

ІНТЕГРАЦІЯ ГІС ІНСТИТУЦІЙ У ВИЗНАЧЕННІ ФІЗИКО-ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ

СУХОМЛІН Л.В. – кандидат економічних наук

orcid.org/0009-0005-7971-8289

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток геоінформаційних систем (ГІС) та технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) відкриває принципово нові можливості для безперервного моніторингу стану земельних ресурсів. Формування євроінтеграційних механізмів на принципах прийнятої Директиви (ЄС) 2025/2360 [1], метою якого є досягнення здорового стану усіх ґрунтів у ЄС до 2050 року на засадах встановлених єдиних правил оцінки якості ґрунтів, запобігання їх деградації та ефективного управління забрудненими ділянками. За умов військової агресії та тимчасової окупації територій, традиційні наземні методи агрохімічного обстеження ґрунтів стали фізично неможливими через безпекові ризики, мінування та відсутність доступу до об'єктів. У цьому контексті цифрова інтеграція ГІС-платформ та хмарних обчислювальних потужностей, таких як Google Earth Engine (GEE) [2], набуває критичної актуальності. Використання спеціалізованих спектральних індексів, зокрема Barren Soil Index (BSI) [3], у поєднанні з алгоритмами моделювання фізико-хімічних параметрів [4], таких як вміст гумусу, рН, вологість та щільність ґрунту дозволяє здійснювати дистанційний аудит деградаційних процесів. Відсутність належного агротехнічного догляду, зміна гідрологічного режиму, випалювання стерні та деградація гумусового профілю провокують стрімку деградацію ґрунтового покриву. Головна проблема полягає у відсутності апробованих дистанційних методик, які дозволяють в умовах повної відсутності оперативних наземних верифікованих даних (ground truth) диференціювати природні коливання фізико-хімічного складу ґрунту від природної та мілітарогенної деградації. Існуючі ГІС-моделі на сьогодні не враховують специфіку екологічних змін посушливого Степу України, що вимагає розробки адаптованих програмних алгоритмів у середовищі GEE на основі індексу BSI для моніторингу недоступних територій. Тому одним із важливих завдань даного дослідження було дослідження використання космічної спектrophотометрії для визначення фізико-хімічних параметрів ґрунтів з метою покращення розуміння їх стану та впливу на сільськогосподарські угіддя Оріхівського району Запорізької області.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання застосування ГІС та ДЗЗ для оцінки параметрів ґрунту досліджуються багатьма вітчизняними та зарубіжними

вченими. Теоретичні основи дистанційного моніторингу агроландшафтів та оцінки вмісту гумусу закладені у працях В. В. Медведєва, Т. Ю. Биндича [5], А. В. Ачасова [6], О. Г. Тараріки [7]. Застосування хмарних обчислень Google Earth Engine для детекції відкритих ґрунтів та розрахунку індексу BSI активно висвітлюється у сучасних дослідженнях С. Т. Nguyen [3], Н. Куцул, М. Лавренюк [8]. Вплив воєнних дій на екологічний стан ґрунтового покриву України та фіксацію мілітаріогенного збитку за допомогою супутникових даних сьогодні активно вивчають такі науковці Інституту ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського, як С. А. Балюк, А. В. Кучер, М. О. Солоха [9], а також експерти робочих груп з екологічного моніторингу за участю ДУ «Інституту охорони ґрунтів України» на чолі з Ю. Зайцевим, фахові дослідження І. С. Горелика, О. С. Бутенко, Д. М. Баранова [10]. Незважаючи на значну кількість наукових праць у сфері супутникового моніторингу земель, поза увагою залишається низка специфічних питань пов'язаних з адаптацією індексу BSI для мілітарно-деградованих територій. Існуючі алгоритми Barren Soil Index розроблені переважно для класичного моніторингу сільськогосподарських польових масивів, що обробляються, або пустельних територій. Крім того є постійне оновлення програмних ГІС інструментів, які потребують апробацій.

Метою статті є теоретичне обґрунтування та практична реалізація методології дистанційного експрес-моніторингу фізико-хімічного стану ґрунтового покриву сільгоспугідь за допомогою інтеграції ГІС-технологій, хмарної платформи Google Earth Engine [11] в умовах тимчасової окупації та мілітаріогенного навантаження. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі науково-практичні завдання: Розробка та оптимізація програмного коду у середовищі Google Earth Engine (GEE) для автоматизованої фільтрації та побудови безхмарних медіанних мозаїк супутникових знімків Sentinel-2 на територію дослідження; Адаптація алгоритму розрахунку індексу відкритих ґрунтів (Barren Soil Index – BSI) та реалізувати методу спектрального маскування вегетаційного покриву у межах Оріхівського району. Побудова моделі за спектральними характеристиками відбиття супутникових каналів, індексом BSI за чотирма ключовими фізико-хімічними параметрами ґрунту: показником кислотності (рН), щільністю (Bulk Density), вмістом органічних речовин (Organic Matter) та поточною вологістю (Soil Moisture).



Матеріали та методика досліджень. Формування просторових моделей та аналіз фізико-хімічного складу ґрунту здійснювався у межах території Оріхівського району Запорізької області станом на 2022–2024 рр.. Цей регіон зазнає значного мілітаріогенного навантаження, що робить безпосередній відбір ґрунтових зразків неможливим і зумовлює необхідність використання методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Основними даними є багатоспектральні супутникові знімки високої роздільної здатності місії Sentinel-2, доступні через хмарну платформу Google Earth Engine. Дані включають спектральні канали видимого, ближнього (NIR) та короткохвильового інфрачервоного (SWIR) діапазонів, які є найбільш інформативними для оцінки характеристик ґрунту.

Методологія дистанційного експрес-моніторингу базується на інтеграції хмарних обчислень у середовищі Google Earth Engine (GEE). На першому етапі розроблено програмний код для збору та автоматизованої фільтрації багатоспектральних знімків Sentinel-2 (L2A) на територію Оріхівського району. Для ідентифікації фізичного стану відкритих ділянок адаптовано алгоритм індексу відкритих ґрунтів (BSI) на основі комбінації каналів SWIR, NIR, Red та Blue. На завершальному етапі побудовано просторові моделі по чотирьом ключовим параметрам: кислотності (pH), щільності (Bulk Density), вмісту органіки (Organic Matter) та поточної вологості (Soil Moisture).

Результати досліджень. Сучасні потреби в інформаційних даних на тимчасово недоступних територіях нашої країни формують попит на пошуки альтернативних дистанційних та безпекових параметрах дослідження ґрунтового покриття для різногалузевих фахівців. Підхід дистанційного моніторингу фізико-хімічного стану ґрунтового покриття Оріхівського району на хмарній платформі Google Earth Engine (GEE) [11] за обраним індексом відкритого ґрунту (BSI) обумовлений саме пріоритетами безпекових ризиків та критичними потребами аграрного сектору для майбутнього відновлення виробництва. Використання індексу BSI на відміну від

NDVI, що аналізує біомасу, BSI оцінює оголений ґрунт [3]. Через короткохвильовий інфрачервоний спектр (SWIR1) він реагує на структуру мінералів, вологість та текстуру, що задовольняє потребу аграріїв у точному картуванні зон дегуміфікації та переущільнення для розрахунку диференційованого внесення добрив і вибору агротехніки [9]. Блок BSI чітко фіксує зони механічного впливу (вирви, фортифікації, польові дороги). Це закриває потребу в первинному безпековому аудиті, дозволяючи агровиробникам дистанційно оцінити обсяги необхідної технічної рекультиваци та пріоритетність розмінування окремих контурів полів.

Пріоритетами ж використання середовища GEE є хмарні обчислення великих даних, адже програмний код виконує математичні операції над терабайтними масивами знімків Sentinel-2 із просторовою розрізненістю 10–20 метрів на серверах Google, задовольняючи потребу в експрес-моніторингу без використання коштовних локальних ГІС-пакетів [2]. Алгоритм автоматично аналізує сотні знімків за весняний період і за допомогою функції «median» генерує безхмарні мозаїки, згладжуючи атмосферні спотворення. Створений JavaScript-код є універсальним. Платформа чітко здійснює масштабованість та часовий синтез і при зміні просторових контурів або часових меж перераховує показники pH, вологості й органіки, а функція reduceRegion виводить площинну статистику [2, 6]. Це забезпечує потребу агрохолдингів та фермерів у ретроспективному аналізі для оцінки реальних збитків та прогнозування динаміки відновлення родючості

Результатом роботи алгоритму за сформованим JavaScript-код є відображення шару індексу Barren Soil у робочій площині (рис. 1, табл. 1) який демонструє розподіл площ сільськогосподарських угідь Оріхівського району за класами Barren Soil індексу та відображає взаємозв'язок спектральних даних із фактичними змінами фізико-хімічних параметрів.

Отримані дані свідчать, що 42,5% площ району зафіксовано у стані абсолютно відкритого мінерального горизонту. В аграрному контексті [4], це нормальний

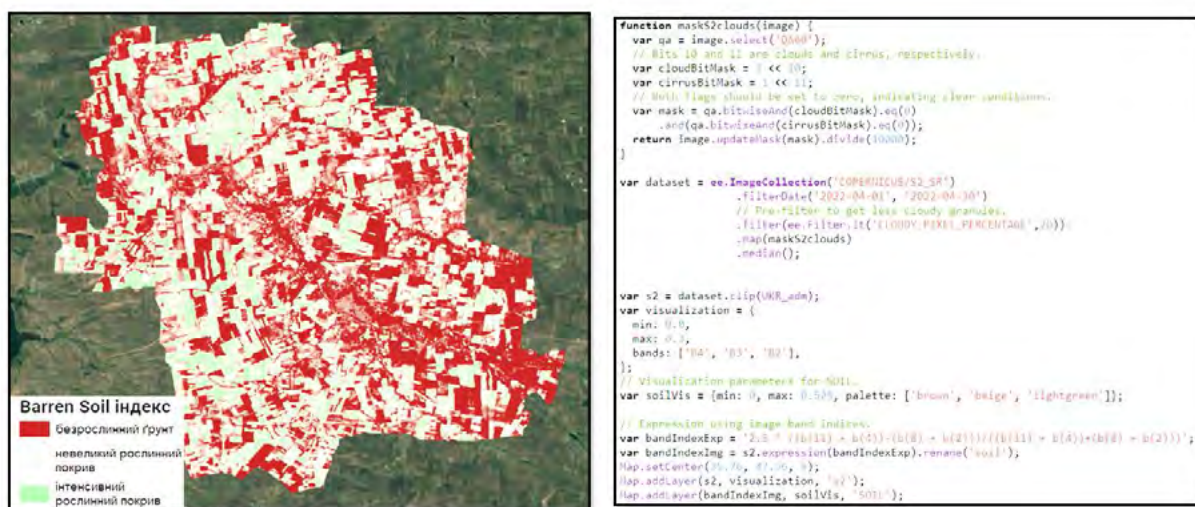


Рис. 1. Відображення коду та сформованого шару Barren Soil індексу

показник для періоду весняної оранки під просапні культури, але значна частина цього класу сформована штучно – внаслідок випалювання рослинності під час обстрілів та появи лінійних логістичних деструкцій [9].

Наявність великого масиву забур'янених та закинутих земель (28,1% бежевої зони) вказує на вимушене припинення класичної сівозміни, що веде до специфічного перерозподілу поживних речовин та вологи у профілі, що замінив колишні інтенсивні посіви зернових і на сьогодні аналізується як перелоги. Така зміна у класифікації угідь повинна відображатися у даних Державного земельного кадастру.

Важливим компонентом оцінки фізико-хімічних властивостей ґрунту є оцінка просторової диференціації його щільності, адже цей показник безпосередньо впливає на пористість, водопроникність та умови розвитку кореневих систем [12]. Картографічна модель, згенерована у Google Earth Engine шляхом нормування відбивної здатності у SWIR-діапазоні та індексу BSI приведена до шкали коефіцієнтів від 0,00 до 1,00, чітко диференціює територію за ступенем ущільнення верхнього горизонту (рис. 2).

Зони мінімального ущільнення [5, 7] (індекси 0,00 – 0,40; світло-зелені відтінки): Переважають у пониженнях рельєфу та долинах річок, де сформовані лучно-чорноземні та лучно-болотні ґрунти. Завдяки високій природній пористості (56–60%) та збереженому трав'яному покриву ці ділянки демонструють низькі значення BSI, що свідчить про пухкий стан поверхневого шару. Коли ґрунт пухкий та структурний, за норми 1,16 г/см³, канали поглинають світло за рахунок мікротіней [7]. При переущільненні важкою технікою поверхня згладжується, відбиття у каналах (B11) (SWIR1) та (BSI) різко зростає, сигналізуючи про ущільнення понад 1,29 г/см³. Зони критичного переущільнення за індексу 0,60–1,00 та щільністю від 1,29 і більше 1,42 (темно-зелені контури,) вказують на умови відсутності класичного обробітку та наявності мілітаріогенних факторів (рух важкої гусеничної та колісної техніки, тривале переущільнення через умови не обробітку) [10] модель фіксує різке падіння пористості, що призводить до руйнування структури, блокування аерації, падіння водо-поглинаючої здатності.

Наступним компонентом моделювання є визначення рівня кислотності /лужності (pH). Це фундаментальний

Таблиця 1

Дані класифікації ґрунту за Barren Soil індексом

Клас за індексом BSI/колір	Частка від заг. площі (%)	Спектральні особливості в GEE	Тренди фізико-хімічних показників	Основні фактори формування
Безрослинний ґрунт / Червоний	42,5%	Максимальне відбиття в SWIR1 (B11) та RED (B4). NDVI < 0,1	Зростання щільності складання (BD > 1,45 г/см ³); падіння вологості; ризик дегуміфікації.	Травневий агротехнічний обробіток; мілітаріогенне переущільнення, вирви, фортифікація
Невеликий рослинний покрив / Бежевий	28,1%	Збалансоване поглинання SWIR та NIR. NDVI: 0,1 – 0,25	Стабілізація pH; помірний вміст лабільної органічної речовини.	Перші етапи забур'янення, перелоги (рудеральні сукцесії); рідкі посіви ярих культур.
Інтенсивний рослинний покрив/ Зелений	29,4%	Максимальне відбиття в NIR (B8) та поглинання в RED. NDVI > 0,25	Оптимальна вологість ґрунту (SM); вищі калійні	Розвинені озимі культури; щільний багаторічний

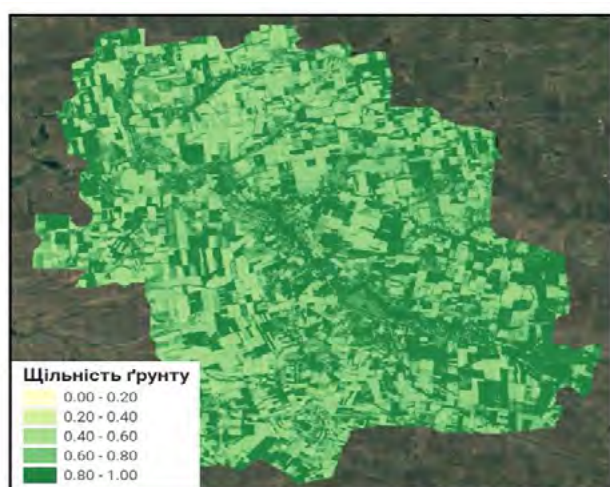


Рис. 2. Відображення сформованого шару оцінки щільності ґрунту

фізико-хімічним індикатор родючості, який визначає рухливість поживних елементів, токсичність важких металів та активність ґрунтової мікрофлори [4, 12]. Аналіз згенерованої карти (рис. 3) та статистичних матриць показує, що ґрунтовий покрив агроландшафтів Оріхівського району за фактором кислотності є високооднорідним та агрономічно сприятливим. Абсолютна більшість територій – 68,5% характеризується нейтральною реакцією ($= 7,0$). Ще 14,2% площ мають близькі до нейтральних показники, що у цілому забезпечує стабільний базовий рівень родючості для 82,7% земельного фонду району. Проте аналітичний інтерес становлять виявлені аномалії, які локалізовано переважно у східних та південно-східних частинах району, а також уздовж русел річок, де поширені лучно-чорноземні ґрунти. На плато поява слаболужних плям ($pH = 7,5-8,2$) свідчить про наближення до поверхні карбонатного горизонту (Phk), що часто викликано прискороною водною або вітровою ерозією та змивом гумусового шару.

Незважаючи на загальну візуальну «зелену норму» карти, дрібнодисперсний аналіз у GEE виявляє локальні лінійні та мозаїчні аномалії лужності ($pH > 8,0$). При зіставленні з картами руйнувань та вирв стає зрозуміло, що глибокі вибухи вивернули на поверхню нижні ілювіальні та карбонатні горизонти ґрунту. Крім того, хімічні залишки вибухових речовин та згорання військової техніки призводять до локального солонцювання ріллі [9, 10]. Таким чином, інтеграція ГІС-технологій дозволяє зафіксувати, що загальний потенціал кислотності району залишається стабільним, але мілітарне навантаження створює дрібноконтуру плямистість, яка ускладнить майбутнє відновлення однорідних посівів.

Вміст органічної речовини (гумусу) є ключовим критерієм потенційної та ефективної родючості ґрунту, що визначає його структурно-агрегатний стан, здатність поглинання та азотний режим [4, 12]. Дистанційний моніторинг гумусового стану в середовищі GEE базується

на закономірностях спектрального відбиття: зі збільшенням кількості органіки оптична щільність ґрунту зростає. Результатом роботи коду є створення нового шару який відображено на рис. 4. Модель оцінки вмісту органічної речовини визначає оптичну закономірність: чим більше органіки, тим темніша поверхня і тим сильніше вона поглинає світло у видимому червоному діапазоні (B4) [7]. Результати просторового моделювання свідчать про надзвичайно високу базову родючість досліджуваного регіону: 89,3% сільськогосподарських угідь Оріхівського району мають високий вміст органічних речовин (5–10%).

Проте, детальний порівняльний ГІС-аналіз виявляє приховані вогнища деградації. Поява 9,1% площ із середнім вмістом (2–5%) та 1,2% з низьким вмістом (0–2%) локалізована у зонах інтенсивного мілітарізованого впливу. Плями середнього вмісту чітко повторюють контури випалених полів та логістичних шляхів військової техніки. Постійні пожежі рослинних решток повністю знищили рухому фракцію органіки, яка забезпечувала безпосереднє живлення мікрофлори. Крім того, механічне перевертання шарів ґрунту при вибухах винесло на поверхню ілювіальні горизонти з низьким вмістом гумусу, що зафіксовано на карті як дрібна червона і рожева плямистість серед суцільного коричневого масиву [10]. Ця деструкція органічного профілю суттєво знижує буферність ґрунтів і вимагатиме тривалих рекультивацийних заходів.

Динаміка поверхневого зволоження є критичним чинником формування фактичної родючості в посушливій підзоні Південного Степу України [7]. Дистанційний моніторинг вологовмісту відкритих ґрунтів у середовищі GEE базується на високій поглинальній здатності молекул води в короткохвильовому інфрачервоному діапазоні (SWIR2, канал B12). Зниження інтенсивності відбиття в цьому каналі свідчить про насичення ґрунту вологою, тоді як сухий та деструктурований

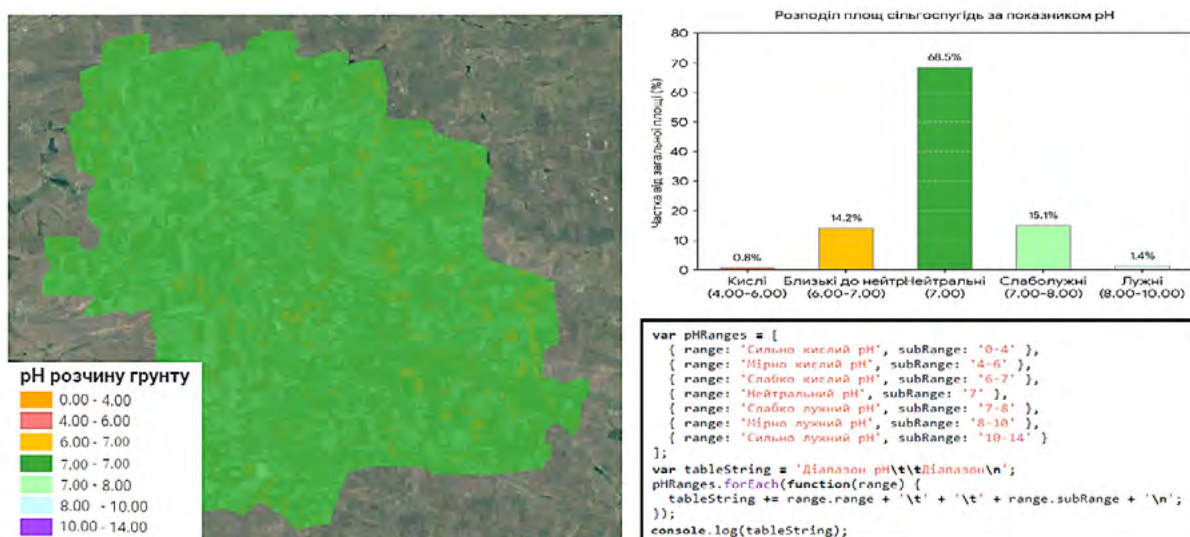


Рис. 3. Відображення коду та сформованого шару pH ґрунту

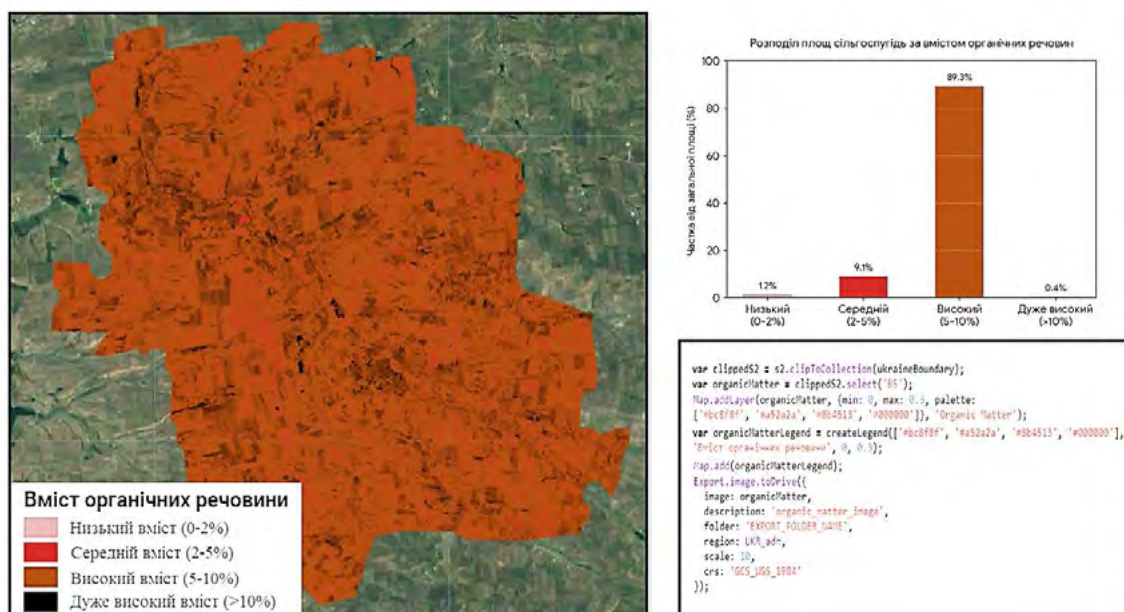


Рис. 4. Відображення коду та сформованого шару вмісту органічних речовин

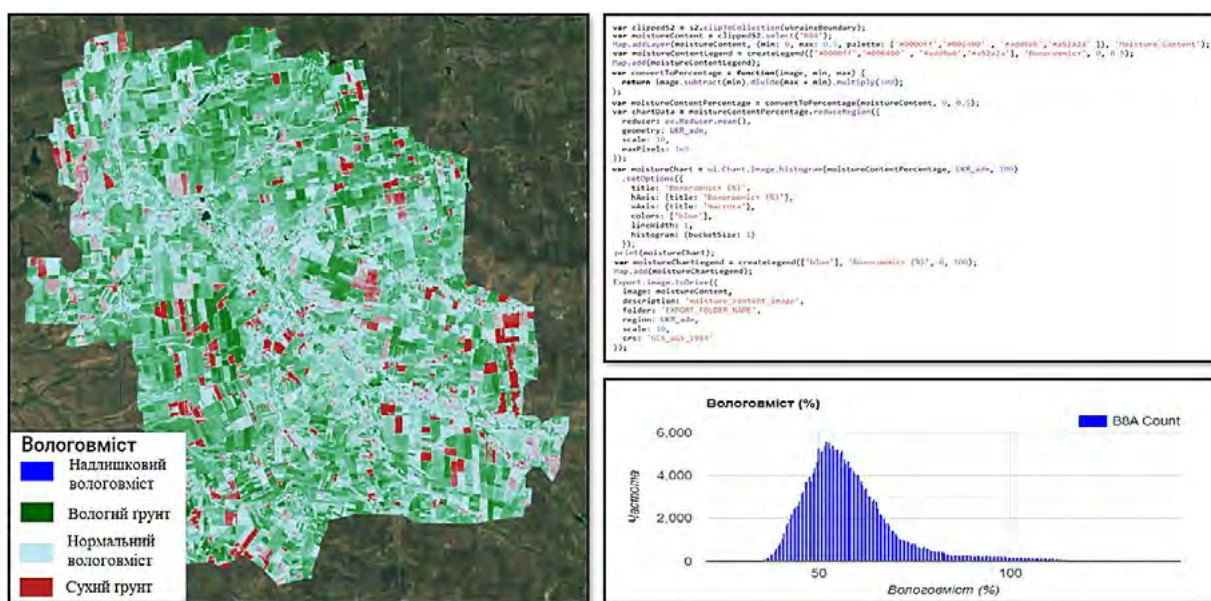


Рис. 5. Відображення коду та сформованого шару вологості ґрунту

мінеральний шар демонструє максимально критичний дефіцит води. У результаті роботи коду сформовано шар рівня зволоження ґрунту (рис. 5).

Аналіз результатуючої моделі показує, що гідрологічний каркас Оріхівського району утримує відносну стабільність: 64,9% земель мають нормальний вміст води, а 26,4% класифіковані як вологі ґрунти. Проте, ключовий аналітичний інтерес для дослідження становить просторове залягання аномального «сухого ґрунту» (8,2%), представленого червоними контурами та дрібними плямами. Механічне здавлювання ґрунту важкою технікою зруйнувало зернисто-комкувату структуру чорноземів, склеїло капіляри й заблокувало нормальну інфільтрацію опадів [9]. Вода не встигає проникати

всередину профілю, а швидко випаровується з оголеної безрослинної поверхні, провокуючи локальний гідрологічний стрес. Таким чином, ГІС-інтеграція дозволяє довести, що мілітарне навантаження викликало не просто локальні пошкодження рельєфу, а запустило процеси штучного висушування й деградації водно-фізичних властивостей орного шару.

Висновки. У результаті проведеного дослідження доведено, що використання середовища Google Earth Engine, супутникових знімків Sentinel-2 у поєднанні з індексом BSI є надійним інструментом для дистанційного експрес-аудиту фізико-хімічного стану земель в умовах повної недоступності до досліджуваної території. По-компонентний аналіз ґрунтів Оріхівського

району підтвердив, що на потенційно високопродуктивних ґрунтах виявлено серйозні мілітаріогенні аномалії штучного переушільнення верхнього орного горизонту на 31,3% площі, що локалізовані вздовж лінійних логістичних шляхів та оборонних споруд від важкої техніки. Це призвело до руйнування пористості та падіння здатності ґрунту вбирати вологу. Механічне переміщення нижніх ілювіальних горизонтів внаслідок вибухів та регулярне випалювання рослинних решток спровокували деґуміфікацію на 10,3% полів, де вміст органіки знизився до середнього та низького рівнів. На цих же ділянках зафіксовано дрібноконтуру плямистість підлуження через вихід на поверхню карбонатів кальцію та хімічної реакції вибухової речовини.

Згенеровані у GEE карти просторового розподілу окремих показників фізико-хімічного стану ґрунту можуть задовольняти оперативні потреби аграріїв. Вони дають змогу безконтактно оцінити обсяги необхідної технічної та хімічної рекультиваци, розрахувати екологічні збитки та визначити пріоритетність полів для відновлення і подальшого використання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Directive (EU) 2025/2360 of the European Parliament and of the Council: Directive of 12 November 2025 on soil monitoring and resilience (Soil Monitoring Law). Document 32025L2360. URL : <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2025/2360/oj> (last accessed 20.11.2025).
2. Давибіда Л. І. Аналіз можливостей і досвіду використання платформи Google Earth Engine для вирішення задач моніторингу довкілля. *Науково-технічний журнал*. 2021. № 2 (24). С. 75–86. DOI: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-2\(24\)-75-86](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-2(24)-75-86).
3. Nguyen C. T., Chidthaisong, A., Kieu Diem P., and Huo L. Z. A modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow periods in Southeast Asia using Landsat 8. 2021. Land. 10(3), 231. DOI: 10.3390/land10030231.
4. Практикум з ґрунтознавства: навчальний посібник ; за редакцією проф. Д. Г. Тихоненка. 6-е вид., перероб. і доп. Харків : Майдан, 2009. 448 с.
5. Багатоспектральне космічне сканування в системі моніторингу ґрунтів : монографія / Трускавецький С. Р. та ін. Харків : ФОП Бровін О. В., 2018. 280 с.
6. Геоінформаційні системи як основа сучасного картографування ґрунтів/ Ачасов А. Б., Тітенко А. В., Власов В. О., Курілов В. І. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2014. № 1-2. С. 9–14. URL: https://journals.uran.ua/ludina_dov/article/view/34226.pdf
7. Агроекологічний супутниковий моніторинг: монографія/ Тараріко О. Г., Сиротенко О. В., Ільєнко Т. В., Кучма Т. Л.. Київ.: Аграр. наука, 2019. 204 с.
8. Kussul N. Crop inventory at regional scale in Ukraine: developing in season and end of season crop maps with multi-temporal optical and SAR satellite imagery. Kussul N., Lavreniuk M., Shelestov A., & Skakun S. *European Journal of Remote Sensing*. 2018.51 (1). P. 627–636. DOI: <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1454265>
9. Оцінювання впливу збройної агресії на стан чорноземних ґрунтів і заходи з його відновлення : монографія / за ред. С. А. Балюка, А. В. Кучера. Київ : Аграрна наука, 2025. 240 с.
10. Горелик С. І., Баранов Д. М. Визначення об'єму пошкодженого ґрунту сільськогосподарських угідь від військових дій за даними ДЗЗ. *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022* : зб. матеріалів І Міжнар. наук.-практ. конф. Полтава : НУПП, 2022. С. 189–193. URL: <https://nupp.edu.ua/uploads/files/01/events/conf/2022/i-mnpk-podolannia-eko-rizikiv/zbirnik-materialiv.pdf>.
11. Earth Engine Data Catalog : website. URL.: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-2> (last accessed 08.04.2025).
12. Структура та порядок використання бази даних «Властивості ґрунтів України» : Інструкція. Лактіонова Т. М. та ін. Харків: «Апостроф», 2010. 96 с.

REFERENCES:

1. European Parliament, & Council of the European Union. (2025). Directive (EU) 2025/2360 of 12 November 2025 on soil monitoring and resilience (Soil Monitoring Law). URL : <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2025/2360/oj> (last accessed 20.11.2025).
2. Davybyda, L. I., (2021). Analiz mozhlyvostei i dosvidu vykorystannia platformy Google Earth Engine dlia vyryshennia zadach monitorynhu dovkillia [Analysis of capabilities and experience of using Google Earth Engine platform for environmental monitoring challenges]. *Naukovo-tekhnichnyi zhurnal*, 2 (24), 75–86. DOI: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-2\(24\)-75-86](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-2(24)-75-86) [in Ukrainian].
3. Nguyen, C. T., Chidthaisong, A., Kieu Diem, P., & Huo, L. Z. (2021). A modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow periods in Southeast Asia using Landsat 8. *Land*, 10 (3), Article 231. DOI: 10.3390/land10030231.
4. Tykhonenko, D. H. (Ed.). (2009). *Praktykum z gruntoznavstva: navchalnyi posibnyk* [Practical course on soil science: a textbook] (6th ed.). Kharkiv : Maidan, 448 p. [in Ukrainian].
5. Truskavetskyi, S. R., Byndych, T. Y., Viatkin, K. V., Sherstiuk, O. I., & Koliada, L. P. (2018). Bahatospektralne kosmichne skanuvannia v systemi monitorynhu gruntiv : monohrafiia [Multispectral space scanning in the soil monitoring system: a monograph]. Kharkiv : FOP Brovin O., 280 p. [in Ukrainian].
6. Achasov, A. B., Titenko, H. V., Vlasov, O. V., & Kurilov, V. I. (2014). Heoinformatsiini systemy yak osnova suchasnoho kartohrafuvannia hruntiv [Geographic information systems as a baseline of modern soil mapping]. *Liudyna ta dovkillia. Problemy neoeekolohii*, (1-2), 9–14. URL : https://journals.uran.ua/ludina_dov/article/view/34226.pdf. [in Ukrainian].
7. Tarariko, O. H., Syrotenko, O. V., Iliencko, T. V., & Kuchma, T. L. (2019). Ahroekolohichniy suputnykovyi monitorynh: monohrafiia [Agroecological satellite monitoring: a monograph]. Kyiv : Aharna Nauka, 204 p. [in Ukrainian].
8. Kussul, N., Lavreniuk, M., Shelestov, A., & Skakun, S. (2018). Crop inventory at regional scale in Ukraine: developing in season and end of season crop maps with multi-temporal optical and SAR satellite imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 627–636. DOI: <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1454265>.

9. Baliuk, S. A., & Kucher, A. V. (Eds.). (2025). Otsiniuvannia vplyvu zbroinoi ahresii na stan chornozemnykh gruntiv i zakhody z yoho vidnovlennia: monohrafiia. [Assessment of the impact of armed aggression on the state of chernozem soils and measures for its restoration: A monograph]. Kyiv : Aharna Nauka, 240 p. [in Ukrainian].
10. Horelyk, S. I., & Baranov, D. M. (2022). Vyznachennia obiemu poskodzhenoho gruntu silskohospodarskykh uhid vid viiskovykh dii za danyamy DZZ [Determination of the volume of damaged soil of agricultural lands from military operations using remote sensing data]. Podolannia ekolohichnykh ryzykiv ta zahroz dla dovkillia v umovakh nadzvychainykh sytuatsii : zbirnyk materialiv I Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Poltava: NUPP, 189–193. URL: <https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/conf/2022/i-mnpk-podolannia-eko-rizikiv/zbirnik-materialiv.pdf> [in Ukrainian].
11. Earth Engine data catalog: Sentinel-2. *website*. URL: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-2> (last accessed 08.04.2025).
12. Laktionova, T. M., Medvediev, V. V., Savchenko, K. V., Bihun, O. M., Sheiko, S. M., & Nakisko, S. H. (2010). *Struktura ta poriadok vykorystannia bazy danykh "Vlastyvosti gruntiv Ukrainy": instruktsiia* [Structure and operating procedure of the database "Soil Properties of Ukraine": an instruction]. Kharkiv : Apostrof, 96 p. [in Ukrainian].

Сухомлін Л.В. Інтеграція ГІС інституції у визначенні фізико-хімічного складу ґрунтового покриву

Мета. Обґрунтування та розробка методології дистанційного експрес-моніторингу фізико-хімічного стану ґрунтів сільськогосподарських угідь тимчасово окупованих степових територій в умовах мілітаріогенного навантаження.

Методи. Дослідження базується на безконтактному аудиті земель із використанням геоінформаційних (ГІС) платформ та хмарних обчислень у середовищі Google Earth Engine (GEE). Головним індикатором моделі є індекс відкритих ґрунтів (Barren Soil Index – BSI), розрахований за супутниковими знімками Sentinel-2. Проведено просторовий аналіз за вмістом органічної речовини, щільністю складання, кислотністю та рівнем зволоження ґрунтового покриву.

Результати. Встановлено, що на початок військового вторгнення базовий каркас родючості району залишався стабільним: 89,3% площ мали високий вміст гумусу (5–10%), а 68,5% території – нейтральну реакцію кислотності. Водночас зафіксовано локальні вогнища мілітаріогенної деградації. Виявлено штучне переуцільнення верхнього горизонту (понад 1,42 г/см³) на 31,3% угідь через рух важкої техніки. Визначено ознаки хронічного гідрологічного стресу та осушення орного шару на 8,2% площ, що пов'язано зі змінами кліматичних умов, відсутністю зрошення та руйнуванням

дамб водосховищ. Ознаки дегуміфікації зафіксовано на 10,3% польових масивів внаслідок випалювання стерні та винесення нижніх ілювіальних шарів ґрунту на поверхню в результаті вибухів.

Висновки. Розроблений алгоритм хмарного аналізу в GEE є ефективним інструментом для дистанційної фіксації динаміки змін ґрунтового покриву. Він задовольняє потреби аграріїв та оцінювачів у швидкому отриманні верифікованих геопросторових даних, виступаючи надійною основою для проведення повоєнного екологічного аудиту земель та розрахунку завданих мілітаріогенних збитків.

Ключові слова: фізико-хімічний склад ґрунту, Google Earth Engine, Barren Soil Index, ГІС-модель ґрунтового покриву, мілітаріогенна деградація.

Sukhomlin L.V. Integration of GIS institutions in determining the physicochemical composition of soil cover

Purpose. To substantiate and develop a methodology for remote express monitoring of the physicochemical state of agricultural soils in temporarily occupied steppe territories under conditions of military-induced (militariogenic) load.

Methods. The study is based on a contactless land audit using GIS platforms and cloud computing within the Google Earth Engine (GEE) environment. The primary indicator of the developed model is the Barren Soil Index (BSI), calculated from Sentinel-2 satellite imagery. A detailed spatial analysis was conducted using soil parameters such as organic matter content, bulk density, soil acidity, and moisture levels.

Results. The analysis revealed that at the beginning of the military invasion, the baseline fertility framework of the area remained relatively stable, with 89.3% of the fields featuring high humus content (5–10%) and 68.5% of the territory showing a neutral pH reaction. Concurrently, local hotbeds of militariogenic degradation were recorded. Artificial compaction of the upper soil horizon (exceeding 1.42 g/cm³) was identified on 31.3% of agricultural land due to heavy machinery movement. Signs of chronic hydrological stress and topsoil drying were detected on 8.2% of the areas, driven by changing climatic conditions, lack of irrigation systems, and the destruction of reservoir dams. Soil dehumification was observed on 10.3% of field massifs as a result of stubble burning and the displacement of lower illuvial soil layers to the surface caused by explosions.

Conclusions. The developed cloud-based algorithm in GEE serves as an effective tool for the remote detection of soil cover dynamics. It satisfies the urgent need of farmers and environmental evaluators for rapid acquisition of verified geospatial data, providing a solid foundation for post-war environmental land auditing and damage assessment.

Key words: soil physicochemical composition, Google Earth Engine, Barren Soil Index, GIS soil model, militariogenic degradation.

Дата першого надходження статті до видання: 23.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.08.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.09.2026