УДК 631.471:631.481+528.854:528.855
DOI https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.151.51

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ РЕПРЕЗЕНТАТИВНОЇ МЕРЕЖІ МОНІТОРИНГУ ГУМУСНОГО СТАНУ ҐРУНТІВ В УКРАЇНІ

Биндич Т.Ю. *– д.с.-г.н., старший науковий співробітник,*
провідний науковий співробітник лабораторії охорони ґрунтів від ерозії
та дистанційних методів дослідження,
Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О.Н. Соколовського»
orcid.org/0000-0001-9098-7694
Шерстюк О.І. *– провідний інженер лабораторії охорони ґрунтів від ерозії*
та дистанційних методів дослідження,
Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О. Н. Соколовського»
orcid.org/0009-0002-2919-0445

Для розроблення репрезентативної, геопросторової мережі моніторингу органічного карбону ґрунту (SOC) для України запропоновано стратегію стратифікованого відбору, де в якості страти використано фізико-географічну область як достатньо інформативний рівень в системі природно-географічного районування, що характеризується певними подібністю та своєрідністю фізико-географічних процесів та умов формування SOC. Представлено результати обґрунтування та розроблення багатоетапного та високотехнологічного підходу до генерації репрезентативних систем відбору проб за допомогою латинського гіперкуба – cLHS, в якому схеми вибірки формуються за методом Монте-Карло. Запропонований підхід базується на інтеграції хмарної обробки багаторічних супутникових даних у платформі Google Earth Engine (GEE), поглибленого геоморфометричного аналізу в середовищах R і RSAGA, статистичного відбору коваріат та оптимізації просторової вибірки. Шляхом багаторівневої статистичної діагностики сформованого набору коваріатів, що включає аналіз розподілів, оцінювання парних кореляцій та багатовимірної структури варіації за аналізом головних компонент, що надає змогу уникнути мультиколінеарності в межах спільної маски валідних пікселів, формується логіка відбору коваріатів, яка забезпечує репрезентативний й науково обґрунтований відбір точок моніторингу SOC та відбір найбільш інформативних та репрезентативних предикторів для проектування вибіркової мережі. Опрацювання запропонованого підходу реалізовано на прикладі східної частини Південнопридніпровської схилово-височинної області, площею близько 1324 км^2, для якої оптимальною кількістю репрезентативної мережі обрано 50 точок відбору. Представлена методологія повністю відповідає вимогам Європейського зеленого курсу (EU Soil Monitoring Law) та Протоколу GSOC MRV ФАО ООН щодо верифікації запасів SOC та може бути рекомендовано в якості основного підходу для створення сучасної Національної системи моніторингу балансу карбону в ґрунтах України.

Ключові слова: *органічний карбон ґрунту, моніторинг ґрунтів, цифрова модель рельєфу, репрезентативна вибірка, коваріати, метод Монте-Карло.*

Byndych T.Yu., Sherstiuk O.I. Modern approaches to establishing a representative monitoring network for the humus status of soils in Ukraine

To develop a representative, geospatial monitoring network for soil organic carbon (SOC) in Ukraine, a stratified sampling strategy is proposed in which the physical-geographical region is used as a stratum – a sufficiently informative level within the system of natural-geographical zoning, characterized by certain similarities and distinct features of the physical-geographical processes and

© Биндич Т.Ю., Шерстюк О.І., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

conditions governing SOC formation. The results of the justification and development of a multi-stage, high-tech approach to generating representative sampling schemes using the Latin hypercube (cLHS), in which sampling schemes are generated using the Monte Carlo method, are presented. The proposed approach is based on the integration of cloud-based processing of multi-year satellite data within the Google Earth Engine (GEE) platform, in-depth geomorphometric analysis in the R and RSAGA environments, statistical selection of covariates, and optimization of spatial sampling. Through multi-level statistical diagnostics of the resulting set of covariates – including analysis of distributions, assessment of pairwise correlations, and analysis of the multidimensional structure of variation using principal component analysis, which makes it possible to avoid multicollinearity within the common mask of valid pixels – a covariate selection logic is formulated, ensuring a representative and scientifically sound selection of SOC monitoring points and the selection of the most informative and representative predictors for designing a sampling network. The proposed approach has been applied to the eastern part of the South Dnieper Slope-Upland Region, covering an area of approximately 1·324 km², for which 50 sampling points were selected as the optimal number for a representative network. The methodology presented is fully compliant with the requirements of the European Green Deal (EU Soil Monitoring Law) and the FAO's GSOC MRV Protocol regarding the verification of SOC stocks, and can be recommended as the primary approach for establishing a modern National Soil Carbon Balance Monitoring System in Ukraine.

Key words: *soil organic carbon, soil monitoring, digital elevation model, representative sample, covariates, Monte Carlo method.*

Актуальність теми дослідження. Реалізація вимог Закону України № 2973-IX «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо державної системи моніторингу довкілля, інформації про стан довкілля (екологічної інформації) та інформаційного забезпечення управління у сфері довкілля» від 20.03.2023 [1, статті 22, 54] потребує розроблення сучасної системи моніторингу навколишнього середовища, яка не тільки заснована на використанні новітніх, високотехнологічних систем спостережень за компонентами довкілля, але й є гармонізованою з системами моніторингу, які створені у країнах ЄС та постійно вдосконалюються. При цьому, важливою складовою національної системи моніторингу довкілля в нашій країні є організація спостережень органічного карбону у ґрунті (SOC), що визначається його винятковою значимістю для оцінювання функціонування природних ландшафтів та агроценозів, при якому вони зберігають здатність до регуляції циклів біофільних елементів як основи життєдіяльності людини та біосфери в цілому [2, с. 190–192]. Й таким чином, SOC представляється достатньо інформативним критерієм для оцінювання більшості з екологічних функцій ґрунтів (біологічної, біоенергетичної, азотно-білкової, гідрологічної та газово-атмосферної), а також для інтегральної характеристики їх стану внаслідок антропогенезу [3, с. 7–8; 4, с. 75–76; 5, с. 150]. На теперішній час, актуальність контролю SOC в нашій країні обумовлена не тільки незбалансованою землеробською діяльністю, але й практично неконтрольованим мілітарним впливом на земельні та ґрунтові ресурси, що визначає інтенсифікацію різних видів деградації ґрунтів. Особливе занепокоєння викликає актуальний стан високородючих, чорноземних ґрунтів, які представляють основу продовольчої безпеки нашої країни та поширені на територіях, які зазнали найбільшого негативного впливу від військових дій та екоциду країни-агресора. Високий вміст гумусу, нейтральний pH та значна ємність поглинання у чорноземах обумовлюють іноді дуже поступовий прояв деградаційних процесів та значну тривалість формування нового клімаксного стану таких ґрунтів. У зв'язку з цим, оперативне визначення негативних змін у SOC у ґрунтах, зокрема в чорноземах, та встановлення закономірностей просторового розподілу процесів їх деградації є актуальною науковою проблемою, яка має міждисциплінарний характер та потребує актуальної, точної інформації для

розробки комплексних, оптимальних рішень щодо впровадження ґрунтозахисних землеробських технологій та ґрунтоохоронних заходів, що поліпшують гумусовий стан ґрунтів та підвищують їх родючість.

Постановка проблеми. Створення сучасної системи моніторингу ґрунтів відноситься до напрямів інноваційної діяльності розвитку науково-технічного потенціалу країни, оскільки пов'язано з розвитком сучасних інформаційних технологій в сфері природокористування та ефективного управління земельними та ґрунтовими ресурсами. Сучасні тенденції розроблення систем моніторингу довкілля передбачають їх засновування на даних космічного сканування як об'єктивної інформаційної основи раціонального землекористування та спостережень за станом ґрунтів в межах сільськогосподарських угідь, з використанням значного комплексу показників ґрунту, що необхідні як для вирішення екологічних проблем, так й пов'язані з реалізацією сільськогосподарських проєктів [6, с. 131, 143]. Одним з найкращих аналогів створення такої системи є науково-дослідні роботи, що здійснено на початку 2000-х років, за ініціативою European Environment Agency (EEA) щодо вдосконалення основи Європейської Ґрунтової інформаційної системи [7, с. 58] та створення багатошарової бази даних за значним переліком властивостей ґрунтів шляхом використання даних космічного знімання не тільки як ефективного інструменту для розробки систем наземного випробування ґрунтів, але й для інтерпретації супутникових даних про ґрунтовий покрив (ҐП) за незначною кількістю наземних спостережень та сучасними методами аналізу інтегрованої інформації – просторового аналізу даних, агрометеорологічного та педотрансферного моделювання [7, с. 11, 13, 21; 8; 9; 10, с. 126–127].

Ключовим питанням організації сучасної системи моніторингу SOC в нашій країні є розроблення науково-обґрунтованої геомережі спостережень, що дозволяє змінити підхід від пасивного збору даних до їх активного просторово-часового аналізу (розрахунки поглинання CO_2, базові рівні, супутниковий моніторинг) та забезпечити валідацію практик сталого землеробства, інтеграцію даних з реєстрами Міндовкілля та європейським ринком вуглецевих сертифікатів у сфері Carbon farming (Carbon Removal Certification Framework – CRCF), що є критично необхідним кроком для легалізації багатьох екологічних проєктів в Україні.

У зв'язку з цим, метою проведених у 2026 році досліджень є розроблення та опрацювання сучасної методології проектування геопросторової мережі моніторингу SOC в Україні на основі даних космічного сканування та відомих у світі відкритих джерел інформації.

Для досягнення поставленої мети вирішували наступні завдання:

– аналіз існуючих у світі теоретичних та методичних основ щодо розроблення систем випробування ґрунтів на основі інтеграції даних космічного сканування з даними ґрунтових інформаційних ресурсів та вибіркових польових обстежень;

– визначення найбільш ефективного та високотехнологічного методу розробки репрезентативних вибірок, що дозволяє використовувати сучасні відкриті архіви геопросторових даних та платформи, які дозволяють автоматизувати обробку різноманітних даних та обчислювати цифрову інформацію великого об'єму;

– опрацювання обраного методу для територій, для яких відсутня або недостатня інформація щодо властивостей та гумусного стану ґрунтів.

Дослідження проводилися за фінансовою підтримкою МОН України в рамках виконання проєкту «Розроблення цифрової інформаційної системи моніторингу вуглецевого стану ґрунтів України в умовах антропогенного навантаження» (Договір № ДЗ / 188 – 2026).

Методика досліджень. Для вирішення поставлених завдань використано комплекс різноманітних методів:

– інформаційно-бібліографічний та аналітичний – для детального аналізу існуючих підходів щодо розробки систем відбору проб ґрунту на основі інтеграції даних космічного сканування з даними ґрунтових інформаційних ресурсів та вибіркових польових обстежень;

– абстрактно-логічний – для теоретичного узагальнення та формування висновків щодо сучасних тенденцій створення систем відбору проб ґрунтів на основі даних космічної зйомки та визначення найбільш ефективних підходу, методу та технології обробки різноманітних даних для формування мережі моніторингу гумусного стану ґрунтів в нашій країні;

– багатовимірний аналіз, методи геоінформаційної обробки та геостатистичного аналізу даних – для обробки та аналізу даних космічного сканування, системи вегетаційних індексів, а також для створення геопросторових шарів основних предикторів SOC, цифровізації та аналізу наявної картографічної інформації про типи ґрунтів, аналіз цифрової моделі рельєфу (ЦМР);

– статистичний – для виявлення достовірності здобутих результатів обробки даних;

– математичний (дисперсійний, регресійний, кореляційний, факторний*)* – для встановлення взаємозв'язків між основними фізико-хімічними властивостями ґрунтів та оптичними характеристиками їх поверхневого шару, а також з іншими факторами формування SOC, як основи створення репрезентативної мережі моніторингу гумусного стану ґрунтів в Україні.

Дослідження проведено з використанням багатоспектральних знімків космічного апарату Sentinel-2 [11], що надаються Європейською космічною агенцією (ESA) безкоштовно, мають просторову роздільну здатність від 10 м (у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах: B2 – B8) до 20 м (у короткохвильовому інфрачервоному та короткохвильовому діапазонах: B8a, B11, B12), мають високі радіометричну роздільну здатність – 12-біт, періодичність знімання (5 діб), а також значну ширину охоплення території (близько 290 км). Доступ до цих даних та їх обробок проведено за допомогою зручної онлайн платформи Copernicus Browser та головного порталу для завантаження атмосферно-корегованих даних Copernicus Data Space Ecosystem. В якості вихідних джерел даних також залучено ЦМР – FABDEM V1-2, очищену від впливу лісової рослинності та забудови, а також електронні карти: карта ґрунтів Української РСР у масштабі 1:750 000 (1972 р.) та карта «Ландшафти та фізико-географічне районування» у масштабі 1:2 500 000, що представлена у Національному атласі України (2007 р.) [12, с. 222–223].

Геоінформаційну обробку даних здійснено за допомогою геоінформаційних систем (ГІС) QGIS та SAGA. Більша частина цифрової обробки даних здійснено за допомогою платформи Google Earth Engine – GEE, що поєднує мультипетабайтний каталог знімків (Landsat, Sentinel та ін.) із хмарними обчислювальними можливостями для складного аналізу даних, кількісного оцінювання змін за допомогою API Python/JavaScript. Крім JavaScript використано мову програмування R (R – це мова програмування та програмне середовище з відкритим вихідним кодом, створене у 1993 році спеціально для академічного середовища, біоінформатики, фінансів та Data Science для проведення складних математичних розрахунків, статистичного аналізу, обробки даних й побудови графіків), а також електронні бібліотеки (RSaga – зв'язок R із модулями SAGA, terra – аналіз просторових даних, cLHS – умовна вибірка з латинського гіперкуба та ін.).

Результати досліджень. Для розроблення репрезентативної, геопросторової мережі моніторингу SOC в Україні проаналізовано два фундаментальні підходи до відбору проб [13, с. 5–7]: об'єктно-орієнтований (Design-based) та модельно-орієнтований (Model-based). Нагадаємо, що перший засновано на теорії ймовірностей, що дозволяє неупереджено оцінювати статистичні параметри, при якому випадковість забезпечується схемою відбору (простий випадковий відбір або стратифікована вибірка). Його перевагою є отримання незміщених оцінок, що не залежать від припущень щодо структури просторової варіації ознаки ґрунту. Другий з підходів засновано на геостатистичному аналізі, в якому значення ознаки ґрунту підпорядковуються певній математичній моделі (випадковому полю). Зазвичай цей підхід обирають у дослідженнях, для яких важливим є прогнозування локальних просторових варіацій.

На теперішній час, інформацію щодо просторового розподілу основних характеристик навколишнього середовища можна отримати відносно просто для великих територій за супутниковими даними. За наявності цих коваріат, стратегічний дизайн вибірки повинен забезпечувати охоплення повного спектру змінних навколишнього середовища, що може покращити опис властивостей ґрунту або класів ґрунту. Оскільки мета вибірки полягає в отриманні даних, які дозволяють оцінити певний статистичний параметр або зробити прогноз просторового розподілу властивостей ґрунтів на певній території, тому на початку розробки моніторингової мережі SOC здійснено пошук ефективної стратегії вибірки, яка найкращим чином використовує попередньо отриману інформацію (у випадку її наявності), оскільки відбір проб зазвичай обмежується фінансовими ресурсами.

Для розроблення репрезентативної, геопросторової мережі моніторингу SOC для України запропоновано стратегію стратифікованного відбору, який є статистично обґрунтованим методом, який передбачає поділ території на однорідні зони (страти) з подальшим відбором проб з кожної з них. Слід відзначити, що стратифікована вибірка є класичною стратегією оцінки середніх властивостей ґрунту, яка нещодавно була кодифікована в протоколах моніторингу SOC [14, с. 15–16] та за використанням окремих, сучасних методів аналізу даних здатна комбінувати переваги обох зі згаданих вище підходів. Це забезпечує високу репрезентативність та знижує похибку вимірювання запасів SOC до 30% порівняно з хаотичним відбором [15, с. 4, 9]. На нашу думку, для України як однієї з великих за площею країн Європи, логічним представляється в якості страти використовувати фізико-географічну область [16, с. 239], оскільки на цьому рівні диференціації комплексу фізико-географічних умов території враховуються геолого-геоморфологічні відмінності, що визначаються за гіпсометрією, характером розчленування рельєфу, літологічним складом антропогенних відкладів. Це обумовлює як певну подібність, так й своєрідність фізико-географічних процесів (теплового, водного режимів ґрунту) та умов, які формують SOC.

Шляхом аналізу наукових джерел також встановлено доцільність використання найбільш ефективного методу генерації репрезентативних систем відбору проб за допомогою латинського гіперкуба – cLHS, в якому схеми вибірки формуються за методом Монте-Карло з певними обмеженнями [17, с. 157–159]. Нагадаємо, що cLHS – це стратифікована випадкова процедура, яка забезпечує ефективний спосіб вибірки змінних з їх багатовимірних розподілів. Вона забезпечує повне охоплення діапазону кожної змінної шляхом максимальної стратифікації граничного розподілу. Спочатку її розробляли для цілей моделювання за методом Монте-Карло, що дозволило пізніше ефективно вибирати вхідні змінні й для комп'ютерних

моделей, тому цей метод використовувався в ґрунтознавстві та екологічних дослідженнях для оцінки невизначеності в моделях прогнозування, а також у геостатистиці для моделювання гаусівського випадкового розподілу. Важливо, що цей метод дозволяє обирати обмежену кількість ділянок за наявності певної кількості допоміжних даних. Тому cLHS представляється не тільки ефективним методом вибірки, який охоплює весь діапазон допоміжних змінних, але й процесом оптимізації, що забезпечує репрезентативність вибірки при меншій кількості симуляцій порівняно з простим випадковим відбором. На теперішній час у літературі обговорюються можливості вдосконаленої стратегії розробки систем відбору проб ґрунту за cLHS, як стратегії розробки вибірки на основі багатьох існуючих шарів й геопросторових даних [18, с. 13–15]. За результатами сумісного аналізу результатів використання cLHS з іншими методами генерації вибірок визначено, що cLHS є найефективнішим способом відтворення розподілу змінних, який підвищує точність прогнозування та гарантує, що згенеровані, навчальні вибірки адекватно відображають складні, різноманітні умови навколишнього середовища в ландшафті, покращуючи традиційні підходи до створення систем відбору проб [17, с. 163–164].

Для проєктування геопросторової мережі моніторингу SOC в Україні за cLHS розроблено багатоетапний методологічний підхід, що реалізує збір та статистико-математичний аналіз багатовимірних просторових даних (дані дистанційного зондування Землі, ЦМР, категоріальні дані), а також алгоритмічну оптимізацію вибірки (рис. 1).

На першому етапі в середовищі Google Earth Engine (GEE) за допомогою спеціально розробленого алгоритму мовою JavaScript, шляхом відбору, фільтрації та маскування різночасових супутникових зображень Sentinel-2 сформовано контрольований набір спектральних предикторів для моделювання мережі відбору проб з метою виділення лише тих ділянок сільськогосподарських земель, де сигнал поверхні репрезентує саме ґрунт, а не рослинність чи змішані покриви.

Результатом цього етапу є побудова медіанного композиту для пікселів відкритого ґрунту та експорт фінального набору шарів для подальшого аналізу: маски ґрунтового шару, спектральних каналів і похідних індексів, релевантних для виявлення відкритого ґрунту, зокрема NDVI, NBR2, BSI та інших допоміжних метрик.

На другому етапі в середовищі R із залученням інструментів RSAGA на основі FABDEM було сформовано набір похідних топографічних коваріатів, які фактично представляють процесно-орієнтовану структуру ландшафту, без урахування якої моніторингова мережа перетворюється лише на статистичне покриття території без урахування потенційних механізмів формування просторової мінливості SOC. До таких змінних належать ключові морфометричні характеристики рельєфу, які широко використовуються в ГІС для опису умов перерозподілу вологи, акумуляції матеріалу та розвитку ҐП (Slope, Aspect, Plan curvature, Profile curvature, Flow accumulation, Topographic wetness index). Результатом цього етапу є також перевірка геометричної сумісності всіх шарів та експорт фінального набору топографічних коваріатів для наступного статистичного відбору та застосування методу cLHS.

На третьому та четвертому етапах в середовищі R проводиться статистична діагностика сформованого набору коваріатів: аналіз розподілів, оцінювання парних кореляцій і багатовимірної структури варіації (аналіз головних компонент), що надає змогу уникнути мультиколінеарності в межах спільної маски валідних пікселів, побудувати логіку відбору коваріатів, яка забезпечує більш репрезентативний й науково обґрунтований відбір точок моніторингу SOC та відібрати

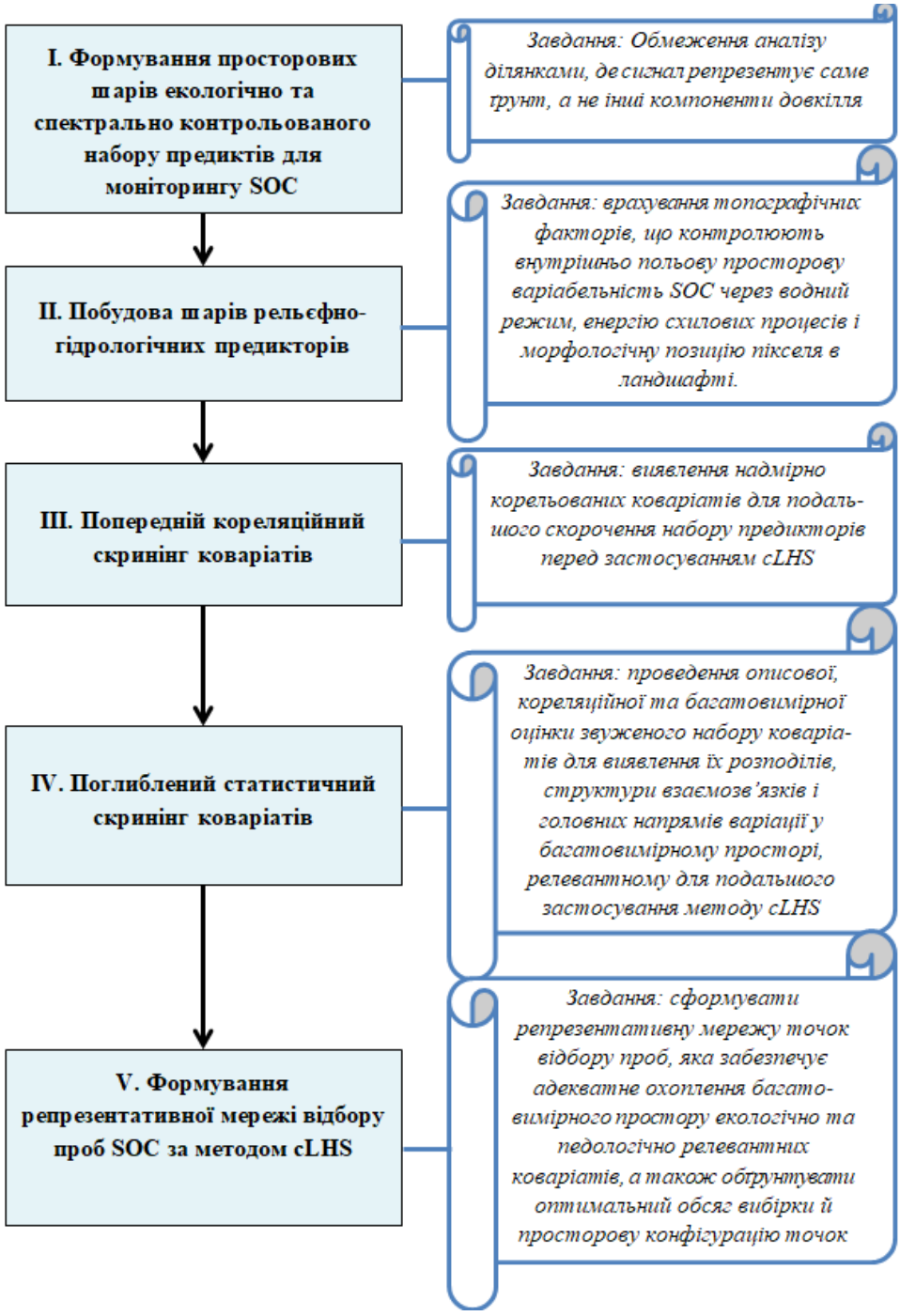


Рис. 1. Логіко-структурна схема формування репрезентативної мережі моніторингу SOC за методом cLHS

найбільш інформативні та репрезентативні предиктори для проектування вибіркової мережі.

На завершальному етапі, в середовищі R із використанням методу cLHS, здійснено оптимізований добір точок відбору проб ґрунту, із урахуванням як розподілів окремих коваріатів, так і покриття багатовимірного простору ознак та просторової конфігурації точок.

Зокрема, після попереднього скорочення набору змінних cLHS застосовувався для формування альтернативних вибірок різного об'єму, які мали максимально відтворювати розподіли безперервних і категоріальних коваріат у генеральній сукупності валідних пікселів, а також забезпечувати належне покриття багатовимірного простору ознак. Якість кожного варіанта вибірки оцінювали за кількома групами критеріїв: відповідністю розподілів «генеральна сукупність / вибірка» за статистикою Колмогорова-Смирнова, збалансованістю представлення ґрунтових класів, покриттям простору ознак за метрикою відстані до найближчого сусіда, просторовою розосередженістю точок, збіжністю цільової функції, а також положенням вибірки в просторі головних компонент (PCA coverage plots) відносно всієї генеральної сукупності. Такий комплексний підхід надає змогу обґрунтувати оптимальний розмір і просторову конфігурацію вибірки, що найкраще відображають просторову мінливість умов формування SOC.

Таким чином, запропонований підхід базується на інтеграції хмарної обробки супутникових даних у GEE, геоморфометричного аналізу в R і RSAGA, статистичного відбору коваріатів та оптимізації просторової вибірки за методом cLHS, що забезпечує науково обґрунтоване формування мережі моніторингу SOC.

В результаті опрацювання представленого методологічного підходу для територій з недостатньою кількістю інформації про властивості ґрунтів, що розташовано у різних регіонах нашої країни, згенеровано точні географічні координати місць відбору проб ґрунту (або закладки дослідних ділянок) для спостережень за вмістом SOC.

Для прикладу наведемо спроектовану мережу для східної частини Південнопридніпровської схилово-височинної області, площею близько 1323,5 км^2 (або 1 323 510 га), що представлено на рисунках 1та 2. Накладання точок на тривимірну модель поверхні дозволяє наочно проаналізувати, що згенеровані за методом точки моніторингової мережі охоплюють усі елементи рельєфу: вододіли, верхні, середні та нижні частини схилів, враховують схили різних експозицій (рис. 2).

Електронна база даних для побудованої мережі моніторингу SOC за методом cLHS вміщує крім точних географічних координат, ще значення усіх використаних предиктів, що можна вважати корисним для налагодження довготривалих спостережень за ґрунтами за супутниковою інформацією.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, в результаті досліджень розроблено та опрацьовано достатньо технологічний методологічний підхід до проектування моніторингової мережі SOC за методом cLHS, який базується на інтеграції хмарної обробки супутникових даних у GEE, геоморфометричного аналізу в R і RSAGA, статистичного відбору коваріатів та оптимізації просторової вибірки з математичною точністю, що цілком відповідає науково обґрунтованим підходам до формування репрезентативної мережі точок відбору проб та спостережень, які відомі у природознавчих науках.

Автоматизований процес підготовки коваріат (від спектральних індексів до складних морфометричних показників рельєфу), використання хмарних обчислень для обробки великих масивів даних забезпечує відтворюваність підходу,

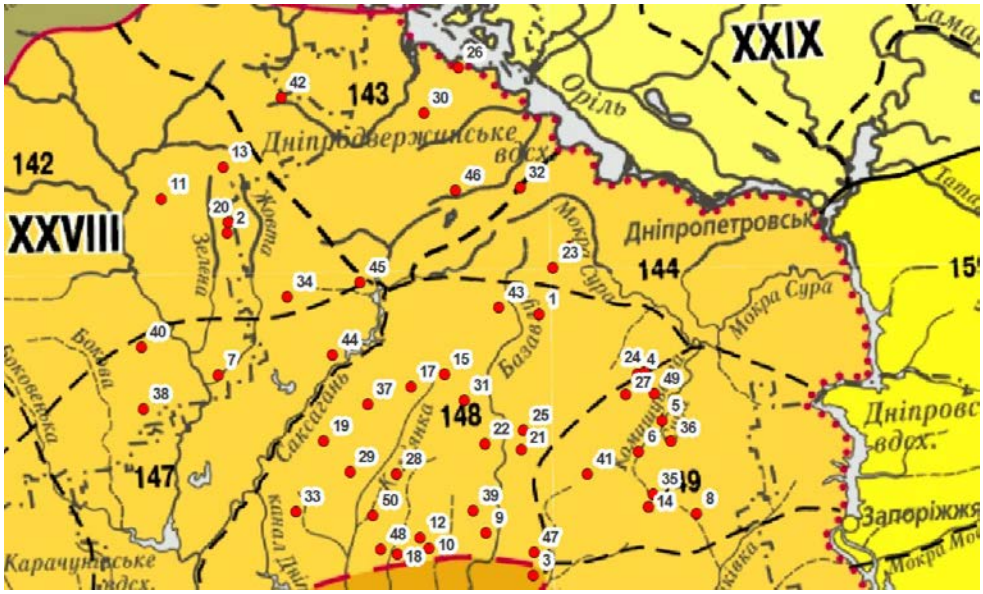


Рис. 2. Геопросторова мережа моніторингу SOC для Південнопридніпровської схилово-височинної області, розробленої за cLHS (в якості основи фрагмент карти «Ландшафти та фізико-географічне районування» у масштабі 1:2 500 000 [12, с. 222–223])

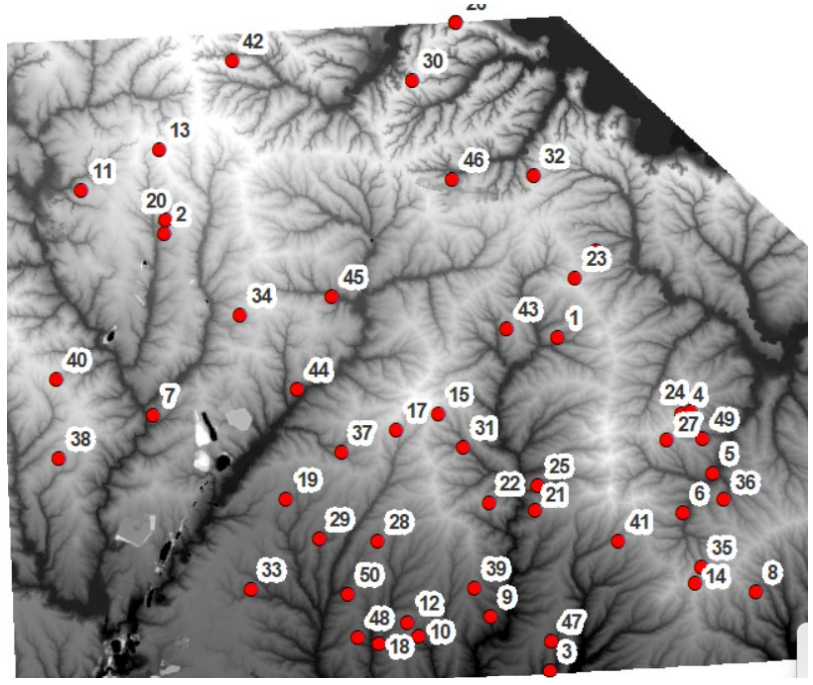


Рис. 3. Розташування точок спостережень за SOC для Південнопридніпровської схилово-височинної області, що представлено на основі ЦМР

його масштабування для території будь якої площі та повністю відповідає вимогам Європейського зеленого курсу (Green Deal) та ФАО ООН (Протокол GSOC MRV щодо вимірювань та верифікації SOC, 2020), тому може бути рекомендовано в якості основного підходу для створення сучасної Національної системи моніторингу балансу вуглецю в ґрунтах України.

Згенеровані, репрезентативні точки моніторингової мережі доцільно представляти як «еталонні» для створення моделей машинного навчання, які можна використовувати для динамічного картографування вмісту SOC за регулярно поновлюваною супутниковою інформацією про стан агроценозів.

До найближчих перспектив розвитку представленого підходу є поступове відпрацювання розробленого алгоритму на більш детальному територіальному рівні, що відповідає фізико-географічним районам (в якості нової страти), що дозволить перейти від аналізу регіональних трендів зміни SOC до отримання точних, прикладних результатів, підвищенні точності просторово-часового моделювання SOC під впливом глобальних змін клімату та різних систем землеробства, що сприятиме трансформуванню теоретичних, прогностичних моделей у високоточний інструмент управління ґрунтовими ресурсами.

Окремим напрямом розвитку представленого підходу є створення з часом, на основі розробленої мережі, системи стаціонарних ділянок для довгострокового моніторингу ґрунтів (з вимірюваннями комплексу властивостей ґрунтів кожні 3–5 або 10 років).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Закон України № 2973-IX «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо державної системи моніторингу довкілля, інформації про стан довкілля (екологічної інформації) та інформаційного забезпечення управління у сфері довкілля» від 20.03.2023. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2973-20.

2. Grace J. Understanding and managing the global carbon cycle. Journal of Ecology. 2004. Vol. 92. Is. 2. P. 189-202. URL: https://doi.org/10.1111/j.0022-0477.2004.00874.x.

3. Балюк С.А., Мірошниченко М.М., Медведєв В.В. Вісник аграрної науки. 2018. №11 (788). С. 5-12. URL: https://agrovisnyk.com/pdf/ua_2018_11_01.pdf.

4. Шум І.В., Бедернічек Т.Ю. Екологічна якість ґрунту: критерії оцінювання. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. Вип. 23.1. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2013/23_18/72_Szum.pdf С. 72-80.

5. Wiesmeier M. et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*. 2019. Vol.333. P.149-162. URL: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026.

6. EUR 16232 - European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring /D. King, R. J.A. Jones, A.J. Thomasson (eds.) Luxembourg: Office for Official Publications of the European Community 1995 – 11, 286 pp. URL: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/esb_rr/n01_EUR16232.pdf.

7. King D. et al. The EU soil geographic database. In: European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Community 1995. P.43-60. URL: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/esb_rr/n01_EUR16232.pdf

8. Vossen P., Meyer-Roux J. Crop monitoring and yield forecasting activities of the MARS Project. In: European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Community 1995. P.11-29. URL: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/esb_rr/n01_EUR16232.pdf.

9. Le Bas C, King D., Daroussin Joël J. A tool for estimating soil water available for plants using the 1:1,000,000 scale soil geographical data base of Europe. Geo-information for sustainable land management. Enschede, Netherlands, 1997. ⟨hal-02771892⟩. URL: https://hal.inrae.fr/hal-02771892v1/document.

10. Jones R.J.A., Hollis J.M. Pedotransfer rules for environmental interpretations of the EU Soil Database. In: Soil databases to support sustainable development./C. Le Bas and M. Jamagne (eds.). INRA-JRC, 1996. 149 p. P. 125-133. URL: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/esb_rr/n02_EUR16371.pdf

11. The Copernicus Data Space Ecosystem Browser. URL: https://browser.dataspace.copernicus.eu

12. Ландшафти та фізико-географічне районування [Карта] /розроб. І.А. Байдіков та ін.; наук. кер. Л. Г.Руденко // Національний атлас України / НАН України, Ін-т географії [та ін.]; голов. ред. Л.Г. Руденко; масштаб 1:2 500 000. Київ: ДНВП «Картографія», 2007. С. 222–223. URL: http://wdc.org.ua/atlas

13. Brus D.J, de Gruijter J.J. Random sampling or geostatistical modelling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with Discussion) *Geoderma*. 1997. Vol. 80. P. 1-44 URL: https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00072-4

14. Oldfield, E.E. 2021. Agricultural soil carbon credits: Making sense of protocols for carbon sequestration and net greenhouse gas removals. Environmental Defense Fund, New York, New York. 2021. 42 p. URL: https://static1.squarespace.com/static/624462cacbbb2344369f30d1/t/67abf256d0c2f63409641a8d/1739321944317/agricultural-soil-carbon-credits-protocol-synthesis.pdf

15. Potash E. et al. Multi-site evaluation of stratified and balanced sampling of soil organic carbon stocks in agricultural fields. *Geoderma*. 2023. Vol. 438. Art. 116587. P. 1-10. URL: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116587

16. Маринич О.М., Шищенко П.Г. Фізична географія України: Підручник. К.: Знання, 2005. 511с.

17. Minasny B., McBratney A.B. Latin Hypercube Sampling as a Tool for Digital Soil Mapping. *Developments in Soil Science*. 2006. Vol. 31. P. 153-165. URL: https://doi.org/10.1016/S0166-2481(06)31012-4

18. Huang B., Yang G., Lei J. et al. A partitioned conditioned Latin hypercube sampling method considering spatial heterogeneity in digital soil mapping. *Scientific reports*. Vol. 15. Art.12851. P. 1-25. URL: https://doi.org/10.1038/s41598-025-95631-5

Дата першого надходження статті до видання: 29.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.10.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.11.2026