

ОЦІНКА ВПЛИВ СИДЕРАЦІЇ НА МІКРОРЕЛЬЄФНУ СТРУКТУРОВАНІСТЬ ҐРУНТУ МЕТОДОМ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ЗОБРАЖЕННЯ ТА ФОТОГРАММЕТРИЧНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ УМОВНОЇ КАРТИ ВИСОТ

ЦИЦЮРА Я.Г. – кандидат сільськогосподарських наук
orcid.org/0000-0002-9167-833X
Вінницький національний аграрний університет

Постановка проблеми. Інтенсифікація землеробства та тривале механічне навантаження спричиняють деградаційні зміни структурного стану ґрунтів, що проявляються у зміні розподілу агрегатів за розмірами, зниженні їх водостійкості, ущільненні ґрунтової маси та погіршенні водно-повітряного режиму. Структурно-агрегатний стан ґрунту є одним із ключових компонентів його функціональної якості, оскільки визначає умови інфільтрації, водоутримання, аерації, розвитку кореневої системи та стійкості до ерозійних процесів [1–3].

Разом із тим традиційні методи оцінювання структурно-агрегатного стану, засновані переважно на сухому та мокрому просіюванні, характеризують насамперед кількісний розподіл агрегатних фракцій і їх водостійкість, але мають обмежені можливості щодо кількісного опису просторової геометрії та мікрорельєфу ґрунтової поверхні [8]. У зв'язку з цим актуальним є розвиток цифрових методів оцінювання структурованості ґрунту на основі аналізу зображень, фотограмметричної реконструкції та тривимірного моделювання поверхні [9–12].

Одним із перспективних агротехнологічних засобів відновлення структурного стану ґрунту є систематична сидерація. Покривні культури та зелені добрива сприяють накопиченню органічної речовини, активізації ґрунтової біоти та формуванню стійких структурних агрегатів. Узагальнені результати багаторічних досліджень свідчать про позитивний вплив покривних культур на середньозважений діаметр агрегатів, водостійкість і розподіл органічного вуглецю в агрегатних фракціях [4–6]. Особливе значення має використання хрестоцвітних культур, зокрема редьки олійної, яка формує значну надземну та кореневу біомасу і характеризується специфічною динамікою мінералізації рослинних решток [7].

Застосування Structure-from-Motion фотограмметрії дозволяє отримувати цифрові моделі висот поверхні ґрунту з міліметровою просторовою деталізацією та визначати показники її шорсткості, просторової неоднорідності й мікротопографічної організації. Водночас сучасні дослідження переважно зосереджені або на оцінюванні ерозійних процесів і шорсткості поверхні, або на визначенні агрегатного складу та стабільності ґрунту, тоді як питання довготривалого впливу систематичної сидерації редькою олійною на просторово-морфометричні характеристики поверхні ґрунту залишається недостатньо дослідженим [10–13].

Отже, існує необхідність поєднання традиційної оцінки структурно-агрегатного стану ґрунту з цифровою простою характеристикою його поверхні. Такий підхід може забезпечити додаткову інформацію щодо формування мікрорельєфу, неоднорідності висот, шорсткості та просторової організації агрегатів під впливом систематичного використання редьки олійної як сидеральної культури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження підтверджують, що вплив покривних культур на структуру ґрунту має не лише кількісний, але й просторовий характер. Встановлено [6], що використання покривних культур сприяло збільшенню середньозваженого діаметра водостійких агрегатів на 10–19 % порівняно з паром, а суміші покривних культур мали дещо більший позитивний ефект, ніж одновидові посіви. Автори також підкреслюють, що поліпшення структурного стану пов'язане з накопиченням органічного вуглецю у макроагрегатах.

У трирічному польовому досліді досліджували вплив покривних культур, зокрема редьки дайкон, жита та їх суміші, на стабільність агрегатів. Було показано, що покривні культури змінювали розподіл агрегатів і підвищували окремі показники їх стабільності. При цьому важливими факторами варіації структурного стану виявилися щільність ґрунту та pH [4].

Цілий ряд вчених [1, 6–9] оцінювали просторову неоднорідність мікроструктури верхнього шару ґрунту за різних систем покривних культур, включаючи олійну редьку та її суміш із житом. Для цього автори застосували 3D-аналіз просторової структури, зокрема семіваріограмний підхід. Встановлено, що вибір покривної культури впливав на показники структури ґрунту навіть через 6–12 місяців після припинення їх вирощування.

Разом із тим, традиційне визначення структурно-агрегатного стану ґрунту базується переважно на сухому та мокрому просіюванні, визначенні частки агрегатів різного розміру, середньозваженого діаметра (MWD), водостійкості та похідних індексів. Однак такі методи не завжди дозволяють описати просторову геометрію поверхні агрегатів та технологічний мікрорельєф поверхні ґрунту після різних застосованих технологічних операцій [3]. Визначено [2, 12], що оцінка стабільності лише однієї агрегатної фракції може бути недостатньою для характеристики всього ґрунту, оскільки стабільність істотно залежить від розміру агрегатів. Саме тому було запропоновано



інтегрований показник MWAS, який враховує кількість і стабільність усіх агрегатних фракцій [2].

Паралельно розвиваються цифрові методи аналізу зображень. Запропоновано [8] метод оцінювання розподілу агрегатів за розміром на основі pattern spectra, показавши можливість переходу від суб'єктивної візуальної оцінки до автоматизованого кількісного аналізу цифрових зображень. Ще раніше продемонстровано [3, 13] можливість використання фотограмметрії для визначення об'єму та щільності окремих ґрунтових агрегатів розміром 1–8 мм. При цьому об'єми, отримані фотограмметричним методом, дуже добре узгоджувалися з референтним методом Архімеда ($R^2 > 0.99$). Одним із найбільш перспективних напрямів на сьогодні є використання методу Structure-from-Motion (SfM) для реконструкції поверхні ґрунту. Визначено [12] при порівнянні наземного лазерного сканування та SfM-фотограмметрії доцільність та ефективність даних методів для визначення тривимірної шорсткості поверхні сільськогосподарських ґрунтів. Автори показали, що обидві технології здатні забезпечувати 3D-інформацію про поверхню ґрунту та використовуватися для кількісної характеристики шорсткості, хоча SfM дещо втрачає частину високочастотної інформації про мікрорельєф.

На сьогодні успішно продемонстровано [6] можливість застосування SfM для міліметрового картування мікротопографії ґрунту за допомогою звичайних цифрових камер і доступного програмного забезпечення з поетапним отриманням 3D-моделі поверхні, цифрових моделей висот і карти змін мікрорельєфу після опадів.

Визначено також [11], що високороздільні 3D-зображення поверхні ґрунту можуть використовуватися для оцінки розподілу агрегатів за розмірами, а отримання умовних параметрів гранулометрії ґрунтової поверхні на підставі карти мікрорельєфу, що у підсумку дозволило розрізняти структурні відмінності між обробленою та необробленою поверхнею.

Таким чином, сучасні дослідження створюють достатню методичну основу для застосування цифрової фотограмметрії не тільки для оцінювання об'єму окремих агрегатів, але й для характеристики просторової структури поверхні ґрунту.

Мета. Оцінка впливу систематичного застосування редьки олійної як сидеральної культури на просторово-морфометричні характеристики поверхні ґрунту із використанням спрощеної наземної фотограмметричної реконструкції та цифрового аналізу мікрорельєфу на підставі 2D зображень відповідних варіантів сидерації.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження виконували упродовж 2014–2025 рр. на експериментальному полі Вінницького національного аграрного університету (49°11'31" N, 28°22'16" E). Ґрунтовий покрив дослідної ділянки представлений сірим лісовим ґрунтом із гранулометричним складом, що відповідає важкосуглинковій категорії.

На початку експерименту, у шарі ґрунту 0–30 см, основні показники його родючості характеризувалися такими значеннями: вміст гумусу – 2,68 %, гідролізованого азоту – 81,5 мг/кг, рухомого фосфору – 176,1 мг/кг,

обмінного калію – 110,8 мг/кг, а реакція ґрунтового розчину, визначена у KCl, становила pH 5,8.

Дослід передбачав порівняння двох систем утримання ґрунту: контрольної, без застосування сидеральної культури, та варіанта із систематичним використанням олійної редьки (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis*) як сидерату. З метою мінімізації можливих фітотоксичних ефектів, пов'язаних із тривалим і повторним використанням хрестоцвітих сидеральних культур, варіанти чергували на тих самих дослідних ділянках з інтервалом у два роки відповідно до підходу, описаного [6]. Обидві системи функціонували в межах сівозміни, у якій інші культури родини Brassicaceae не використовували. Загальна схема досліду представлена у табл. 1

Місця відбору ґрунтових зразків залишалися просто-риво фіксованими протягом усього періоду досліджень. Мінеральні добрива на дослідних ділянках не застосовували. Відбір зразків і визначення досліджуваних показників проводили у три ключові строки: на початку досліду (2014 р.), у середині експериментального періоду (2019 р.) та на його завершальному етапі (2025 р.). У кожному випадку ґрунтові зразки відбирали навесні, до введення сіви відповідної культури.

Дослід був закладений у чотирикратній повторності, площа кожної облікової ділянки становила 25 м². Як сидеральну культуру використовували сорт олійної редьки Журавка.

Сівбу проводили з нормою 2,5 млн схожих насінин/га за ширини міжрядь 15 см. Олійну редьку висівали безпосередньо після збирання попередньої культури. Перед сівбою виконували проміжний комбінований обробіток ґрунту, що включав плоскорізний обробіток, роторне розпушування та вирівнювання поверхні, на глибину 12–16 см.

Заробляння сидеральної маси здійснювали у фазі цвітіння олійної редьки – BBCH 64–67, яку вважали оптимальною для використання культури як сидерату. Залежно від погодних умов ця фаза, як правило, припадала на другу–третю декаду жовтня. Перед зароблянням рослину масу скошували та подрібнювали, після чого її щорічно заробляли у ґрунт важкими дисковими боронами на глибину 14–16 см.

Глибина основного обробітку ґрунту в періоди, коли сидеральну культуру не використовували, визначалася біологічними та технологічними особливостями відповідної культури сівозміни. У середньому вона становила 22,55 ± 6,31 см (SD).

Фотографування поверхні ґрунту впродовж тривалості досліду у різних його варіантах здійснювали за допомогою дзеркальної фотокамери Canon EOS 750D Kit 18–135 mm IS STM із додатковим макрооб'єктивом Canon EF 100 mm f/2.8 Macro, оснащеним UV-фільтром. Зйомку проводили в ортогональній проєкції до поверхні ґрунту з використанням стандартної масштабної лінійки та за умов штучного затінення відповідно до методики отримання морфометричних зображень ґрунтової поверхні, описаної Xingming et al. [19].

Сформовані фотографічні зображення за регульованого рівномірного розсіяного освітлення оброблялись у фреймі програм ImageJ (v. 1.52u, реліз 2020 року) та FijiImageJ2 (реліз 2024 року).

Таблиця 1

Загальна схема досліду, 2014–2025 рр. (4А × 3В × 4 повторення (N=60))

Агротехнологічне управління ґрунтом (фактор А)	Зміст технологічного заходу за фактором А (агротехнологічне управління ґрунтом)
Абсолютний контроль (початкові параметри ґрунту)	Облік у 2014 р.: вихідні дані щодо досліджуваних параметрів ґрунту на початку досліду, до початку сидерації.
Контроль I (5 років сівозміни без сидерації та добрив)	Облік у 2019 р.: визначення досліджуваних параметрів ґрунту після сівозміни на ділянці без застосування проміжної сидерації редькою олійною (<i>Raphanus sativus</i> L. var. <i>oleiformis</i> Pers.): сорго зернове (<i>Sorghum bicolor</i> L.) (2014*) – ячмінь ярий (<i>Hordeum vulgare</i> L.) (2015) – горох (<i>Pisum sativum</i> L.) (2016) – ячмінь ярий (<i>Hordeum vulgare</i> L.) (2017) – соя (<i>Glycine max</i> (L.) Merrill) (2018).
Застосування сидерату I (5 років сівозміни з триразовою сидерацією)	Облік у 2019 р.: визначення досліджуваних параметрів ґрунту із застосуванням проміжної сидерації редькою олійною (<i>Raphanus sativus</i> L. var. <i>oleiformis</i> Pers.) під такі культури у схемі сівозміни на ділянці: сорго зернове (<i>Sorghum bicolor</i> L.) (2014) – горох (<i>Pisum sativum</i> L.) (2016) – соя (<i>Glycine max</i> (L.) Merrill) (2018).
Контроль II (11 років сівозміни без сидерації та добрив)	Облік у 2025 р. (на етапі фізичної стиглості ґрунту перед сівою відповідної культури сівозміни): визначення досліджуваних параметрів ґрунту після сівозміни на ділянці без застосування проміжної сидерації редькою олійною (<i>Raphanus sativus</i> L. var. <i>oleiformis</i> Pers.): пшениця яра (<i>Triticum vulgare</i> Host.) (2019) – соняшник (<i>Helianthus annuus</i> L.) (2020) – горох озимий (<i>Pisum sativum</i> L. (s. <i>amplissima</i>) Gov.) (2021) – нут (<i>Cicer arietinum</i> L.) (2022) – ячмінь ярий (<i>Hordeum vulgare</i> L.) (2023) – кукурудза (<i>Zea mays</i> L.) (2024).
Застосування сидерату II (11 років сівозміни із шестиразовою сидерацією)	Облік у 2025 р. (на етапі фізичної стиглості ґрунту перед сівою відповідної культури сівозміни): визначення досліджуваних параметрів ґрунту із застосуванням проміжної сидерації редькою олійною (<i>Raphanus sativus</i> L. var. <i>oleiformis</i> Pers.) у схемі сівозміни на ділянці: соняшник (<i>Helianthus annuus</i> L.) (2020) – нут (<i>Cicer arietinum</i> L.) (2022) – кукурудза (<i>Zea mays</i> L.)

Примітка: * – надалі рік вирощування зазначено в дужках. Строки сіви сільськогосподарських культур відповідали таким періодам: для ранніх ярих культур (ячмінь ярий, пшениця яра, горох, нут) – друга декада квітня; для пізніх ярих культур (соя, соняшник, кукурудза) – третя декада квітня – перша декада травня; для озимих культур (горох озимий) – друга декада вересня.

Обробка цифрових зображень поверхні ґрунту зроблених на типових ділянках варіантів досліду проводилась відповідно до рекомендованих і адаптованих методик фрейму програм ImageJ та FijiImageJ2 [14, 16] за принциповою методологічною схемою представленою на рис. 1.

Був застосований спосіб спрощеної фотограмметричної обробки зображень за рахунок формування псевдокарти висот зображення. Для цього зображення трансформувались у матрицю (рівняння 1) з корекцією освітленості та різкості зображення:

$$Z(x,y) = f(I(x,y)) \quad (1)$$

де: $I(x,y)$ – інтенсивність пікселя, а Z – умовна висота.

У стандартному варіанті: біле → умовно вища поверхня; чорне → умовно нижча поверхня; сіре → проміжна висота.

Етапність загальної схеми трансформації зображень: фото → grayscale → correction of illumination → height map → displacement → 3D mesh → накладання оригінальної текстури → освітлення → 3D soil aggregate surface.

На завершальному етапі обробки 2D зображення типової ділянки поверхні ґрунту відповідного варіанту досліду (рис. 1, позиції «3D візуалізація» та «Бічний вигляд») було застосовано визначення таких показників в умовних одиницях (у.о.): як: середня висота мікрорельєфу (H_{mean}), стандартне відхилення висот у площині зображення (SD_H), шорсткість поверхні (R_a , рівняння 2), середньоквадратична шорсткість поверхні (R_q , рівняння 3).

$$R_a = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |Z_i - Z_{mean}| \quad (2)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |Z_i - Z_{mean}|^2} \quad (3)$$

де: Z_i – умовна рельєфна висота кожного ґрунтового агрегату, у.о.; Z_{mean} – середня висота ґрунтових агрегатів в аналізованій площині зображення, у.о.; N – загальна кількість проаналізованих ґрунтових агрегатів, шт.

Додатково у фреймі застосованих програм для обробки зображень було використано показник амплітуди рельєфу (H_{95-5}), який визначався як елемент геоморфометрії цифрових моделей рельєфу (ЦМР) та розраховувався як різниця між 95-м і 5-м перцентилями висот (H) у межах заданої віконної області зображення. Даний показник є вираженням амплітуди рельєфу та відсікає надзвичайно високі та низькі поодинокі викиди мікрорельєфу, які можуть спотворювати класичний розмах висот ($H_{max} - H_{min}$). Він характеризує реальну ефективну амплітуду висот, що охоплює 90% центрального розподілу висот поверхні. У обробці зображень для його калькуляції на трансформованому у сірий бітний фон зображенні зхдавався розмір вікна аналізу (у пікселях зображення на основі умовного цитування площини зображення (DEM). Усі значення висот пікселів усереднені цього вікна ранжувались в порядку зростання: ($h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$). Визначається висота, нижче якої лежить 95%

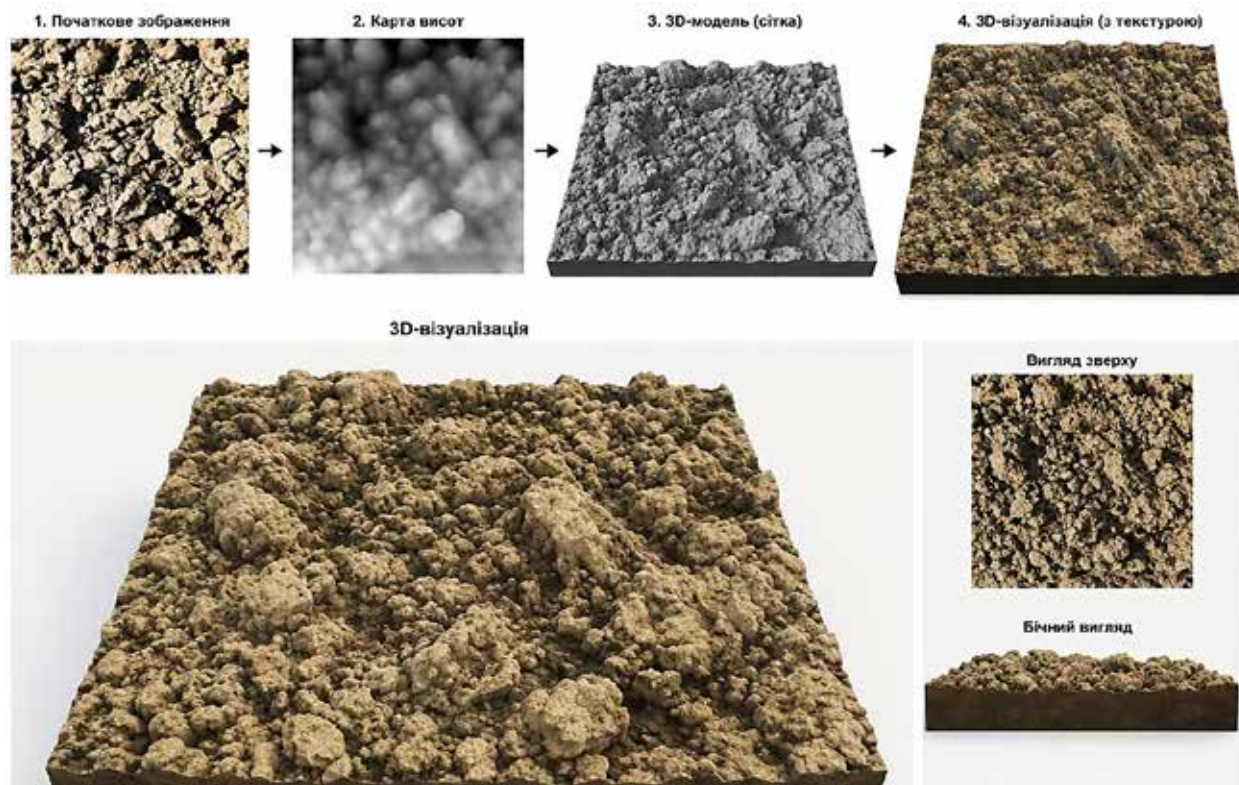


Рис. 1. Загальна методологія трансформації і візуалізації цифрових зображень ґрунту у різних варіантах його сидерального утримання, 2025 р.

усіх значень висот (H_{95}) а потім висота, нижче якої лежить 5% усіх значень висот (H_5). Показник розраховувався як амплітуда H_{95-5} (рівняння 4):

$$H_{95-5} = H_{95} - H_5 \quad (4)$$

Для статистичної обробки результатів було застосовано базові показники варіаційної статистики визначали за загальноприйнятим алгоритмом розрахунку, наведеним у працях Stoyan & Unland [15] та Wong [16]. Статистичну обробку експериментальних даних виконували за допомогою програмного забезпечення Statistica 10 (StatSoft – Dell Software Company, США).

Результати досліджень. Результати фотографічного моніторингу мікрорельєфу дослідних ділянок за застосованих варіантів сидерації у досліді представлено на рис. 2.

Результати умовновисотної фотограмметричної обробки цифрових типових зображень варіантів сидерального утримання ґрунту за весь період досліду у розрізі ключових етапів обліку (2014, 2019 та 2025 рр.) відповідно до описаної вище методики представлено на рис. 3.

За результатами супутнього опрацювання отриманого блоку інверсивних знімків було визначено базові параметри оцінки мікрорельєфу ґрунту залежно від застосованої тривалості сидерального утримання ґрунту (табл. 2).

Фотограмметричний аналіз мікрорельєфу поверхні ґрунту показав чітку диференціацію його висотної організації залежно від тривалості та систематичності сидерального використання редьки олійної.

Комплексна оцінка за показниками середньої висоти поверхні (H_{mean}), стандартного відхилення висот (SD_H), середнього абсолютного відхилення (R_a), середньоквадратичної шорсткості (R_q) та діапазону висот між 95-м і 5-м перцентилями (H_{95-5}) дозволяє розглядати мікрорельєф не лише як геометричну характеристику поверхні, а як інтегральний результат багаторічної взаємодії обробітку, опадів, структуроутворення ґрунту та надходження органічної речовини.

В абсолютному контролі (варіант а) значення можна розглядати як вихідний морфометричний фон, відносно якого оцінювали подальші зміни мікрорельєфу. При цьому SD_H і R_q мали однакове значення, що свідчить про використання взаємопов'язаних характеристик дисперсії висотної структури поверхні. H_{95-5} характеризує ширину основного діапазону висотних варіацій і тому є особливо інформативним для оцінки загальної неоднорідності поверхні. Методично це відповідає сучасному розумінню ґрунтової шорсткості як багатомасштабної характеристики, яка включає мікрорельєф, випадкову та орієнтовану шорсткість [4, 9].

Порівняння варіантів а і б демонструє, що навіть без систематичного надходження сидеральної маси за п'ятирічний період відбулася помітна перебудова поверхні ґрунту. H_{mean} зменшився на 5,4%. Одночасно SD_H збільшився на 23,9%, R_a – на 24,3%, а R_q на +20,9%. Найбільше збільшення зафіксовано для H_{95-5} – на 25,4%. Отже, контрольна поверхня у 2019 р. характеризувалася нижчим середнім положенням висотного профілю, але

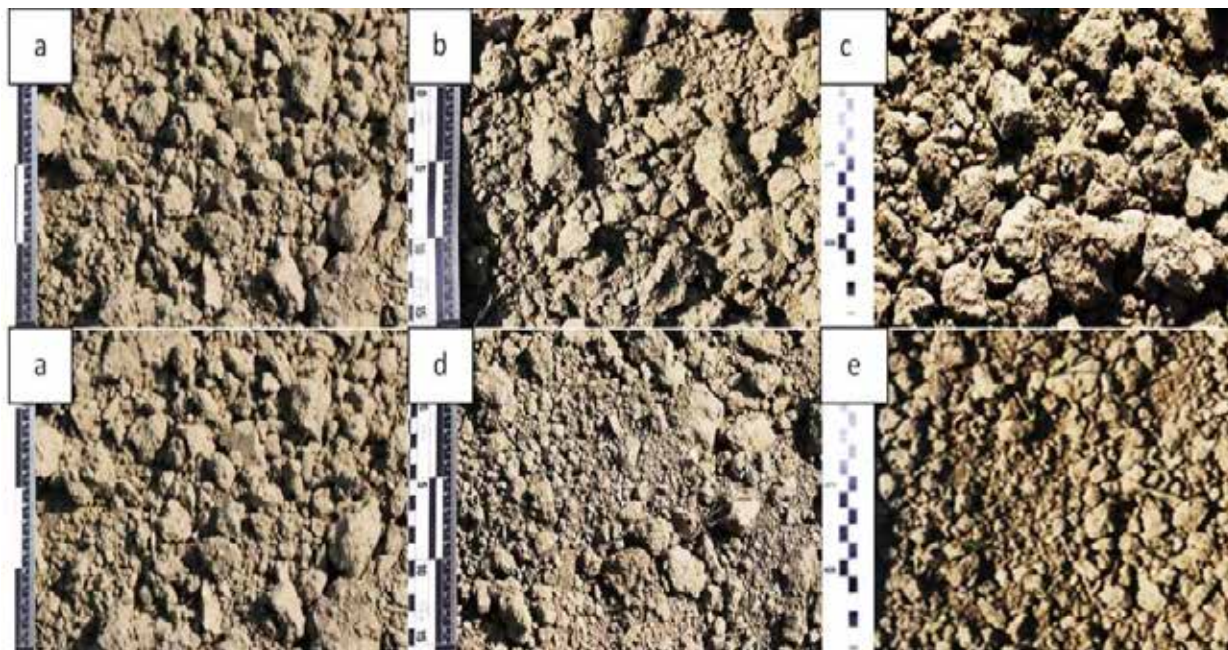


Рис. 2. Стан поверхні ґрунту на третю добу після ранньовесняного дискування на глибину 10–12 см залежно від варіантів дослідів, 2014–2025 рр.

Примітка: а – абсолютний контроль (2014); б – контроль I (2019); с – застосування сидерату I (2019); д – контроль II (2025); е – застосування сидерату II (2025).

більшою варіабельністю висот. Це важливий результат: зниження H_{mean} не означало вирівнювання поверхні. Навпаки, збільшення SD_H , R_a , R_q та H_{95-5} свідчить про формування більш контрастного мікрорельєфу. Дану тенденцію можна пояснити інтенсифікацією процесів деградації ґрунту зумовлену відсутністю органічного компонента удобрення, повної відсутності мінеральних добрив, що веде як до агрохімічних процесів зінтенсивного зниження балансів основних елементів живлення, так і до інтенсифікації дегуміфікації ґрунтового профілю. У підсумку це знижує агрегатуючий ефект ґрунтової органіки, його водостійкість та загальне зниження структурованості з утворенням дрібнобрилих та виражених брилих фракцій. Такі висновки підтверджено і в ряді інших досліджень [3, 7, 10, 12, 15, 20]. Подібну закономірність можна пов'язати також і з процесами природної трансформації поверхні ґрунту під дією атмосферних опадів, циклів зволоження–висушування та механічного руйнування агрегатів [8, 12, 18].

Особливо показовим є порівняння б – контроль I та с – сидерат I, де оцінювали поверхню ґрунту у 2019 р. після систематичного внесення сидеральної маси редьки олійної у 2014, 2016 та 2018 рр. За сидерації H_{mean} зріс 4,3% більше, ніж на відповідному контролі б. Водночас SD_H і R_q залишилися на рівні 0,223, а R_a зменшився на 1,1% на фоні збільшення показника H_{95-5} на 3,0%. На підставі такої динаміки можна стверджувати, що перший етап систематичної сидерації не спричинив різкого зниження шорсткості поверхні. Навпаки, спостерігалось певне відновлення середньої висоти поверхні при практично незмінній дисперсії висот.

Це можна інтерпретувати як початковий етап стабілізації просторової структури поверхні ґрунту. Регулярне

надходження органічної маси редьки олійної могло сприяти підтриманню агрегатної організації поверхневого шару, тоді як коренева система формувала додаткові механічні та біологічні канали просторової перебудови ґрунту, що підтверджується і в інших дослідженнях [2, 4, 7, 10].

Ще більш інформативним є порівняння а → д, тобто вихідного стану 2014 р. та контрольного варіанта 2025 р. На контрольному варіанті H_{mean} зріс на +2,3%. При цьому SD_H знизився, але залишався на 14,4% вище вихідного рівня. R_a зріс на 11,8%, R_q на 14,4%, а показник H_{95-5} зріс у співставленні до абсолютного контролю (2014 рік) на 32,5%. Таким чином, за 11-річний період без сидерації сформувалася поверхня з істотно ширшим діапазоном висот, незважаючи на відносно невелику зміну середньої висоти. Особливо показовим є значення параметра H_{95-5} . Його зростання на третину (відповідно до [12]) свідчить про посилення висотної неоднорідності поверхні. Тобто довготривалий контрольний варіант характеризувався не просто зміною середньої висоти, а розширенням амплітуди мікрорельєфу.

Це узгоджується із сучасними уявленнями про те, що поверхнева шорсткість ґрунту є результатом одночасної дії механічних, гідрологічних та агротехнологічних чинників. Вона безпосередньо пов'язана з інфільтрацією, поверхневим стоком, ерозією та накопиченням води у мікродепресіях [20].

Найбільш переконлива закономірність виявлена при порівнянні д – контроль II та е – систематична сидерація II (моніторинг 2025 року після 6 циклів систематичної сидерації). За систематичного застосування сидерації H_{mean} зменшився на 15,0% відносно відповідного контролю. Одночасно встановлено такі тенденції у зміні

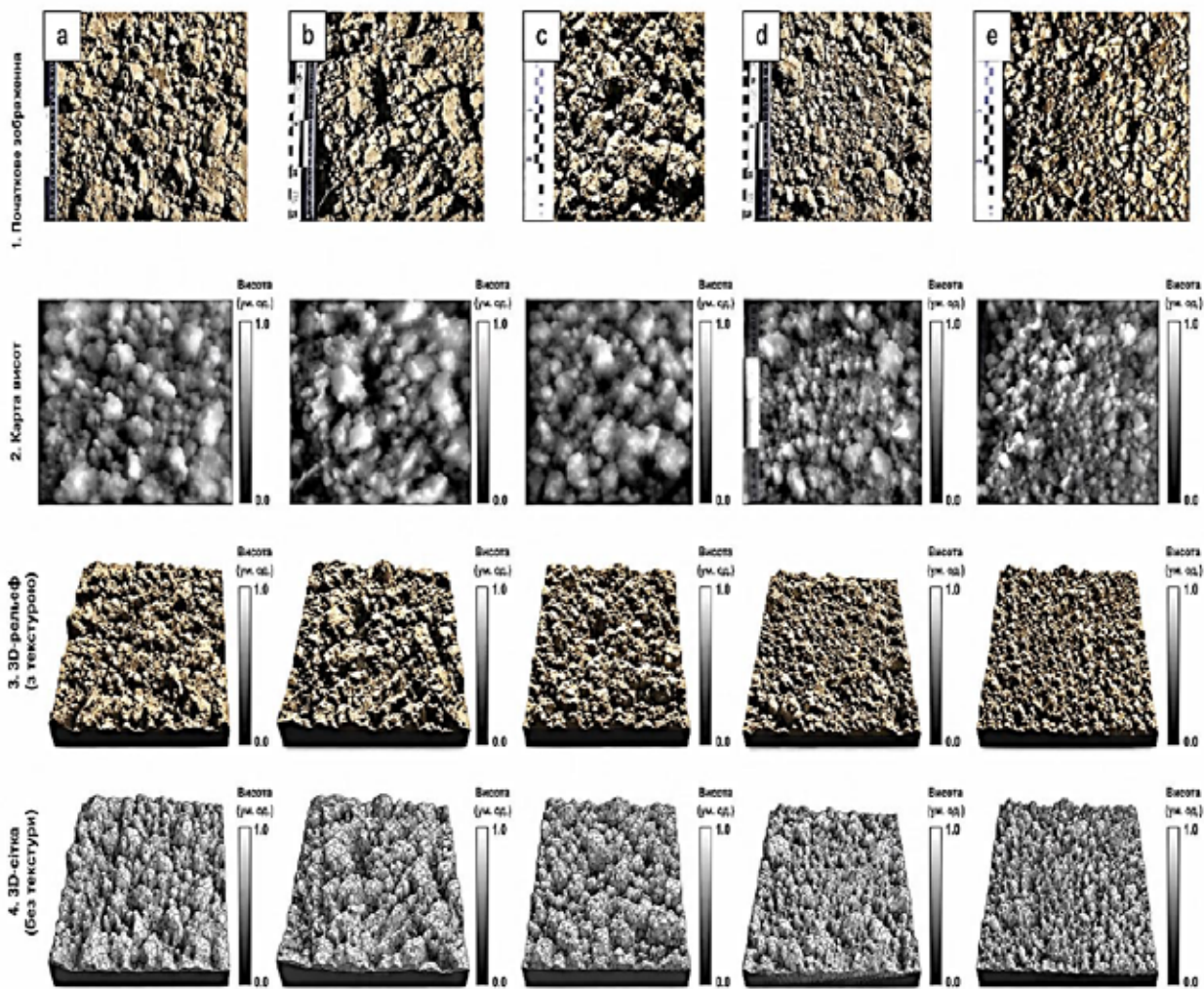


Рис. 3. Результати фотограмметричної обробки 2D цифрових зображень ґрунтової поверхні дослідних варіантів за базовим принципом умовної карти висот зображення, 2026 р.

Примітка: карти висот отримано з 8-бітних трансформованих зображень після світлової корекції освітлення (білий колір – вища висота, чорний – нижча).

Таблиця 2

Основні параметри аналізу мікрорельєфу поверхні дослідних ділянок за фотограмметричним підходом залежно від варіантів сидерального утримання ґрунту, 2014–2025

Варіант досліджу*	H_{mean} , ум. од.	SD_H , ум. од.	R_a , ум. од.	R_q , ум. од.	H_{95-5}
a – абсолютний контроль без сидерації (вихідні параметри 2014 р.)	0,442	0,180	0,144	0,180	0,607
b – контроль I (без сидерації) (оцінка параметрів у 2019 році)	0,418	0,223	0,179	0,223	0,761
c – застосування сидерату I (оцінка параметрів у 2019 році) (сидерція у 2014, 2016 та 2018 роках)	0,436	0,223	0,177	0,223	0,784
d – контроль II (без сидерації) (оцінка параметрів у 2025 році)	0,452	0,206	0,161	0,206	0,804
e – застосування сидерату II (оцінка параметрів у 2025 році) (сидерція у 2014, 2016, 2018, 2020, 2022 та 2024 роках)	0,384	0,167	0,131	0,167	0,548

Примітка. * – буквенна індексація варіантів відповідає їх індикації на рис. 2

показників: SD_H -18,9%; R_a -18,6%; R_q -18,9%; H_{95-5} -31,8%. Слід зауважити, що саме показник H_{95-5} продемонстрував найбільш масштабну відповідь на систематичну сидерацію. Його зниження майже на 32% свідчить про істотне скорочення діапазону висотних варіацій поверхні. Цей

результат є принципово важливішим, ніж просте зменшення показників R_a або R_q . Такі результати підтверджують висновок, що багаторічна систематична сидерація редькою олійною сприяла формуванню більш однорідної поверхні ґрунту з меншою амплітудою мікрорельєфу та

кращою структурованістю з позиції розміру та розміщення ґрунтових агрегатів.

Отримані результати вказують на ще одну встановлену тенденцію: ефект сидерації має кумулятивний характер. Три варіанти сидерації до 2019 р. вже змінювали морфометричну організацію поверхні, однак найбільш виражена перебудова проявилася після шести циклів сидерації до 2025 р.

Така інтерпретація узгоджується з дослідженнями довготривалого впливу систем управління ґрунтом, у яких показано, що різні системи землекористування можуть змінювати поверхневу шорсткість не тільки безпосередньо через обробіток, а й опосередковано через зміни властивостей ґрунту та його консолідації [4, 5, 7, 8, 9]. За визначених умов, зменшення параметрів висотної варіабельності поверхні може свідчити про формування більш вирівняної та просторово однорідної мікрорельєфної структури ґрунту під впливом систематичної сидерації.

Висновки. Застосування спрощеного фотограмметричного підходу дозволило встановити чітку диференціацію параметрів мікрорельєфу ґрунтової поверхні залежно від систематичності сидерації редькою олійною. За відсутності систематичного надходження сидеральної біомаси протягом 2014–2025 рр. відбулося поступове збільшення вертикальної неоднорідності поверхні: порівняно з вихідним станом SD_H , R_a та R_q зросли відповідно на 14,4, 11,8 та 14,4%, тоді як діапазон висот H_{95-5} збільшився на 32,4%. Найбільш виражена трансформація мікрорельєфу встановлена за систематичної сидерації у 2025 р., коли порівняно з відповідним контролем SD_H , R_a та R_q зменшилися на 18,6–18,9%, а H_{95-5} – на 31,8%. При цьому значення H_{95-5} за систематичної сидерації було на 9,7% нижчим навіть за вихідний рівень 2014 р. Отримані результати свідчать, що довготривала систематична сидерація сприяє стабілізації мікрорельєфу ґрунтової поверхні та зменшенню амплітуди її вертикальної неоднорідності. Найбільш чутливим індикатором довготривалої трансформації поверхні виявився показник H_{95-5} , що може бути рекомендований як один із інтегральних морфометричних критеріїв оцінювання стабілізаційного ефекту сидеральних технологій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- Adetunji A. T., Ncube B., Mulidzi R. A., Lewu F. B. Management impact and benefit of cover crops on soil quality: a review. *Soil & Tillage Research*. 2020. Vol. 204. Art. 104717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104717>.
- Aksakal E. L., Angin I., Sari S. A new approach for calculating aggregate stability: Mean Weight Aggregate Stability (MWAS). *Catena*. 2020. Vol. 194. Art. 104708. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104708>.
- Bosilj P., Gould I., Duckett T., Cielniak G. Estimating soil aggregate size distribution from images using pattern spectra. *Biosystems Engineering*. 2020. Vol. 198. P. 63–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.07.012>.
- Dai W., Feng G., Huang Y., Adeli A., Jenkins J. N. Influence of cover crops on soil aggregate stability, size distribution and related factors in a no-till field. *Soil & Tillage Research*. 2024. Vol. 244. Art. 106197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106197>.
- Duff J., van Sprang C., O'Halloran J., Hall Z. Guide to Brassica Biofumigant Cover Crops Managing soilborne diseases in vegetable production systems. Horticulture Innovation through VG16068. State of Queensland, 2020. 46 p.
- Ehrhardt A., Deumlich D., Gerke H. H. Soil surface microtopography by Structure-from-Motion photogrammetry for monitoring density and erosion dynamics. *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 9. Art. 737702. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.737702>.
- Gentsch N., Riechers F. L., Boy J., Schweneker D., Feuerstein U., Heuermann D., Guggenberger G. Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. *SOIL*. 2024. Vol. 10, № 1. P. 139–150. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-10-139-2024>.
- Halder M., Liu S., Zhang Z. B., Guo Z. C., Peng X. H. Effects of residue stoichiometric, biochemical and C functional features on soil aggregation during decomposition of eleven organic residues. *Catena*. 2021. Vol. 202. Art. 105288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105288>.
- Hojati S., Heck R. J., Van Eerd L. L. Quantifying the spatial heterogeneity of topsoil microstructure in a horticultural cover cropping system from Southwestern Ontario, Canada. *Geoderma Regional*. 2024. Vol. 37. Art. e00789. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00789>.
- Hu T., Olesen J. E., Christensen B. T., Sørensen P. Release of carbon and nitrogen from fodder radish (*Raphanus sativus*) shoots and roots incubated in soils with different management history. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*. 2018. Vol. 68, № 8. P. 749–756. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064710.2018.1480730>.
- Jensen T., Green O., Munkholm L. J., Karstoft H. Fourier and granulometry methods on 3D images of soil surfaces for evaluating soil aggregate size distribution. *Transactions of the ASABE*. 2016. Vol. 32. P. 609–615. DOI: <https://doi.org/10.13031/aea.32.10938>.
- Martinez-Agirre A., Álvarez-Mozos J., Milenković M., Pfeifer N., Giménez R., Valle J. M., Rodríguez Á. Evaluation of Terrestrial Laser Scanner and Structure from Motion photogrammetry techniques for quantifying soil surface roughness parameters over agricultural soils. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2020. Vol. 45, № 3. P. 605–621. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.4758>.
- Moret-Fernández D., Latorre B., Peña C., González-Cebollada C., López M. V. Applicability of the photogrammetry technique to determine the volume and the bulk density of small soil aggregates. *Soil Research*. 2016. Vol. 54, № 3. P. 354–359. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR15163>.
- Passoni S., Borges F.D.S., Pires L.F., Saab S.D.C., Cooper M. Software Image J to study soil pore distribution. *Ciência e Agrotecnologia*. 2014. Vol. 38. P. 122–128. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200003>.
- Rocco S., Munkholm L. J., Jensen J. L. Long-term soil quality and C stock effects of tillage and cover cropping in a conservation agriculture system. *Soil & Tillage Research*. 2024. Vol. 241. Art. 106129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106129>.
- Stoyan D., Unland G. Point process statistics improves particle size analysis. *Granular Matter*. 2022. Vol. 24.

115. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-022-01278-8>
17. Tsytsiura Y.H. Selection of effective software for the analysis of the fractional composition of the chaotic seed layer using the example of oilseed radish. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*. 2021. Vol. 41. №2. P. 161–170. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v41n2p161-170/2021>
18. Wong J Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications (Second Edition). Academic Press. 2018. 818 p.
19. Xingming Z., Lei L., Chunmei W., Leran H., Tao J., Xiaojie L., Zhuangzhuang F. Measuring surface roughness of agricultural soils: Measurement error evaluation and random components separation. *Geoderma*. 2021. Vol. 404. 115393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115393>
20. Tobiszewski M., Vakh C. Analytical applications of smartphones for agricultural soil analysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2023. Vol. 415. P. 3703–3715. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00216-023-04558-1>
- REFERENCES:**
- Adetunji A. T., Ncube B., Mulidzi R. A., Lewu F. B. (2020). Management impact and benefit of cover crops on soil quality: a review. *Soil & Tillage Research*. 2020. Vol. 204. Art. 104717.
 - Aksakal E. L., Angin I., Sari S. (2020). A new approach for calculating aggregate stability: Mean Weight Aggregate Stability (MWAS). *Catena*. 2020. Vol. 194. Art. 104708.
 - Bosilj P., Gould I., Duckett T., Cielniak G. (2020). Estimating soil aggregate size distribution from images using pattern spectra. *Biosystems Engineering*. 198, 63–77.
 - Dai W., Feng G., Huang Y., Adeli A., Jenkins J. N. (2024). Influence of cover crops on soil aggregate stability, size distribution and related factors in a no-till field. *Soil & Tillage Research*. 244, 106197.
 - Duff J., van Sprang C., O'Halloran J., Hall Z. (2020). *Guide to Brassica Biofumigant Cover Crops Managing soilborne diseases in vegetable production systems*. Horticulture Innovation through VG16068. State of Queensland
 - Ehrhardt A., Deumlich D., Gerke H. H. (2022). Soil surface micro-topography by Structure-from-Motion photogrammetry for monitoring density and erosion dynamics. *Frontiers in Environmental Science*. 9, 737702.
 - Gentsch N., Riechers F. L., Boy J., Schweneker D., Feuerstein U., Heuermann, D., Guggenberger G. (2024). Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. *SOIL*. 10, 1, 139–150.
 - Halder M., Liu S., Zhang Z. B., Guo Z. C., Peng X. H. (2021). Effects of residue stoichiometric, biochemical and C functional features on soil aggregation during decomposition of eleven organic residues. *Catena*. 202, 105288.
 - Hojati S., Heck R. J., Van Eerd L. L. (2024). Quantifying the spatial heterogeneity of topsoil microstructure in a horticultural cover cropping system from Southwestern Ontario, Canada. *Geoderma Regional*. 37, e00789.
 - Hu T., Olesen J. E., Christensen B. T., Sørensen P. (2018). Release of carbon and nitrogen from fodder radish (*Raphanus sativus*) shoots and roots incubated in soils with different management history. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*. 68, 8, 749–756.
 - Jensen T., Green O., Munkholm L. J., Karstoft H. (2016). Fourier and granulometry methods on 3D images of soil surfaces for evaluating soil aggregate size distribution. *Transactions of the ASABE*. 32, 609–615.
 - Martinez-Agirre A., Álvarez-Mozos J., Milenković M., Pfeifer N., Giménez R., Valle J. M., Rodríguez Á. (2020). Evaluation of Terrestrial Laser Scanner and Structure from Motion photogrammetry techniques for quantifying soil surface roughness parameters over agricultural soils. *Earth Surface Processes and Landforms*. 45(3), 605–621.
 - Moret-Fernández D., Latorre B., Peña C., González-Cebollada C., López M. V. (2016). Applicability of the photogrammetry technique to determine the volume and the bulk density of small soil aggregates. *Soil Research*. 54(3), 354–359.
 - Passoni S., Borges F.D.S., Pires L.F., Saab S.D.C., Cooper M. (2014). Software Image J to study soil pore distribution. *Ciência e Agrotecnologia*. 38, 122–128.
 - Rocco S., Munkholm L. J., Jensen J. L. (2024). Long-term soil quality and C stock effects of tillage and cover cropping in a conservation agriculture system. *Soil & Tillage Research*. 241, 106129.
 - Stoyan D., Unland G. (2022). Point process statistics improves particle size analysis. *Granular Matter*. 24, 115.
 - Tsytsiura Y.H. (2021). Selection of effective software for the analysis of the fractional composition of the chaotic seed layer using the example of oilseed radish. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*. 41(2), 161–170.
 - Wong J (2018). Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications (Second Edition). Academic Press.
 - Xingming Z., Lei L., Chunmei W., Leran H., Tao J., Xiaojie L., Zhuangzhuang F. (2021). Measuring surface roughness of agricultural soils: Measurement error evaluation and random components separation. *Geoderma*. 404, 115393.
 - Tobiszewski M, Vakh C (2023). Analytical applications of smartphones for agricultural soil analysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 415, 3703–3715.
- Цицюра Я.Г. Оцінка впливу сидерації на мікрорельєфну структурованість ґрунту методом цифровізації зображення та фотограмметричної реконструкції умовної карти висот**
- Мета. Оцінити довготривалий вплив систематичної сидерації редькою олійною (*Raphanus sativus* L.) на мікрорельєф поверхні ґрунту.
- Методи. Дослідження проводили у 2014–2025 рр. в умовах довготривалого польового експерименту. Порівнювали вихідний контроль без сидерації (2014 р.), контроль без сидерації та варіант із періодичною сидерацією у 2019 р., а також відповідні контроль і систематичну сидерацію у 2025 р. Фотографічні зображення поверхні ґрунту обробляли для отримання нормалізованих карт відносних висот і тривимірних моделей поверхні. Основними морфометричними характеристиками були середня висота поверхні (H_{mean}), стандартне відхилення висоти поверхні (SD_H), середня арифметична шорсткість (R_a), середньоквадратична шорсткість (R_q) та діапазон висот між 95-м і 5-м перцентилями (H_{95-5}).
- Результати. Вихідна поверхня ґрунту характеризувалася $H_{\text{mean}} = 0,442$, $SD_H = 0,180$, $R_a = 0,144$, $R_q = 0,180$ та $H_{95-5} = 0,607$ ум. од. Після п'яти років без сидерації SD_H і R_a зросли на 23,9 і 24,3 %, а H_{95-5} – на 25,4 %. За періодичної сидерації у 2019 р. SD_H і R_a були відповідно на

23,9 і 22,9 % вищими, а H_{95-5} – на 29,2 % порівняно з вихідними значеннями. У 2025 р. контроль без сидерації характеризувався $SD_H = 0,206$, $R_a = 0,161$, $R_q = 0,206$ та $H_{95-5} = 0,804$. Систематична сидерація протягом 12 років знизилася H_{mean} на 13,1 %, SD_H – на 7,2 %, R_a – на 9,0 %, R_q – на 7,2 %, H_{95-5} – на 9,7 % порівняно з вихідним станом. Відносно контролю 2025 р. зниження становило відповідно 15,0; 19,0; 18,6; 19,0 та 31,8 %. Найвиразніший ефект встановлено для H_{95-5} .

Висновки. Систематична сидерація редькою олійною забезпечила довготривалий стабілізуючий вплив на рельєфну структуру поверхні ґрунту. Багаторазове заробляння сидеральної біомаси зменшувало амплітуду та просторову варіабельність мікрорельєфу, що підтверджувалося зниженням значень SD_H , R_a , R_q та H_{95-5} . Застосований спрощений фотограмметричний підхід виявився придатним для оперативної кількісної характеристики та тривимірної візуалізації мікрорельєфу поверхні ґрунту і може бути інформативним додатковим інструментом для оцінювання структурних змін ґрунту за довготривалого застосування регенеративних та ґрунтозберігальних агротехнологій.

Ключові слова: редька олійна, сидерація, поверхня ґрунту, мікрорельєф, структура ґрунту, фотограмметрія, 3D-візуалізація, шорсткість поверхні, ґрунтозбереження, регенеративне землеробство.

Tsytsiura Ya.G. Assessment of the impact of sideration on the micro-relief structure of soil using image digitization and photogrammetric reconstruction of a conditional elevation map

Purpose. The long-term effect (2014–2025) of systematic oilseed-radish green manuring on soil-surface microrelief was evaluated using a simplified photogrammetric approach based on normalized height maps and 3D surface reconstruction. T

Methods. The study was conducted under long-term field experimental conditions. The initial non-green-manured control (2014), the non-green-manured control and periodically green-manured treatment evaluated in 2019, as well as

the corresponding control and systematic green-manuring treatment evaluated in 2025, were compared. Photographic images of the soil surface were processed to obtain normalized relative-height maps and three-dimensional surface models. The main morphometric characteristics included mean surface height (H_{mean}), standard deviation of surface height (SD_H), arithmetic mean roughness (R_a), root-mean-square roughness (R_q), and the height range between the 95th and 5th percentiles (H_{95-5}).

Results. The initial soil surface was characterized by $H_{mean} = 0.442$, $SD_H = 0.180$, $R_a = 0.144$, $R_q = 0.180$, and $H_{95-5} = 0.607$ relative units. After five years without green manuring, SD_H and R_a increased by 23.9% and 24.3%, respectively, while H_{95-5} increased by 25.4%. Under periodic green manuring in 2019, SD_H and R_a were 23.9% and 22.9% higher, respectively, whereas H_{95-5} was 29.2% higher compared with the initial values. In 2025, the non-green-manured control was characterized by $SD_H = 0.206$, $R_a = 0.161$, $R_q = 0.206$, and $H_{95-5} = 0.804$. Systematic green manuring over 12 years reduced H_{mean} by 13.1%, SD_H by 7.2%, R_a by 9.0%, R_q by 7.2%, and H_{95-5} by 9.7% compared with the initial state. Relative to the 2025 non-green-manured control, the reductions were 15.0%, 19.0%, 18.6%, 19.0%, and 31.8%, respectively. The most pronounced effect was observed for H_{95-5} .

Findings. Systematic green manuring with oilseed radish exerted a long-term stabilizing effect on the relief structure of the soil surface. Repeated incorporation of green-manure biomass reduced the amplitude and spatial variability of microrelief, as confirmed by lower SD_H , R_a , R_q , and H_{95-5} values. The simplified photogrammetric approach used proved suitable for the rapid quantitative characterization and three-dimensional visualization of soil-surface microrelief and may serve as an informative complementary tool for assessing structural changes in soils under long-term regenerative and soil-conserving agricultural practices.

Key words: oilseed radish, green manure, soil surface, microrelief, soil structure, photogrammetry, 3D visualization, surface roughness, soil conservation regenerative agriculture.

Дата першого надходження статті до видання: 03.09.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.09.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 21.10.2026