення.* Публікації включали до аналізу за умови відповідності всім наведеним критеріям: об'єктом дослідження є ґрунти Європи на землях с.-г. призначення або порівнянних регіонів помірною поясу; фокус на процесах деградації ґрунтів, динаміці ОБГ або методологіях ґрунтового моніторингу; опубліковані у рецензованих журналах або видані визнаними науковими чи державними інституціями; наявність кількісних даних, методологічних структур або синтезу, релевантного для цілей моніторингу чи управління.

Публікації не включали, якщо вони: стосувалися виключно несільськогосподарських екосистем; обмежувалися лабораторними експериментами без прив'язки до ландшафтного рівня; не мали методологічної прозорості або відтворюваності. У результаті для детального аналізу було відібрано 54 публікації.

*Кластеризація публікацій.* Для забезпечення аналітичної чіткості відібрані публікації було згруповано у три тематичні кластери: 1. Процеси деградації ґрунтів (водна та вітрова ерозія, ущільнення ґрунту, хімічна деградація, засолення). 2. Динаміка та моделювання органічного вуглецю ґрунту (запаси ОБГ, потенціал секвестрації, вплив землекористування, облік вуглецю). 3. Структури моніторингу та оцінювання ґрунтів (мережі моніторингу in situ, обстеження LUCAS, цифрове картографування ґрунтів, інтеграція даних дистанційного зондування Землі). Така кластеризація дозволила здійснити цільовий синтез у межах кожної галузі, зберігаючи при цьому взаємозв'язки між фізичною деградацією, біогеохімічними процесами та методологіями моніторингу.

*Синтез та аналітичний підхід.* Синтез базувався на порівняльному якісно-кількісному підході, що поєднував: нарративний синтез методологічних трендів; порівняння масштабів моніторингу, щільності відбору проб та індикаторів; оцінку економічної доцільності та складності впровадження. Особлива увага приділялася: гармонізації для різних просторових масштабів; інтеграції польових спостережень із даними дистанційного зондування; можливості застосування європейських моделей моніторингу в умовах дефіциту даних.

На заключному етапі аналізу увагу було зосереджено на виокремленні адаптивних принципів та формулюванні поетапної «дорожньої карти» розвитку системи моніторингу ґрунтів в Україні, узгодженої з європейськими стандартами з урахуванням національних обмежень.

*Методологічні обмеження.* Автори визнають, що оскільки це дослідження має характер огляду, аналіз залежить від доступності та якості опублікованих даних. Проте використання декількох баз даних, актуальної літератури та офіційних європейських масивів даних нівелює потенційну упередженість і забезпечує обґрунтованість висновків.

### **3. Результати та обговорення**

#### *3.1. Деградація ґрунтів у Європі*

##### *3.1.1. Розвиток методологій оцінювання*

Систематичне оцінювання деградації ґрунтів на континентальному та глобальному рівнях розпочалося з новаторської роботи Oldeman et al. [7], у якій розроблено методологію глобального оцінювання деградації ґрунтів, спричиненої людиною (GLASOD). Деградацію ґрунтів було класифіковано за типом (водна ерозія, вітрова ерозія, хімічна та фізична деградація), інтенсивністю та ступенем. Це стало основою для подальших регіональних оцінок [8]. Підхід GLASOD, незважаючи на свої обмеження в просторовій роздільній здатності та точності, забезпечив піонерний системний огляд моделей деградації.

Подальші методологічні вдосконалення зменшили ці обмеження за допомогою глобальних оцінок на основі проксі-показників. Bai et al. [9] розробили підхід до оцінки деградації земель на основі чистої первинної продуктивності (NDVI), включаючи дані дистанційного зондування та біофізичні показники. Еволюція методологій, заснованих на даних, продовжилася картографуванням деградації з високою роздільною здатністю, як запропонували Gibbs та Salmon [10], які створили карти глобальної деградації ґрунтів з безпрецедентною просторовою деталізацією.

### 3.1.2. Огляд проблем деградації ґрунтів агроєкосистем

*Водна ерозія* залишається найпоширенішим процесом деградації, що впливає на ґрунти на землях сільськогосподарського призначення Європи. Panagos et al. [11, 12] провели комплексне оцінювання втрат ґрунту внаслідок водної ерозії по всьому ЄС, використовуючи вдосконалену модель (RUSLE, 2015) універсального рівняння втрат ґрунту. Вони оцінили середні темпи втрат ґрунту в  $2,46 \text{ т га}^{-1} \text{ рік}^{-1}$ , при цьому на сільськогосподарські угіддя припадає 20,8 % від загальної ерозії. Ці дослідження, що включали дані високої роздільної здатності [13] та вдосконалені карти еродованості ґрунту, демонструють значну просторову неоднорідність, при цьому середземноморські регіони та райони інтенсивного сільського господарства зазнають втрат ґрунту, що перевищують  $10 \text{ т га}^{-1} \text{ рік}^{-1}$ .

Проведений метааналіз 2500 вимірювань у масштабі ділянок по всьому світу [14] продемонстрував, що темпи ерозії в Європі, хоча й помірні, порівняно з тропічними регіонами, значно перевищують темпи ґрунтоутворення (зазвичай  $0,3\text{--}1,4 \text{ т га}^{-1} \text{ рік}^{-1}$ ). Регіональні дослідження надають критично важливі дані для підтвердження: Evans [15] задокументував десятилітні результати моніторингу ерозії ґрунтів в Норфолку (Англія), при цьому 75 % річних втрат ґрунту відбувається під час екстремальних опадів. Аналогічно, Steinhoff-Knopf та Burkhard [16] представили результати моніторингу за 23 роки на території Нижньої Саксонії, (Німеччина), демонструючи часову мінливість темпів ерозії від 0,1 до  $15,8 \text{ т га}^{-1} \text{ рік}^{-1}$ . Prasuhn [17] проаналізував 20 років вимірювань на фермах у Швейцарії, продемонструвавши, що програми збереження (контурна оранка, покривні культури) зменшили втрати ґрунту на 30-50 %. Однак, рівень ерозії залишався вищим, ніж допустимі рівні на схилах стрімкістю понад 15 %, що підкреслює постійну необхідність захисту вразливих сільськогосподарських угідь.

У результаті стандартизації великих масивів вимірювань інтенсивності опадів з різних регіонів світу створено глобальні карти ерозійної здатності опадів і показано їх просторові закономірності. Наголошено, що саме цей показник є критично важливим для точного оцінювання ерозійного ризику, а отримані результати можуть використовуватися для глобального та регіонального моделювання водної ерозії, оцінки деградації земель і планування ґрунтозахисних заходів в умовах змін клімату [13]. Ці результати використали для розрахунку показників ерозійної здатності опадів (rainfall erosivity, фактор R у рівняннях водної ерозії), що найбільш чутливо відображають інтенсивні зливові події.

*Вітрова ерозія* спостерігається приблизно на 42 млн га європейських сільськогосподарських угідь, особливо в Середземноморському, Атлантичному та Континентальному регіонах [18]. Використовуючи переглянуте рівняння вітрової ерозії (RWEQ), адаптоване до європейських умов, Borrelli et al. [18] оцінили загальні втрати ґрунту, спричинені вітром, у  $0,87 \text{ т га}^{-1} \text{ рік}^{-1}$  для сільськогосподарських районів, і концентровані прояви вітрової ерозії, приурочені до південного сходу Іспанії, північної Німеччини та східноєвропейських рівнин.

Просторовий розподіл відображає взаємодію кліматичних факторів (швидкість вітру, опади), властивостей ґрунту (структура, грансклад, вміст органічних речовин) та методів управління земельними ресурсами (агроекологічні та ґрунтозахисні практики, планування та організація землекористування, економічні та фінансові інструменти тощо). На відміну від водної, вітрова ерозія має виражену сезонність, причому 70–80 % річних втрат припадає на весняні місяці, коли поверхня ґрунту оголена після обробітку ґрунту [18].

*Ущільнення ґрунту* є поширеним, але часто недооціненим процесом деградації, прояви якого виявлені на 32–36 % площ сільськогосподарських ґрунтів Європи [19]. Проведені дослідження [20–21] встановили механістичне розуміння динаміки ущільнення, документуючи вплив на об'ємну щільність, пористість, гідравлічну провідність та біологічну активність. Тиск техніки спричиняє деформацію порового простору, що змінює тензорні властивості насиченої гідравлічної провідності, роблячи потік води в ґрунті анізотропним та обмеженим [22].

Аналіз європейського масштабу DPSIR: «Рушійні сили (Driving Forces) – Тиск (Pressure) – Стан (State) – Вплив (Impact) – Реакція (Responses)» проведений Schjonning et al. [19], визначив механізацію агровиробництва як основну причину ущільнення, при цьому середнє навантаження на вісь за 50 років зросло з 3 Мг до >10 Мг. Автори [23] кількісно оцінили цю історичну тенденцію, продемонструвавши, що збільшення ваги техніки призвело до незворотної структурної деградації в підґрунтових шарах багатьох типів ґрунтів. Регіональні оцінки ущільнення ґрунтів виявляють істотну диференціацію [24] — встановлено, що 25 % сільськогосподарських ґрунтів Нідерландів мають ущільнене підґрунтя. Проведений економічний аналіз [25] дозволив оцінити щорічні збитки від зниження врожайності та втрат екосистемних послуг для ґрунтів Великобританії, спричинені ущільненням та збільшенням потреб в енергії для обробітку ґрунту. Ці результати підкреслюють економічну необхідність превентивних стратегій управління, включаючи контрольоване землеробство та зменшення навантаження на осі.

*Фізичну деградацію вважають* «тихою» загрозою: вона часто передуює хімічному виснаженню. Структура ґрунту сьогодні розглядається не просто як фізична характеристика, а як інтегрований індикатор здатності ґрунту виконувати свої екосистемні функції. Глобальний мета-аналіз доводить, що перехід від природних екосистем до інтенсивної ріллі суттєво погіршує водопровідність та здатність ґрунту утримувати вологу [26]. Деградація структури — це перехід від складної, зв'язаної мережі пор (природна архітектура пор) до ізольованої або хаотичної системи. Короткострокова регенерація структури часто не здатна відновити складність мережі пор, що критично впливає на газотранспортні функції та утримання води [27]. Прямим наслідком деградації структури ґрунту є зниження повітропроникності. Це обмежує доступ кисню до кореневої системи та мікробіому, що стає проблемою для врожайності [28]. Структуру ґрунту вважають посередником між фізичними процесами та біологічною продуктивністю [29]. Деградований ґрунт втрачає здатність до інфільтрації, що призводить до посилення поверхневого стоку, ерозії та підвищення ризику паводків. До того ж фізично деградовані ґрунти мають меншу опірність як до посух, так і до надмірного зволоження.

*Траєкторії підкислення та забруднення ґрунтів.* Довгостроковий моніторинг змін рН ґрунту дає уявлення про динаміку підкислення та відновлення після скорочення викидів. Проаналізовані зміни рН ґрунту в Англії та Уельсі у роки з 1978 до 2003 [30], задокументували підвищення рН (0,2–0,6 одиниці) у відповідь на зменшення кількості кислотних опадів після впровадження Закону про чисте повітря. Відновлення демонструвало просторову мінливість, що відображає початковий рН, буферну здатність ґрунту, зміни в методах вапнування

та землекористування, а також скорочення опадів. Інші автори [31] досліджували підкислення ґрунтів на півдні Швейцарії протягом 1987–1997 років, використовуючи рамки критичного навантаження. Незважаючи на скорочення осадження сірки, осадження азоту продовжувалося на рівнях, що перевищують критичні навантаження для чутливих лісових ґрунтів, що призводило до стійкого підкислення ґрунтів із низькою буферністю. Це підкреслює складну часову динаміку відновлення хімічного складу ґрунту та важливість управління кількома факторами підкислення.

Атмосферні відкладення азоту впливають на сільськогосподарські системи як безпосередньо (через хімію ґрунту), так і опосередковано (через зміну напівприродного середовища існування на узбіччях полів) [32]. Масштабним науковим переглядом і оновленням емпіричних критичних навантажень азоту на природні та напівприродні екосистеми Європи та основою для оновлення рекомендацій у межах Конвенції про транскордонне забруднення повітря на великій відстані (CLRTAP) став звіт [33], який обґрунтовує вибір показників-індикаторів, наприклад, зміни видового складу рослинності або хімізму ґрунту для систем моніторингу.

Результати багатоточкових експериментальних навантажень азоту в контрастних європейських екосистемах, демонструють підкислення ґрунту, змінені співвідношення поживних речовин та зміни у складі мікробного співтовариства [34]. Ці висновки мають значення для управління агроландшафтами, де буферні зони та живоплоти можуть зазнавати хронічного збагачення азотом внаслідок атмосферних відкладень у поєднанні з перенесенням добрив. Встановлено [35] взаємозв'язки між відкладеннями азоту та вимиванням нітратів з європейських лісів, та надано критично важливі дані для захисту якості ґрунтових вод. Функції «доза-відповідь» виявили нелінійні реакції з пороговою поведінкою, що свідчить про те, що невелике скорочення відкладень може мати непропорційні переваги в чутливих регіонах.

Тривале агровиробництво призводить до накопичення важких металів через внесення добрив, атмосферні опади та залишки пестицидів. Використовуючи дані LUCAS, автори [36] оцінили вміст важких металів у сільськогосподарських ґрунтах ЄС, визначивши перевищення (для кадмію, свинцю та ртуті) нормативних порогів для 6,2 % досліджуваних ділянок. У просторовому розподілі виявлено «гарячі точки», пов'язані з історичним видобутком корисних копалин, промисловими викидами та районами інтенсивного агровиробництва.

Детальний аналіз вмісту і розподілу окремих важких металів дозволили виділити на карті пріоритетні області для детальної оцінки на основі балів ризику забруднення [37]. Окремо досліджували ртуть [38], задокументувавши підвищені концентрації в середземноморських регіонах, пов'язані з геологічними джерелами та історичним видобутком ртуті (мінерал кіновар). Ці закономірності відображають тривалий час перебування важких металів у ґрунтах (від десятиліть до століть) та підкреслюють важливість превентивного управління, щоб уникнути незворотного забруднення. Контроль можливих джерел надходження важких металів (вибір фосфатних добрив, стандарти якості біотвердих речовин) є вагомим важелем управління.

### *3.1.3. Динаміка органічного вуглецю ґрунту (SOC)*

Органічний вуглець ґрунту є найбільшим наземним резервуаром вуглецю, а ґрунти сільськогосподарських угідь відіграють вирішальну роль у глобальному вуглецевому циклі. Проведена комплексна глобальна оцінка вмісту SOC [39], демонструє, що перехід до сучасного агровиробництва призвів до втрат 25–50 % від «досільськогосподарської» кількості SOC, що відповідає викидам 40–90 Pg C

в атмосферу. Зокрема, на європейських сільськогосподарських угіддях історичні втрати SOC становлять в середньому 30–40 % порівняно з базовими рівнями природних екосистем. Автори оцінили, що верхній шар ґрунтів (0–30 см) сільськогосподарських угідь світу (1 410 мільйонів гектарів) містить 83 Pg C. Додатковий потенціал зберігання SOC у верхньому шарі ґрунту сільськогосподарських угідь світу становить 29–65 PgC.

Зв'язок між SOC та урожайністю був оцінений з використанням метааналітичних підходів. Проаналізувавши 273 дослідження в масштабах світу, автори [40] встановили послідовну позитивну кореляцію між вмістом SOC та врожайністю сільськогосподарських культур з коефіцієнтами еластичності 0,3–0,6 залежно від гранскладу ґрунту та клімату. Цей зв'язок залишається стійким у різних виробничих системах, хоча абсолютна реакція на врожайність залежить від типу культури та інтенсивності менеджменту.

Критично переглянули поширене твердження, що перехід від традиційного обробітку ґрунту до мінімального або no-till автоматично забезпечує значне секвестрування SOC [41]. Показано, що значна частина доказів зростання SOC у системах «conservation tillage» може бути результатом методичних похибок, насамперед через те, що багато досліджень оцінювали зміни вмісту SOC переважно у верхньому шарі ґрунту, без адекватного врахування глибших горизонтів та перерозподілу вуглецю по профілю. Автори підкреслюють, що no-till часто супроводжується збільшенням вмісту SOC у поверхневому шарі ґрунту, але це не завжди означає приріст загального запасу SOC в усьому ґрунтового профілі. Тому в статті пропонується проводити розрахунки запасів вуглецю за еквівалентною масою ґрунту (а не тільки за фіксованою глибиною), оскільки зміни щільності будови ґрунту можуть суттєво спотворювати оцінки.

Дослідження врожайності зернових культур у Китаї [42] показали, що підтримка SOC запобігає стагнації врожайності в інтенсивних системах вирощування, що має пряме відношення до європейських зернових регіонів. Результати [43] демонструють, що вищі рівні органічної речовини ґрунту поліпшують утримання води в ґрунті, а це означає, що вони можуть пом'якшити втрати врожаю сільськогосподарських культур від посухи. Причому кожне збільшення вмісту SOC на 1 % під час сильної посухи було пов'язане зі збільшенням врожайності на  $2,2 \pm 0,33 \text{ Mg/ga}^{-1}$  та зниженням середньої частки виплачених страхових зобов'язань на  $36 \pm 4,76 \%$ . Автори [43] стверджують, що дані про органічну речовину ґрунту доцільно використовувати в аграрній політиці та фінансовому плануванні, наводячи кількісні докази супутніх переваг органічної речовини ґрунту, яка вважається фундаментальною для просування ініціатив щодо здоров'я ґрунту та поглинання вуглецю.

Аналіз часової динаміки запасів SOC після зміни землекористування в умовах помірної зони забезпечив узагальнений підхід до моделювання через так звані «carbon response functions» [44]. Автори кількісно описали, як швидко і в якому напрямі змінюється SOC після переходів між основними типами землекористування (зокрема рілля ↔ пасовище/луки ↔ ліс та ін.). Показано, що SOC реагує не миттєво, а за траєкторіями, які мають характерні фази: початкові швидкі зміни після перетворення (зазвичай втрати після розорювання) і поступове наближення до нового рівноважного стану протягом десятиліть. Запропоновані функції реакції вуглецю дозволяють оцінювати напрям, амплітуду та часовий масштаб змін SOC залежно від типу переходу землекористування і часу, що минув після нього. Модель розкриває важливі висновки: 1) 50–70 % загальних змін SOC відбувається протягом перших 20 років після перетворення типу землекористування; 2) зміни вмісту вуглецю для підґрунтя відстають від змін верхнього шару ґрунту на 5–10 років; 3) величини рівноваги залежать від нових

методів управління та умов довкілля. Ці висновки свідчать про те, що поточні запаси SOC відображають кумулятивну спадщину рішень щодо землекористування, які охоплюють десятиліття, що ускладнює короткостроковий моніторинг.

### *3.2. Моніторинг та картування ґрунтів*

#### *3.2.1. Європейська інфраструктура ґрунтових даних*

Європейський центр ґрунтових даних (ESDAC), створений у 2006 році, є основою управління ґрунтовою інформацією континентального масштабу [45]. ESDAC об'єднує різноманітні джерела даних, включаючи національні опитування, дослідницькі бази даних та гармонізовані національні мережі моніторингу в єдину платформу, що підтримує розробку політики та оцінку стану довкілля. Роль центру виходить за рамки функцій сховища даних і включає протоколи стандартизації, рамки забезпечення якості та розробку інтерфейсу користувача.

Набір даних ґрунтів в рамках обстеження землекористування/покриття площі (LUCAS) є найбільшою стандартизованою базою даних ґрунтів для Європи, що охоплює понад 20 000 точок відбирання проб у державах-членах ЄС на сітці 18×18 км [46]. Протокол обстеження передбачає відбір проб з верхнього (0–20 см) шару ґрунту з аналізом фізичних (грансклад, об'ємна щільність), хімічних (рН, вміст органічного вуглецю, елементи живлення, полютанти) та біологічних показників. Трирічний цикл відбирання проб (з 2009 по 2018) забезпечив оцінку часових тенденцій, хоча існуюча просторова роздільна здатність обмежує великомасштабні застосування, специфічні для конкретної ділянки.

Геостатистичні підходи [47] продемонстрували корисність даних LUCAS щодо картографування в континентальному масштабі, для прогнозування фізичних властивостей верхнього шару ґрунту з роздільною здатністю 500 м. Подальші дослідження поширилися на картографування хімічних властивостей [48, 49], а саме — просторових закономірностей розподілу міді, елементів живлення та «гарячих точок» забруднення. Вказані результати надають базові довідкові дані для оцінки деградації ґрунтів і розробки політики. Запропоновані гармонізовані бази даних профілів ґрунтів [50], поєднали національні системні набори даних, задовольняючи критичну потребу в інформації про підґрунтя. Ця ініціатива забезпечує тривимірну характеристику ґрунту, необхідну для моделювання руху води, перенесення забруднюючих речовин та динаміки вуглецю на глибинах нижче відбору проб LUCAS.

#### *3.2.2. Дистанційне зондування і картування*

Інтеграція даних дистанційного зондування і наземного моніторингу ґрунтів розширила можливості часового та просторового охоплення. Досягнення в моделюванні ерозії розглянули з використанням супутникових даних [11], виділивши застосування зображень Landsat, SPOT та MODIS для отримання ключових вхідних даних моделі: коефіцієнтів рослинного покриву (на основі NDVI), типу землекористування та похідних рельєфу з цифрових моделей рельєфу. Використані спектральні підходи до оцінки властивостей ґрунту [51], показали, що спектроскопія видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів може виявляти зміни щільності ґрунту внаслідок ущільнення. Хоча лабораторна спектроскопія досягає високої точності ( $R^2 > 0,80$  для багатьох властивостей), проте дистанційне зондування стикається з проблемами, пов'язаними з атмосферними перешкодами та перекриттям рослинним покривом.

Цифрове картографування ґрунтів стало економічно ефективним підходом до просторового прогнозування властивостей ґрунту, особливо цінним у регіонах

з обмеженими даними [49]. Застосували гауссівську регресію до даних хімічних властивостей LUCAS, досягнувши точності прогнозування ( $R^2 = 0,40\text{--}0,70$ ), придатної для застосування на регіональному масштабі. Метод використовує екологічні коваріати (клімат, топографію, літологію, землекористування) як предиктори, застосовуючи алгоритми машинного навчання для встановлення емпіричних зв'язків. Цей підхід пропонує значні переваги для країн з обмеженою інфраструктурою ґрунтових досліджень: 1) ефективно використовує існуючі точкові спостереження; 2) включає вільно доступні екологічні коваріати; 3) надає оцінки невизначеності, необхідні для підтримки рішень; 4) дозволяє оновлювати дані, коли з'являються нові результати. Однак, точність прогнозування критично залежить від репрезентативності навчальних даних та екологічної подібності між вибірковими та прогнозованими місцями.

### *3.3. Релевантність європейського досвіду для України*

#### *3.3.1. Економічна доцільність упровадження системи моніторингу деградації ґрунтів*

Аналіз європейських досліджень щодо критичних проблем деградації ґрунтів є підставою для формулювання імплікації для України в контексті розбудови національної мережі моніторингу ґрунтів. З огляду на потребу збалансувати науковість, економічну доцільність і сумісність із європейськими стандартами, очевидним є поетапний сценарій створення системи моніторингу деградації ґрунтів і запасів органічного вуглецю (SOC) в Україні. Сенс полягає в тому, щоб розпочати з визначеної кількості реперних ділянок для довгострокових спостережень за SOC та показниками деградації, паралельно формуючи національну інфраструктуру даних (FAIR/інтероперабельність) і поступово масштабуючи мережу до рівня, співставного з європейськими підходами.

Проведений економічний аналіз для Англії та Уельсу [52] підтвердив середню величину річних втрат внаслідок деградації ґрунтів в 1,2 млрд фунтів стерлінгів, що еквівалентно 150–200 фунтів стерлінгів на 1 га сільськогосподарських угідь. Більшість збитків зв'язані з утратами SOC (47%), ущільненням (39%) та ерозією (12%). Екстраполяція цих питомих втрат на 32 млн гектарів сільськогосподарських угідь України показує потенційні щорічні втрати в розмірі 4,8–6,4 млрд євро від деградації ґрунту, що становить 3–4% сільськогосподарського ВВП. Близько 80% всіх утрат — це не втрати продуктивності, а опосередковані збитки. Основний акцент [53] комплексної оцінки глобальних економічних утрат від деградації (використовуючи підхід загальної економічної вартості, Total Economic Value) зроблено на тому, що деградація — це не лише втрата врожаю, а руйнація екосистемних послуг (регулювання клімату, фільтрація води, утримання вуглецю). Щорічні втрати від деградації земель через зміну наземного покриву оцінюються приблизно у 300 млрд доларів США (0,4% світового ВВП). Дослідження доводить, що вартість запровадження заходів щодо відновлення земель у середньому в 5 разів нижча, ніж економічні втрати, спричинені подальшою деградацією за умови відсутності втручання. Ці оцінки підкреслюють, що витрати на моніторинг (які оцінюються в 3–5 млн євро щорічно для комплексної національної системи) є скромними інвестиціями порівняно з економічними втратами від неконтрольованої деградації. Європейський досвід показує, що моніторинг дозволяє цілеспрямовано втручатися, зменшуючи загальні витрати шляхом запобігання, а не відновлення.

**Таблиця**

Рекомендована дорожня карта створення дієвої системи моніторингу деградації ґрунтів і SOC в Україні (2026–2030)

Етапи	Головні завдання	Очікувані результати	Ключові індикатори діяльності (KPIs)
<b>Етап 1</b> (2026)  Підготовка та запуск реперної мережі SOC	1) Створення регламенту управління даними 2) Уніфікація протоколів пробовідбору (глибини, повторність). 3) Запуск мережі реперних ділянок для SOC (мін. 650–700 точок). 4) Впровадження QA/QC та міжлабораторних звірок. 5) Підготовка структури Національної бази даних ґрунтів (місце–зразок–аналіз–метадані). 6) побудова моделей для переходу від вмісту гумусу до вмісту SOC	- Опис методики моніторингу SOC та деградації. - Мінімальний пакет показників (родючість + SOC + індикатори ризику). - Перша версія Нац. бази даних (архітектура + метадані). - Пілотні карти SOC/деградації для вибраних регіонів.	≥650 точок з коректними метаданими. ≥90 % проб із повним набором показників та QA/QC. Запуск централізованого реєстру точок і протоколів. Є дані про щільність і можливість оцінки запасів SOC (τ C/га).
<b>Етап 2</b> (2027–2028)  Масштабування до національного мінімуму та інтеграція	1) Розширення мережі до ~2000 точок* (контрольована територія) за принципом стратифікації + ризик-орієнтованого ущільнення (для оптимізації витрат і ресурсів). 2) Інтеграція наявних агрохімічних даних (паспортизація) у базу. 3) Впровадження цифрових сервісів: геопортал, API, базові продукти для користувачів. 4) Прив'язка до ДЗЗ (EO) і моделей для “гарячих точок”. 5) моделювання вмісту SOC у верхньому горизонті ґрунтів земель с.-г. призначення.	- Національний набір базових (фонових) даних для SOC та індикаторів деградації. - Розробка та впровадження протоколу залучення крауд-сорсингових даних (Citizen Science) для верифікації моделей дистанційного зондування та ущільнення національної мережі моніторингу ґрунтів - Публічний геопортал/дашборди для узагальнених даних. - Карти пріоритетних “гарячих точок” деградації. - Протоколи інтеперабельності (FAIR/INSPIRE-орієнтація).	≥2000 точок у базі, ≥85–90 % з повним пакетом даних. Підготовка національних карт SOC та ризиків деградації. Доступність узагальнених даних для органів влади/громад. Документований формат обміну даними та словники.
<b>Етап 3</b> (2029–2030)  Перехід до системи управління і повторні цикли	1) Повторний відбір проб на реперних ділянках (аналіз трендів). 2) Ущільнення мережі лише в пріоритетних зонах (ерозія/зрошення/засолення/вуглецеві програми). 3) Впровадження MRV-логіки для оцінки ефекту практик (4R, покривні культури, мінімальний обробіток). 4) Регулярні звіти та підтримка рішень (рекомендації для державної політики).	- Оцінка трендів SOC і деградації (до/після; 3–5 років). - MRV-протоколи для національних/пілотних програм. - Набір управлінських рекомендацій із пріоритизацією заходів. - Інтеграція моніторингу в планування охорони земель.	Частка реперних точок з повторним пробовідбором ≥50–70 %. Виявлені просторові тренди SOC/деградації з довірчими інтервалами. Регулярні звіти для Мінагро/Міндовкілля Використання даних у програмах підтримки ґрунтозахисних практик

*Примітка:* LUCAS-бенчмарк (≈1 точка/210 км<sup>2</sup>) може бути орієнтиром для масштабування: для України це ≈2900 точок, а для контрольованої території — орієнтовно ~2000 точок, із корекцією під доступність і стратифікацію. Абревіатури: QA/QC (Quality Assurance / Quality Control) – система забезпечення та контролю якості аналітичних даних, що охоплює стандартизацію методик, міжлабораторні порівняння та внутрішній аудит вимірювань; MRV (Monitoring, Reporting, Verification) – система моніторингу, звітності та верифікації результатів впровадження агропрактик, зокрема щодо динаміки запасів органічного вуглецю; 4R – принцип раціонального застосування добрив (правильне добриво, правильна норма, правильний час, правильне місце внесення), спрямований на підвищення агрономічної ефективності та мінімізацію екологічного навантаження; БД – база даних.  
Розширення мережі моніторингу за принципом стратифікації передбачає поділ території України на однорідні зони (страсти) за ключовими критеріями (тип ґрунту, клімат, інтенсивність землекористування та ризики деградації), з подальшим розподілом точок спостережень у межах кожної страсти пропорційно до її площі та рівня ризику. Такий підхід забезпечує статистично репрезентативне охоплення всіх агроекологічних умов України за мінімально необхідної кількості точок.

### 3.4. Пріоритетні процеси оцінювання деградації ґрунтів

В Україні на сільськогосподарських угіддях ерозію оцінюють у 3–15 т га<sup>-1</sup> рік<sup>-1</sup> на схилах, що перевищує середні показники в Європі [54]. Пріоритетні дії включають: картування ризиків ерозії високої роздільної здатності з використанням RUSLE2015, адаптованої до місцевих умов; проведення заходів з запобігання ерозії (контурне землеробство, терасування, покривні культури) — тільки для визначених за допомогою моделювання ареалів («гарячі точки»); ефективність моніторингу контролюється повторним дистанційним зондуванням та вимірюваннями об'ємів осадів.

Оціночні величини вмісту SOC в чорноземах 200–400 мг С га<sup>-1</sup>, що є глобально значними запасами вуглецю [55]. Поточні агротехнології (інтенсивний обробіток ґрунту, видалення рослинних решток, монокультура) зменшують ці запаси. Пріоритети моніторингу для SOC мають такий алгоритм: базова оцінка SOC на реперних ділянках моніторингу (таблиця); відстеження часових тенденцій (не більше 5-річних інтервалів для виявлення змін); оцінка результатів природоохоронного землеробства за змінами вмісту SOC; впровадження підходів реагування відповідно до динаміки SOC. Ущільнення: економічно ефективні підходи включають моніторинг об'ємної щільності на контрольних ділянках методами моделювання (наприклад, SOCOMO), для виявлення високоризикових комбінацій показників ґрунту та використовуваної техніки [56].

Найбільш проблемним залишається вибір індикаторів для оцінювання процесів деградації ґрунтів. Вимоги до таких показників відомі, але не завжди є можливість їх дотримання. Обґрунтування та детальний опис індикаторів деградації ґрунтів, зважаючи на їх важливість та труднощі в інтерпретації, потребують окремої статті, а тому автори мають плани щодо цього в найближчому майбутньому.

### 3.5. Адаптивна система моніторингу і її економічні аспекти

Зважаючи на стратегічну ціль України — приєднання до ЄС, моніторинг ґрунтів апіорі потребує інтеграції з європейськими рамками. Нещодавні законодавчі зміни ЄС, включаючи запропонований Закон про моніторинг ґрунтів, встановлюють конкретні зобов'язання для держав-членів. Хоча терміни вступу України залишаються невизначеними, узгодження з цими стандартами сприятиме подальшій інтеграції та підвищить конкурентоспроможність експорту сільськогосподарської продукції. Ключові сфери узгодження включають: стандарти даних (прийняття ISO 28258 як стандарту обміну даними (SoilML), директиви INSPIRE [57] для інфраструктури просторових даних (директива INSPIRE (2007/2/EC) є частиною екологічного та цифрового блоку законодавства, обов'язкового для всіх держав-членів); впровадження спільних індикаторів оцінки деградації; розробка протоколів, сумісних з вимогами ЄС щодо звітності; розвиток потенціалу: навчальні програми, узгоджені з рамками компетенцій в ЄС.

Україна стикається з подвійним викликом створення системи моніторингу ґрунтів, сумісної з ЄС, водночас працюючи в умовах серйозних бюджетних обмежень. Європейський досвід пропонує поетапну стратегію впровадження, пріоритетами якої є: 1) створення стабільної мережі моніторингу, яка, зберігаючи риси національної, відповідатиме вимогам ЄС (EU Soil Monitoring and Resilience Law); 2) розробка сучасної національної бази даних ґрунтів, гармонізованої є європейською; 3) інтеграція існуючих джерел даних; 4) нарощування потенціалу для передових технологій в моніторингу ґрунтів та забезпечення інституційних і політичних змін.

### 3.5.1. Реперні пункти моніторингу

Створення 650–700 постійних контрольних пунктів (можливе часткове використання мережі існуючих моніторингових ділянок), що представляють основні комбінації ґрунт-клімат-управління, дозволить виявити часові тенденції. Для цих пунктів є необхідність включення: 1) детальної характеристики (описи профілів, повний аналітичний набір); 2) щорічного моніторингу ключових показників (вуглець, рН, щільність, поживні речовини); 3) наближеності до метеорологічних станцій; 4) інтеграції з існуючими довгостроковими експериментами.

### 3.5.2. Національна база даних ґрунтів

Відповідно до протоколів LUCAS, адаптованих до українських умов, ми рекомендуємо створити сітку моніторингу згідно алгоритму, наведеного у таблиці (етапи 1, 2). Це забезпечить мінімально необхідне просторове покриття, залишаючись при цьому економічно доцільним. Польовий відбір проб і лабораторні визначення повинні виконуватися за стандартизованими методиками, тоді як структура метаданих і цифровий обмін результатами мають відповідати DSTU ISO 28258 для забезпечення міжнародної сумісності. Цей стандарт визначає, як структурувати дані, щоб вони залишалися доступними для системи (ESDAC). До того ж, ISO 28258 є технічною основою для виконання Директиви INSPIRE щодо ґрунтів.

Для забезпечення порівнюваності результатів у часі та інтероперабельності з європейськими системами моніторингу рекомендується: а) застосовувати стандарти серії ISO 18400 для планування та виконання пробовідбору, включно зі стратегіями та процедурами реєстрації; б) виконувати пакування, доставку, зберігання та консервацію проб згідно з ISO 18400-105:2017 у поєднанні з рекомендаціями ISO 18512:2007; в) проводити підготовку проб до фізико-хімічного аналізу відповідно до ISO 11464:2006 (в ЄС все частіше наголошують на важливості підготовки проб для аналізу летких сполук та мікробіології, де цей стандарт може доповнюватися ISO 18400-106). Валідація методів: Всі лабораторії, залучені до проєкту, повинні бути акредитовані за ISO/IEC 17025; Аналіз органічного вуглецю (SOC) повинен проходити верифікацію методом сухого спалювання згідно з ISO 10694:1995.

Важливо, що дані, зібрані за цими стандартами, неможливо оскаржити в міжнародних судах (що надає актуальність для репарацій); вуглецеві сертифікати, базовані на ISO-валідованих даних, мають найвищу ціну на ринку; з економічної сторони, відпадає потреба в «пересертифікації» даних при подачі звітів до Європейської Комісії.

### 3.5.3. Економічно ефективні технології

Враховуючи обмежені ресурси, Україна повинна надати пріоритет технологіям, що пропонують максимальну інформаційну віддачу від інвестицій: 1) дистанційне зондування (Sentinel-2, Landsat) для картування ризиків ерозії та моніторингу стану рослинності (вільний доступ до даних); 2) цифрове картографування ґрунтів з використанням машинного навчання для використання існуючих результатів обстежень; 3) оптимізація витрат на моніторинг шляхом інтеграції технології pXRF як методу попереднього скринінгу in-situ, що дозволяє раціоналізувати кількість дороговартісних лабораторних досліджень за принципом «Smart Sampling» (стратегія в моніторингу, яка передбачає замість вибору точок

контролю за «регулярною сіткою» математично обґрунтований та економічно ефективний вибір точок). Це дозволяє оптимізувати бюджет моніторингу шляхом використання багаторівневого підбору точок (Tiered Sampling Strategy), що включає попередній суцільний скринінг методами рXRF та дистанційного зондування з подальшою селективною лабораторною верифікацією лише у репрезентативних та критичних локаціях; 4) проксимальне зондування (vis-NIR спектроскопія) для рутинних аналізів ґрунту; 5) краудсорсинговий відбір проб, «Soil Citizen Science» (залучення неспеціалістів до збору первинних даних або зразків ґрунту для державної системи моніторингу) для доповнення професійного моніторингу

Зважаючи на прогалини в дослідженнях, у законодавстві та в системі моніторингу ґрунтів України, (зокрема відсутність: контролю ущільнення ґрунтів та вмісту SOC, що призвело до недостатнього розуміння динаміки SOC в умовах інтенсивного агровиробництва; калібрування моделей ерозії, специфічного для України; комплексних базових даних про важкі метали та інше), *рекомендуємо для України:*

#### 1. Невідкладні пріоритети (2026–2027):

- провести інвентаризацію існуючих даних про ґрунти для інтеграції та створення національної бази даних показників ґрунтів відповідно до стандартів ISO 28258;

- впровадити пілотну мережу моніторингу (650–700 ділянок) для пріоритетних агрорегіонів;

- розробити сучасні карти ризику ерозії з використанням вільно доступних супутникових даних.

#### 2. Середньостроковий розвиток (2026–2028):

- розширити мережу моніторингу до 2000 ділянок для всієї країни;

- впровадити програму цифрового картографування ґрунтів;

- визначити базовий рівень SOC та розпочати моніторинг його часових тенденцій;

- розробити національну систему інформації про ґрунти, сумісну з INSPIRE.

#### 3. Довгострокові цілі (2028–2035):

- повна інтеграція з рамками моніторингу ґрунтів ЄС;

- забезпечення можливостей для комплексного оцінювання деградації та втрати екосистемних послуг;

- прогнозне моделювання для оцінки сценаріїв управління здоров'ям ґрунтів;

- створена система підтримки оперативних рішень для фермерів та політиків.

## 4. Висновки

Європейський досвід демонструє, що ефективний моніторинг ґрунтів вимагає довгострокових зобов'язань, достатніх ресурсів та інтеграції в різних масштабах. Європейська інфраструктура моніторингу (ESDAC, LUCAS) демонструє цінність стандартизованого довгострокового моніторингу для підтримки політики та оцінки деградації ґрунтів. Україна володіє ґрунтовими ресурсами світового класу, збереження яких є важливим для національної продовольчої безпеки та світового агровиробництва. Запропонована система моніторингу забезпечує дорожню карту для досягнення цієї мети, забезпечуючи сумісність з міжнародними стандартами та оптимізуючи обмежені фінансові ресурси.

1. Для створення дієвої та економічно обґрунтованої системи моніторингу деградації ґрунтів і управління органічним вуглецем в Україні доцільно впровадити трирівневу модель індикаторів (Рівень 1/2/3), де Рівень 1 виступає обов'язковим

мінімумом національного покриття, Рівень 2 – розширеним модулем для локацій підвищеного ризику деградації, а Рівень 3 – спеціалізованим інструментом для “гарячих точок”, рекультивації та MRV-проектів.

2. Як стартовий крок у поточному році рекомендовано розгортання мережі реперних ділянок (650–700 точок) із повторним пробовідбором кожні 3–5 років, що підтримає методично коректне відстеження трендів SOC та ключових деградаційних процесів в агроландшафтах.

3. Подальше масштабування мережі до ~2000 точок на контрольованій території України є доцільним як стратегічний «національний мінімум», який забезпечить достатню просторову репрезентативність, можливість цифрового картографування “гарячих точок” та потенціал гармонізації з європейськими підходами на зразок LUCAS/ESDAC у контексті інтеграції до системи ґрунтового моніторингу ЄС.

4. Інтеграція дистанційного зондування, цифрового картографування ґрунтів та стратегічного наземного моніторингу забезпечує економічно ефективні підходи для контекстів з обмеженими даними. Потрібен перехід до інтерпретації даних моніторингу через призму екосистемних послуг, щоб зробити їх релевантними для стратегії відновлення України.

## Використані джерела / References

1. FAO and ITPS. Status of the world's soil resources (SWSR). *Main report FAO ITPS*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, – FAO, 2015.
2. Lal, R., Bouma, J., Brevik, E., Dawson, L., Field, D. J., Glaser, B., ... Zhang, J. (2021). Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective. *Geoderma Regional*, 25, e00398. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398>
3. Smith, P., House, J. I., Bustamante, M., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., ... Pugh, T. F. M. (2016). Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*, 22(3), 1008–1028. <https://doi.org/10.1111/gcb.13068>
4. Bouma, J., & Montanarella, L. (2016). Facing policy challenges with inter- and transdisciplinary soil research focused on the UN Sustainable Development Goals. *SOIL*, 2, 135–145. <https://doi.org/10.5194/soil-2-135-2016>
5. Ferrara, A., Kosmas, C., Salvati, L., Padula, A., Mancino, G., & Nole, A. (2020). Updating the MEDALUS-ESA framework for worldwide land degradation and desertification assessment. *Land Degradation & Development*, 31(12), 1593–1607. <https://doi.org/10.1002/ldr.3559>
6. Ferreira, C. S. S., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N., & Kalantari, Z. (2022). Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences. *Science of the Total Environment*, 805, 150106. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150106>
7. Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A., & Sombroek, W. G. (1991). World map of the status of human-induced soil degradation: An explanatory note. Wageningen : ISRIC. Retrieved from <https://edepot.wur.nl/287507>
8. Bridges, E. M., & Oldeman, L. R. (1999). Global assessment of human-induced soil degradation. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 13(4), 319–325. <https://doi.org/10.1080/089030699263212>
9. Bai, Z. G., Dent, D. L., Olsson, L., & Schaepman, M. E. (2008). Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use & Management*, 24(3), 223–234. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x>
10. Gibbs, H. K., & Salmon, J. M. (2015). Mapping the world's degraded lands. *Applied Geography*, 57, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.024>
11. Panagos P., Karydas C. G., Borrelli P., Ballabio B., & Meusburger K. (2014). Advances in soil erosion modelling through remote sensing data availability at European scale. *Proceedings of SPIE*, 9229. <https://doi.org/10.1117/12.2066383>
12. Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., ... Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54, 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
13. Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Kijak, A., JAE, K., ... Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
14. Garcia-Ruiz, J. M., Begueria, S., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J. C., Lana-Renault, N., & Sanjuán, Y. (2015). A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, 239, 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.008>
15. Evans R. (2017). Factors controlling soil erosion and runoff and their impacts in the upper Wissey catchment, Norfolk, England: A ten year monitoring programme. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(14), 2266–2279. <https://doi.org/10.1002/esp.4182>
16. Steinhoff-Knopp, B., & Burkhard, B. (2018). Soil erosion by water in Northern Germany: Long-term monitoring results from Lower Saxony. *Catena*, 165, 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.017>
17. Prasuhn, V. (2020). Twenty years of soil erosion on-farm measurement: Annual variation, spatial distribution and the impact of conservation programmes for soil loss rates in Switzerland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(4), 1539–1554. <https://doi.org/10.1002/esp.4829>
18. Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., & Panagos, P. (2017). A new assessment of soil loss due to wind erosion in European agricultural soils using a quantitative spatially distributed modelling approach. *Land Degradation & Development*, 28(1), 335–344. <https://doi.org/10.1002/ldr.2588>

19. Schjonning, P., van den Akker, J. J. H., Keller, T., Greve, M. H., Lamande, M., Simojoki, A., ... Breuning-Madsen, H. (2015). Chapter five – Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction — A European perspective. *Advances in agronomy*, 133, 183–237. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.001>
20. Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
21. Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management – A review. *Soil Use & Management*, 25(4), 335–345. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x>
22. Horn, R., Mordhorst, A., Fleige, H., Zimmermann, I., Burbaum, B., Filipinski, M., & Cordsen, E. (2020). Soil type and land use effects on tensorial properties of saturated hydraulic conductivity in Northern Germany. *European Journal of Soil Science*, 71(2), 179–189. <https://doi.org/10.1111/ejss.12864>
23. Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
24. Brus, D. J., & van den Akker, J. J. H. (2018). How serious a problem is subsoil compaction in the Netherlands? A survey based on probability sampling. *Soil*, 4(1), 37–45. <https://doi.org/10.5194/soil-4-37-2018>
25. Chamen, T. W. C., Moxey, A. P., Towers, W., Balana, B., & Hallett, P. D. (2015). Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research*, 146, 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.011>
26. Robinson, D. A., & Nemes, A., Reinsch S., Radbourne, A., Bentley, L., & Keith, A. M. (2022). Global meta-analysis of soil hydraulic properties on the same soils with differing land use. *Science of the Total Environment*, 852, 158506. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158506>
27. Arthur, E., Moldrup, P., Schjonning, P., & de Jonge, L. W. (2013). Water retention, gas transport, and pore network complexity during short-term regeneration of soil structure. *Soil Science Society of America Journal*, 77(6), 1965–1976. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.07.0270>
28. Ball, B., & Schjonning, P. (2002). Air permeability. In J. H. Dane, G. C. Topp (Eds.) *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*, 5.4. (pp. 1141–1158). SSSA Book Series. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c46>
29. Rabot, E., Wiesmeier, M., Schluter, S., & Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
30. Kirk, G. J. D., Bellamy, P. H., & Lark, M. (2010). Changes in soil pH across England and Wales in response to decrease acid deposition. *Global Change Biology*, 16(11), 3111–3119. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02135.x>
31. Blaser, P., Zysset, M., Zimmermann, S., & Luster, J. (1999). Soil acidification in southern Switzerland between 1987 and 1997: A case study based on the critical load concept. *Environmental Science and Technology*, 33(14), 2383–2389. <https://doi.org/10.1021/es9808144>
32. Bobbink, R., Hicks, K., Galloway, J., Spranger, I., Alkemade, R., Ashmore, M. ... De Vries, W. (2010). Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis. *Ecological Applications*, 20(1), 30–59. <https://doi.org/10.1890/08-1140.1>
33. Bobbink, R., & Hettelingh, J.-P. (Eds.). (2011). Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM). RIVM Report.
34. Phoenix, G. K., Emmett, B. A., Britton, A. J., Caporn, S. I., M., Dise, N. B., Helliwell, R. (2012). Impacts of atmospheric nitrogen deposition: Responses of multiple plant and soil parameters across contrasting ecosystems in long-term field experiments. *Global Change Biology*, 18(4), 1197–1215. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02590.x>
35. Dise, N. B., & Wright, R. F. (1995). Nitrogen leaching from European forests in relation to nitrogen deposition. *Forest Ecology and Management*, 71(1), 153–161. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)06092-w](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)06092-w)
36. Toth, G., Hermann, T., Da Silva, M. R., & Montanarella, L. (2016). Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, 88, 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>
37. Toth, G., Hermann, T., Szatmari, G., & Pasztor, L. (2016). Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment. *Science of the Total Environment*, 565, 1054–1062. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.115>
38. Ballabio, C., Jiskra, M., Osterwalder, S., Borrelli, P., Montanarella, L., & Panagos, P. (2021). A spatial assessment of mercury content in the European Union topsoil. *Science of the Total Environment*, 769, 144755. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144755>
39. Stockmann, U., Padarian, J., McBratney, A., Minasny, B., de Brogniez, D., Montanarella, L., ... Field, D. (2015). Global soil organic carbon assessment. *Global Food Security*, 6, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2015.07.001>
40. Oldfield, E. E., Bradford, M. A., & Wood, S. A. (2019). Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *Soil*, 5(1), 15–32. <https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019>
41. Baker, J. M., Ochsner, T. E., Venterea, R. T., & Griffis, T. J. (2007). Tillage and soil organic carbon sequestration – What do we really know? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1–4), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.014>
42. Pan, G., Smith, P., & Pan, W. (2009). The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 129(1), 344–348. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.10.008>
43. Kane, D. A., Bradford, M. A., Fuller, E., Oldfield, E. E., & Wood, S. A. (2021). Soil organic matter protects US maize yields and lowers crop insurance payouts under drought. *Environmental Research Letters*, 16(4), 044018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe492>
44. Poeplau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., van Vesemael, B., Scumacher, J., & Gensior, A. (2011). Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – Carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology*, 17(7), 2415–2427. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>
45. Panagos, P., Van Liedekerke, M., Jones, A., & Montanarella, L. (2012). European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. *Land Use Policy*, 29(2), 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.003>
46. Orgiazzi, A., Ballabio, C., Panagos, P., Jones, A., & Fernandez-Ugalde, O. (2018). LUCAS soil, the largest expandable soil dataset for Europe: A review. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 140–153. <https://doi.org/10.1111/ejss.12499>
47. Ballabio, C., Panagos, P., & Montanarella, L. (2016). Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geoderma*, 261, 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.006>

48. Ballabio, C., Panagos, P., Lugato, E., Huang, J.-H., Orgiazzi, A., Jones, A., ... Montanarella, L. (2018). Copper distribution in European topsoils: An assessment based on LUCAS soil survey. *Science of the Total Environment*, 636, 282–298. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.268>
49. Ballabio, C., Lugato, E., Fernandez-Ugalde, O., Orgiazzi, A., Jones, A., Borelli, P. ... Panagos, P. (2019). Mapping LUCAS topsoil chemical properties at European scale using Gaussian process regression. *Geoderma*, 355, 113912. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113912>
50. Kristensen, J. A., Balstrom, T., Jones, R. J., Jones, A., Montanarella, L., Panagos, P., & Breuning-Madsen, H. (2019). Development of a harmonised soil profile analytical database for Europe: A resource for supporting regional soil management. *Soil*, 5(2), 289–301. <https://doi.org/10.5194/soil-5-289-2019>
51. Dematte, J. A. M., Nanni, M. R., Da Silva, A. P., de Melo Filho, J. F., Dos Santos, W. C., & Campos, R. C. (2010). Soil density evaluated by spectral reflectance as an evidence of compaction effects. *International Journal of Remote Sensing*, 31(2), 403–422. <https://doi.org/10.1080/01431160902893469>
52. Graves, A. R., Morris, J., Deeks, L. K., Rickson/ R. J., Kibblewhite, M.G., Harris, J. A., ... Truckle, I. (2015). The total costs of soil degradation in England and Wales. *Ecological Economics*, 119, 399–413. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.07.026>
53. Nkonya, E., Anderson, W., Kato, E., Koo, J., Mirzabaev, A., Braun, J., & Meyer, S. (2016). Global cost of land degradation. In: E. Nkonya, A. Mirzabaev, J. von Braun (Eds.), *Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development* (pp. 117–165). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-19168-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19168-3_6)
54. Achasov, A., Achasova, A., Siedov, A., Seliverstov, O. (2025). Geoinformation modeling of the risk of water erosion of soils. *Proceedings of EAGE*, 2025. Retrieved from <https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-015.pdf>
55. Balyuk, S. A., Medvedev, V. V., Kucher, A., Solovey, V., Levin, A., & Kolmaz, Y. (2017). Ukrainian chernozems as a factor in global food security and resilience of agriculture to climate change. In: *Global Symposium on Soil Organic Carbon*, Rome, Italy, 21–23 March 2017. FAO, Rome. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-bs034e.pdf>
56. van den Akker, J. J. H. (2004). SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.021>
57. INSPIRE Knowledge Base. Retrieved from <https://knowledge-base.inspire.ec.europa.eu/>

UDC 631.417.1:632.125(4+477)

## Monitoring Soil Degradation and Organic Carbon Dynamics: Adapting European Experience and Developing a Roadmap for Ukraine

Y. M. Dmytruk<sup>1, 2, a, ☒</sup>, V. R. Cherlinka<sup>3, b</sup>, N. P. Gorbacheva<sup>4, c</sup>

<sup>1</sup> Higher Education Institution "PSU" Kamianets-Podilskyi, Ukraine

<sup>2</sup> State Institution "Institute of Soil Protection of Ukraine," Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup> Research & Solutions, Toronto, Canada

<sup>4</sup> Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

✉ dmytruk.yur@gmail.com

ORCID: <sup>a</sup> 0000-0002-3157-0503, <sup>b</sup> 0000-0001-5354-4851, <sup>c</sup> 0009-0007-9862-2463

Received 12.03.2026; Revised 02.06.2026; Accepted 08.06.2026; Available online 30.06.2026

### Abstract

Soil degradation represents one of the most critical environmental challenges threatening agricultural sustainability and food security both in Europe and globally. Recognizing the urgency of this issue, the European Union has established comprehensive frameworks for soil monitoring and protection, culminating in recent legislative initiatives such as the Soil Monitoring Law. However, the implementation of effective soil monitoring systems presents significant obstacles for developing economies due to substantial financial and technical resource requirements. The primary objective of this review is to provide recommendations for establishing a functional soil monitoring system in Ukraine that balances scientific precision with economic feasibility while ensuring compatibility with European standards. Special attention given to degradation prevention methods and the preservation of soil organic carbon (SOC) stocks in agricultural lands. Despite being a leading global agricultural producer, Ukraine faces increasing production pressures exacerbated by soil degradation processes. Ukraine's European integration plans necessitate alignment with EU soil protection standards, creating the dual challenge of meeting EU requirements while managing stringent budgetary constraints. This situation underscores the urgent need to critically evaluate European experience and identify cost-effective monitoring approaches adapted to the Ukrainian context. A comprehensive analysis of European experience in soil degradation monitoring and SOC management conducted through systematic evaluation of peer-reviewed literature. This review synthesizes a decade of European research on soil degradation assessment, organic carbon dynamics, and monitoring methodologies, with specific focus on agricultural landscapes. The analysis encompasses 54 peer-reviewed publications categorized into three methodological clusters: (1) soil degradation in Europe; (2) soil monitoring and mapping; and (3) the relevance of European experience for Ukraine. Key findings indicate that the European Soil Data Centre (ESDAC) and the LUCAS database (approximately 20,000 sampling points across 4.2 million km<sup>2</sup>) provide standardized platforms for continental-scale soil health monitoring. Evidence demonstrates that SOC losses on European arable lands have averaged 0.3–0.5 % annually over the last decade, posing a tangible threat to agroecosystem productivity. Analysis of economic costs associated with soil degradation in England and Wales (£0.9–1.4 billion annually) underscores the economic urgency of preventive measures—a consideration of even greater importance for Ukraine given its substantial dependence on agricultural output. For the Ukrainian context, a stepwise implementation of a soil monitoring system is proposed, comprising four main components: (1) Establishment of a reference plot network with minimum coverage of 650–700 baseline points, expanding to approximately 2,000 points by 2026 to ensure full territorial coverage for long-term

SOC observation; (2) Creation of a national soil database aligned with DSTU ISO 28258, supported by terminological and methodological standards (ISO 11074, ISO 25177) and geographic information system protocols; (3) Integration of Sentinel-2 satellite data for mapping soil degradation with emphasis on erosion assessment; and (4) Application of machine learning techniques for digital soil mapping to maximize accuracy under resource constraints. The proposed recommendations will facilitate preservation of soil fertility and ensure harmonization of the Ukrainian soil monitoring system with EU requirements, in alignment with the Soil Monitoring Law.

**Keywords:** Soil degradation; SOC; soil monitoring; European standards; agricultural land; harmonization of legislation.

**Cite:** Dmytruk, Y. M., Cherlinka, V. R., & Gorbacheva, N. P. (2026). Monitoring soil degradation and organic carbon dynamics: adapting european experience and developing a roadmap for Ukraine. *AgroChemistry and Soil Science*, 100, 4–20. <https://doi.org/10.31073/acss100-01> [in Ukrainian].

This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.