

Мошинський В. С., д.с.-г.н., професор, Вознюк С. А., аспірант
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, v.s.moshynskyi@nuwm.edu.ua,
s.a.voznyuk@nuwm.edu.ua)

МОНІТОРИНГ УЩІЛЬНЕННЯ ТА ДЕГРАДАЦІЇ ҐРУНТІВ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ: ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ І ПЕРСПЕКТИВ

У статті розглянуто сучасні підходи до моніторингу ущільнення та вологості ґрунтів із використанням супутникових даних дистанційного зондування Землі. Основну увагу приділено мультиспектральним (Sentinel-2) і радарним (Sentinel-1) даним, що дозволяють виявляти непрямі ознаки фізичної деградації ґрунтового покриву. Проаналізовано ефективність індексів рослинності (NDVI, NDTI) та моделей машинного навчання (Random Forest) у виявленні змін структури ґрунту. Особливу увагу зосереджено на прикладах із застосуванням зображень Sentinel-2 для оцінки яскравості та текстури верхнього шару ґрунту. Отримані результати свідчать про перспективність поєднання супутникових даних з польовими спостереженнями для розробки систем точного моніторингу ґрунтів.

Ключові слова: ущільнення ґрунту; дистанційне зондування; Sentinel-1; Sentinel-2; темно-сірі опідзолені ґрунти; NDVI; структура ґрунту; агроекологічний моніторинг.

Постановка проблеми. Сучасні аграрні системи функціонують в умовах постійного антропогенного тиску, кліматичних змін і зростаючого дефіциту природних ресурсів, що потребує нових підходів до моніторингу стану ґрунтів та агрокліматичних факторів. Однією з важливих проблем в аграрному виробництві є переущільнення ґрунтів. В ущільнених ґрунтах і субстратах обмежується зростання і правильний розвиток кореневої системи, внаслідок чого рослини не в повному обсязі споживають необхідні для них поживні речовини, мікро- та макроелементи. Ґрунт з підвищеною щільністю «збіднюється» за рахунок того, що кисень в меншому обсязі

проникає всередину ґрунту, а також внаслідок зменшення і мінералізації азоту, що може бути причиною слабого зростання і розвитку рослин, зниження врожайності в цілому та загального зниження родючості ґрунту. Ця проблема особливо актуальна для темно-сірих опідзолених ґрунтів, які поширені на території Західного Лісостепу України, зокрема в Рівненській області.

Мета і завдання дослідження. *Мета дослідження* – проаналізувати сучасні супутникові методи виявлення ущільнення та змін фізичних властивостей ґрунтів, охарактеризувати індикатори, що можуть бути отримані за допомогою дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), а також виявити їх потенціал у моніторингу деградаційних процесів на агроландшафтах.

Об'єкт дослідження – фізичний стан орних ґрунтів, зокрема прояви їх переущільнення.

Предмет дослідження – індикатори ущільнення ґрунтів, що можуть бути визначені за супутниковими мультиспектральними й радарними даними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Структура ґрунту відіграє ключову роль у формуванні його фізичних властивостей, зокрема водно-повітряного, теплового та поживного режимів. Вона безпосередньо впливає на родючість ґрунту та ріст рослин. Процеси руйнування структури орного шару значною мірою залежать від механічного обробітку, мінералізації, накопичення органіки, дії рослин, ґрунтових мікроорганізмів, добрив, а також сезонних перезволоження і промочувань.

У наукових дослідженнях докладно проаналізовано, як агровикористання змінює структурно-агрегатний склад ґрунту. Це стосується зокрема механічного обробітку, застосування органічних і мінеральних добрив, а також вирощування сільськогосподарських культур. В. В. Медведєв зазначає, що довготривале розорювання істотно трансформує структуру ґрунтів, зменшуючи кількість агрономічно цінних агрегатів і сприяючи підвищенню брилуватості [1].

Механічний обробіток істотно впливає на структуру, щільність і мікрорельєф ґрунтової поверхні, а також на процеси інфільтрації та випаровування вологи. За один сезон поле піддається ущільненню сільськогосподарськими агрегатами в середньому 3–5 разів, а під просапними культурами – до 8–12 разів. Як наслідок, погіршуються водні, повітряні та поживні режими ґрунту. За умов систематичного

обробітку технікою структура ґрунту втрачає стійкість до руйнівної дії води та вітру [2; 3].

Зменшення інтенсивності агротехнічного навантаження, зокрема запровадження нульового обробітку, сприяє збереженню структури ґрунту. Це забезпечує покращення його агрегатного стану порівняно з традиційним обробітком [4].

За твердженнями Балюка С. А. та співавторів, ґрунтові ресурси становлять фундамент для розвитку аграрного виробництва в Україні. Близько 60% площ ріллі займають чорноземні ґрунти, що свідчить про унікальність ґрунтового фонду країни [5]. Сучасне виробництво продукції рослинництва переважно базується на інтенсивній експлуатації природної родючості, насамперед чорноземів. Утім, збереження таких ґрунтів вимагає переходу до ґрунтозберігаючих систем землеробства, оскільки подальше виснаження без належного відновлення може призвести до незворотної деградації та втрати продуктивності ґрунтів [6].

Яцук І. П. та колеги підкреслюють, що сьогодні в Україні спостерігається тенденція до виснаження ґрунтового покриву й активізації деградаційних процесів. Серед основних проблем виділяють зниження вмісту гумусу, підкислення, водну ерозію, дефляцію та переущільнення, що зумовлені порушенням або спрощенням технологічних підходів до обробітку ґрунтів [7].

Для ефективного відновлення родючості необхідна надійна інформаційна база щодо якісного стану земель. Дані еколого-агрохімічного оцінювання ґрунтів слугують основою для прогнозування деградаційних змін, своєчасного реагування на негативні тенденції та забезпечення екологічно обґрунтованого використання земельних ресурсів [8; 9].

Останніми роками дедалі більше уваги приділяється дистанційним методам, зокрема супутниковому зондуванню Землі (ДЗЗ) як засобу для оперативного та просторово охоплюючого аналізу змін у стані ґрунтів та супутніх кліматичних умов. Технології ДЗЗ дозволяють виявляти непрямі ознаки переущільнення – наприклад, через індекси рослинності (NDVI, NDRE), відбиття в радарному діапазоні, зниження температури ґрунту та інші показники.

Крім того, дистанційне зондування відкриває можливості для моніторингу агрокліматичних чинників – температури повітря та ґрунту, кількості опадів, вологості поверхні, які безпосередньо впливають на агрофізичні процеси.

Результати досліджень та обговорення. Ущільнення ґрунтів – це процес зменшення об'єму порового простору під впливом зовнішнього навантаження, що призводить до підвищення об'ємної маси, зниження макропористості та загального погіршення водно-повітряного режиму ґрунтів. Ущільнення ґрунту є однією з найпоширеніших форм фізичної деградації ґрунтів, особливо в умовах інтенсивного землеробства. Переущільнення негативно впливає на повітряний і водний режими, біологічну активність і врожайність сільськогосподарських культур.

Основними джерелами механічного навантаження є сільськогосподарська техніка, тварини та кліматичні чинники (наприклад, дощове ущільнення у вологих умовах). За даними [1], на полях, що обробляються важкою технікою без застосування протиущільнювальних заходів, ущільнення може сягати глибини до 50 см.

Для темно-сірих опідзолених ґрунтів Західного Лісостепу характерна легко- або середньоглиниста текстура, достатній природний дренаж, а також помірний вміст гумусу у верхньому горизонті (2–3,5%). Проте ці ґрунти мають послаблену агрегатну стійкість, особливо в орному шарі, що сприяє формуванню щільних горизонтів Bt у нижній частині профілю (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристика темно-сірих опідзолених ґрунтів

Параметр	Класифікація ґрунтів України [10]	WRB (FAO, 2022) [11]
Тип ґрунту	Опідзолені ґрунти	Luvisols
Підтип	Темно-сірі опідзолені	Haplic Luvisol
Діагностичний горизонт	Ілювіальний (Bt), елювіальний (EL)	Argic horizon (Bt), можливий Albic (E)
Профіль	A – EL – Bt – BC – C	A – E (можливий) – Bt – BC – C
Гранулометричний склад	Легко- та середньоглинистий	Clayic / Loamic
Вміст гумусу у горизонті A	2.0–3.5%	Medium humus
Кислотність (pH)	5.5–6.5 (слабокисла до нейтральної)	Slightly acidic to neutral
Материнська порода	Лес або лесоподібний суглинок	Endosiltic (лесовидні відклади)
Структура горизонту Bt	Горіхова, призматична, щільна	Cutanic (наявність плівки з Fe/Si на межах)

продовження табл. 1

WRB-кваліфікатори	—	<i>Clayic, Endosiltic, Cutanic</i>
Водний режим / оглеєння	Неоглеєний	Без ознак <i>Stagnic</i> або <i>Gleyic</i>
Сільськогосподарське значення	Висока потенційна родючість	Помірно до високої продуктивності
Ризики деградації	Ущільнення, дегуміфікація, водна ерозія	Compaction, structure loss, erosion

За умов високої зволоженості в осінній або ранньовесняний період ущільнення може виникати навіть під дією відносно легких агрегатів сільськогосподарської техніки. Такий стан призводить до руйнування ґрунтової структури, зниження гідравлічної провідності, утворення плужної підшви, що ускладнює вертикальну фільтрацію та спричиняє локальний застій води, особливо у верхньому горизонті. Через обмежений повітрообмін у кореневій зоні відбувається погіршення кисневого режиму, що негативно впливає на розвиток культур.

За результатами польових досліджень [2; 13; 15], ущільнення в темно-сірих опідзолених ґрунтах може зменшити інфільтрацію води до 50–65%, особливо в зонах із слабким структурним захистом. Врожайність культур, чутливих до температурного і водного стресу (кукурудза, соя, ріпак), може знижуватися на 15–30% залежно від глибини й щільності ущільнення. Водночас спостерігається зниження біологічної активності – зменшення кількості дощових черв'яків, мікрофлори, ферментативної активності, що свідчить про погіршення ґрунтового середовища [3].

Особливо загрозливою є ситуація, коли ущільнення поєднується з низьким рівнем органічної речовини (менше 2%) та надмірною інтенсифікацією обробітку без застосування ґрунтозахисних технологій. За даними [15], в ущільнених ґрунтах цього регіону співвідношення макро- до мікропор часто менше 0,5, що є критичним порогом для нормального дихання та розвитку кореневої системи.

Усі ці чинники обґрунтовують необхідність впровадження системного моніторингу ущільнення, включаючи використання дистанційних методів, що дозволяють оцінити просторове поширення проблеми та вжити запобіжних заходів у межах адаптивного землеробства. Моніторинг ущільнення ґрунтів та пов'язаних з ним

агрокліматичних чинників є необхідною умовою для ефективного управління земельними ресурсами. З розвитком супутникових технологій ДЗЗ стало потужним інструментом у сфері агроекологічного моніторингу. Воно забезпечує можливість спостереження за великими територіями з високою частотою оновлення даних, що особливо важливо для виявлення змін, пов'язаних із фізичним станом ґрунту.

Методи дистанційного зондування Землі відкривають широкі можливості для просторового та оперативного моніторингу фізичного стану ґрунтів [12]. Особливе значення мають дані, які отримуються за допомогою мультиспектральних сенсорів (зокрема Sentinel-2) та радарних систем (Sentinel-1). Мультиспектральні знімки дозволяють аналізувати спектральні характеристики ґрунту та рослинного покриву, зокрема за допомогою індексів NDVI, NDRE, NDTI, Brightness Index, SAVI тощо [14] (табл. 2).

Таблиця 2

Основні вегетаційні, ґрунтові та індекси вологості

NDVI	Нормалізований різницевий вегетаційний індекс	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	Стан і щільність рослинного покриву
NDRE	Нормалізований різницевий індекс червоного краю	<i>Normalized Difference Red Edge Index</i>	Активність фотосинтезу, особливо у зрілих рослин
SAVI	Індекс вегетації, адаптований до ґрунту	<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>	NDVI з поправкою на яскравість ґрунту
NDTI	Нормалізований різницевий індекс текстури ґрунту	<i>Normalized Difference Tillage Index</i>	Ступінь обробітку ґрунту, текстурні особливості
BSI	Індекс яскравості ґрунту	<i>Bare Soil Index</i>	Яскравість та сухість оголеного ґрунту
BI	Індекс яскравості	<i>Brightness Index</i>	Загальна відбивна здатність поверхні
NDWI	Нормалізований різницевий індекс вологості	<i>Normalized Difference Water Index</i>	Вміст води в рослинах або ґрунті
NDRGI	Нормалізований індекс зелено-червоного спектру	<i>Normalized Difference Red-Green Index</i>	Для виділення відкритого ґрунту (TDBSS)
VV / VH	Поляризація SAR-сигналу (верт./гор.)	<i>Vertical transmit/vertical or horizontal receive (SAR)</i>	Вологість, структура, щільність ґрунту

продовження табл. 2

TDBSS	Двовимірне виділення оголеного ґрунту	<i>Two-Dimensional Bare Soil Separation</i>	Алгоритм на базі SAVI і NDRGI для очищення зображень
--------------	---------------------------------------	---	--

Такі індекси відображають зміни у стані біомаси, яскравості та структури верхнього шару ґрунту, що може бути пов'язано з ущільненням. Радарні знімки Sentinel-1 забезпечують незалежність від погодних умов і дозволяють аналізувати коефіцієнт зворотного розсіювання (backscatter), який чутливий до текстурі, вологості та щільності ґрунту.

Крім того, можуть використовуватися термальні знімки (MODIS, Landsat TIRS) для оцінки температури ґрунту, а також дані з супутників SMAP і SMOS, що вимірюють вологість верхнього шару. Додатково, сучасні цифрові методи ґрунтового картування (Digital Soil Mapping, DSM) дозволяють інтегрувати супутникові, польові та статистичні дані для побудови високоточних моделей розподілу фізичних властивостей ґрунтів. Такі підходи, як Random Forest, Cubist та CNN, забезпечують точність картування до 80–85%, але вимагають ретельної локальної калібровки [17].

Таким чином ДЗЗ забезпечує цінний інструментарій для аналізу ущільнення ґрунтів, особливо у поєднанні з польовими спостереженнями та аналітичними моделями машинного навчання.

Оскільки ущільнення не може бути безпосередньо зафіксоване супутниковими сенсорами, використовуються непрямі індикатори, які виявляють через спектральні характеристики ґрунту та рослинного покриву. Найбільш інформативним індикатором є зниження вегетаційних індексів (NDVI, NDRE, SAVI), що свідчить про уповільнений розвиток рослин у результаті обмеження росту кореневої системи через ущільнення. Яскравість поверхні, яка визначається за допомогою Brightness Index або BSI, зростає на ущільнених ділянках, що мають знижений вміст води та слабшу структуру [15; 16].

Вологість ґрунту може бути оцінена за допомогою NDWI або даних SMAP, при цьому знижений рівень вологості може свідчити про низьку інфільтраційну здатність ущільнених ділянок. Крім того, SAR-дані дозволяють виявляти зони з підвищеним зворотним розсіюванням, що є характерним для щільних, зневоднених ґрунтів. Температура поверхні, яку вимірюють MODIS або Landsat, також

підвищується на ущільнених ділянках через знижену теплопровідність та випаровування [18].

Комбіноване використання цих індикаторів забезпечує більш точну діагностику ущільнення. Важливо враховувати, що жоден з індексів не є абсолютно специфічним, тому їх необхідно аналізувати комплексно та порівнювати з польовими даними.

Хоча дистанційне зондування ґрунтів відкриває нові перспективи для агроекологічного моніторингу, ці методи мають низку обмежень, що зумовлюють необхідність їх поєднання з традиційними польовими підходами. Однією з основних проблем є чутливість оптичних даних до погодних умов, зокрема до хмарності, яка значно ускладнює регулярне отримання знімків Sentinel-2 та Landsat у критичні фази вегетації. У таких випадках частково виручають радарні дані Sentinel-1, однак їхнє просторове розрізнення та глибина проникнення обмежені для деталізованого аналізу ущільнення.

Крім того, супутникові сенсори фіксують характеристики лише поверхневого шару ґрунту (0–5 см), тоді як переущільнення найчастіше формується на глибинах 15–35 см [1]. Це знижує точність супутникової діагностики без врахування додаткових польових даних. Моделі машинного навчання, зокрема Random Forest або Cubist, потребують великої кількості тренувальних точок із точними GPS-координатами, які наразі обмежено доступні в Україні.

Також інтерпретація індексів NDVI, NDWI та Brightness Index не є однозначною – зміни в спектральних значеннях можуть бути зумовлені не лише ущільненням, але й посухами, хворобами рослин або дефіцитом поживних речовин [19]. Саме тому критично важливо поєднувати аналіз супутникових індексів з даними польових досліджень: пенетрометрією, аналізом об'ємної маси, визначенням структури та гранулометричного складу ґрунту. Лише такий комплексний підхід дозволить підвищити достовірність оцінки ступеня ущільнення та розробити надійні моделі управління земельними ресурсами.

Висновки та перспективи. Супутникове зондування є ефективним інструментом у виявленні непрямих ознак ущільнення ґрунтів і може слугувати основою для оперативного моніторингу великих територій. У перспективі доцільно створити відкриті національні бази ґрунтових даних, інтегровані з супутниковими

платформами, для побудови карт деградаційних процесів, включаючи ущільнення. Така інтеграція відкритих даних із польовими спостереженнями є важливим кроком до впровадження цифрового землеробства та моніторингу деградаційних процесів в Україні.

Поєднання супутникових технологій з польовими методами сформує надійне підґрунтя для сталого управління ґрунтовими ресурсами.

1. Медведев В. В. Структура почвы (методы, генезис, классификация, эволюция, география, мониторинг, охрана). Харьков : Изд. «13 типография», 2008. 406 с.
2. Цюк О. А., Манько І. П., Ямковий В. Ю. Зміна агрофізичних властивостей ґрунту залежно від систем землеробства. *Таврійський науковий вісник*. 2007. Вип. 52. С. 102–108.
3. Цюк О. А., Цепцова І. В., Мельник В. П. Структурно-агрегатний склад ґрунту залежно від основного обробітку та удобрення. *Біоресурси і природокористування*. 2018. № 5–6. Т. 10. С. 139–145. doi: 10.31548/bio2018.05.017.
4. Танчик С. П., Ямковий В. Ю. Вплив систем основного обробітку ґрунту на його структурно-агрегатний склад та продуктивність озимої пшениці в Лісостепу України. *Наукові доповіді НУБіП*. 2009. № 2. С. 14–22.
5. Балюк С. А., Мірошніченко М. М., Медведев В. В. Наукові засади сталого управління ґрунтовими ресурсами України. *Вісник аграрної науки*. 2018. № 11. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201811-01>.
6. Балаєв А. Д., Ковальчук О. П., Гаврилюк М. В., Стопа В. П. Родючість ґрунтів Лісостепу України за різної інтенсивності їх використання. *Наукові праці*. 2011. № 140 (152). С. 63–65. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npchdue_2011_152_140_16.
7. Яцук І. П., Моклячук Л. І., Ліщук А. М., Романова С. А. Інноваційний розвиток сільського господарства за використання індикаторів «зеленого зростання». *Агроекологічний журнал*. 2019. № 2. С. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2019.174011>.
8. Булигін С. Ю., Вітвіцький С. В., Кучер Л. І., Вітвіцька О. І. Концепція оцінки якості та охорони земель в Україні. *Рослинництво та ґрунтознавство*. 2020. № 11(2). С. 30–38. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/agr2020.02.030>.
9. Балюк С. А., Медведев В. В., Воротинцева Л. І., Шимель В. В. Сучасні проблеми деградації ґрунтів і заходи щодо досягнення нейтрального її рівня. *Вісник аграрної науки*. 2017. № 8. С. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201708-01>.
10. Полупан М. І., Соловей В. Б., Величко В. А. Класифікація ґрунтів України. К. : Аграрна наука, 2005. 300 с.
11. IUSS Working Group WRB: World Reference Base for Soil Resources, fourth edition. *International Union of Soil Sciences*. Vienna 2022. ISBN 979-8-9862451-1-9.
12. Skyba V., Vozniuk N., Likho O., Vozniuk S., Buhaiev O. Alternative Tools for Modern Agroecological Research. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024»* : Lviv, Ukraine, 2024. P. 1–5. URL:

<https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510033>. **13.** Nichols K. A., Toro M. A. A whole soil stability index (WSSI) for evaluating soil aggregation. *Soil Till. Res.* 2011. Vol. 111. P. 99–104. DOI: 10.1016/j.still.2010.08.014. **14.** Вегетаційні індекси в сільському господарстві: NDVI, NDRE, MSAVI, NDMI. WEAGRO. 2025. URL: <https://weagro.com.ua/blog/vegetacijni-indeksy-v-silskomu-gospodarstvi-ndvi-ndre-msavi-ndmi/>. (дата звернення: 10.05.2025). **15.** Six J., Bossuyt H., Degryze S., Deneff K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* 2004. Vol. 79. P. 7–31. DOI: 10.1016/j.still.2004.03.008. **16.** Xue J., Zhang X., Huang Y., Chen S., Dai L., Chen X., Yu Q., Ye S., Shi Z. A two-dimensional bare soil separation framework using multi-temporal Sentinel-2 images across China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024. Vol. 134. P. 104181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104181>. **17.** Chen S., Arrouays D., Mulder V. L. and all Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at a broad scale: A review. *Geoderma*. 2022. Vol. 409. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115567>. **18.** Wang J., Zhen J., Hu W. and all Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. *International Soil and Water Conservation Research*. 2023. Vol. 11(3). P. 429–454. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002>. **19.** Haoyuan Yin, Ce Chen, Yujie He and all. Synergistic estimation of soil salinity based on Sentinel-1 image texture and Sentinel-2 salinity spectral indices. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2023. Vol. 17. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.17.018502>

REFERENCES:

1. Medvedev V. V. *Struktura pochvy (metody, henezys, klasyfikatsiya, evoliutsiya, heohrafiya, monitorynh, okhrana)*. Kharkov : Yzd. «13 typhrafiya», 2008. 406 s. **2.** Tsiuk O. A., Manko I. P., Yamkovyi V. Yu. Zmina ahrofizychnykh vlastyvostei gruntu zalezno vid system zemlerobstva. *Tavriiskyi naukovyi visnyk*. 2007. Vyp. 52. S. 102–108. **3.** Tsiuk O. A., Tseptsova I. V., Melnyk V. P. Strukturno-ahrehatnyi sklad gruntu zalezno vid osnovnoho obrobitku ta udobrennia. *Bioresursy i pryrodokorystuvannia*. 2018. № 5–6. T. 10. S. 139–145. doi: 10.31548/bio2018.05.017. **4.** Tanchyk S. P., Yamkovyi V. Yu. Vplyv system osnovnoho obrobitku gruntu na yoho strukturno-ahrehatnyi sklad ta produktyvnist ozymoi pshenytsi v Lisostepu Ukrainy. *Naukovi dopovidi NUBiP*. 2009. № 2. S. 14–22. **5.** Baliuk S. A., Miroshnychenko M. M., Medvediev V. V. Naukovi zasady staloho upravlinnia gruntovymy resursamy Ukrainy. *Visnyk ahrarynoi nauky*. 2018. № 11. S. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201811-01>. **6.** Balaiev A. D., Kovalchuk O. P., Havryliuk M. V., Stopa V. P. Rodiuchist gruntiv Lisostepu Ukrainy za riznoi intensyvnosti yikh vykorystannia. *Naukovi pratsi*. 2011. № 140 (152). S. 63–65. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npchdue_2011_152_140_16. **7.** Yatsuk I. P.,

212

Mokliachuk L. I., Lishchuk A. M., Romanova S. A. Innovatsiyni rozvytok silskoho hospodarstva za vykorystannia indyktoriv «zelenoho zrostannia». *Ahroekologichnyi zhurnal*. 2019. № 2. S. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2019.174011>. **8.** Bulyhin S. Yu., Vitvitskyi S. V., Kucher L. I., Vitvitska O. I. Kontseptsiiia otsinky yakosti ta okhorony zemel v Ukraini. *Roslynnytstvo ta gruntoznavstvo*. 2020. № 11(2). S. 30–38. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/agr2020.02.030>. **9.** Baliuk C. A., Medvediev V. V., Vorotyntseva L. I., Shymel V. V. Suchasni problemy dehradatsii gruntiv i zakhody shchodo dosiahnennia neitralnoho yii rivnia. *Visnyk ahrarynoi nauky*. 2017. № 8. S. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201708-01>. **10.** Polupan M. I., Solovei V. B., Velychko V. A. Kласyfikatsiia gruntiv Ukrainy. K. : Ahraryna nauka, 2005. 300 s. **11.** IUSS Working Group WRB: World Reference Base for Soil Resources, fourth edition. *International Union of Soil Sciences*. Vienna 2022. ISBN 979-8-9862451-1-9. **12.** Skyba V., Vozniuk N., Likho O., Vozniuk S., Buhaiiev O. Alternative Tools for Modern Agroecological Research. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024»* : Lviv, Ukraine, 2024. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510033>. **13.** Nichols K. A., Toro M. A. A whole soil stability index (WSSI) for evaluating soil aggregation. *Soil Till. Res.* 2011. Vol. 111. P. 99–104. DOI: 10.1016/j.still.2010.08.014. **14.** Vehetatsiini indeksy v silskomu hospodarstvi: NDVI, NDRE, MSAVI, NDMI. WEAGRO. 2025. URL: <https://weagro.com.ua/blog/vegetacijni-indeksy-v-silskomu-gospodarstvi-ndvi-ndre-msavi-ndmi/>. (data zvernennia: 10.05.2025). **15.** Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* 2004. Vol. 79. P. 7–31. DOI: 10.1016/j.still.2004.03.008. **16.** Xue J., Zhang X., Huang Y., Chen S., Dai L., Chen X., Yu Q., Ye S., Shi Z. A two-dimensional bare soil separation framework using multi-temporal Sentinel-2 images across China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024. Vol. 134. P. 104181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104181>. **17.** Chen S., Arrouays D., Mulder V. L. and all Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at a broad scale: A review. *Geoderma*. 2022. Vol. 409. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115567>. **18.** Wang J., Zhen J., Hu W. and all Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. *International Soil and Water Conservation Research*. 2023. Vol. 11(3). P. 429–454. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002>. **19.** Haoyuan Yin, Ce Chen, Yujie He and all. Synergistic estimation of soil salinity based on Sentinel-1 image texture and Sentinel-2 salinity spectral indices. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2023. Vol. 17. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.17.018502>

Moshynskyi V. S., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Vozniuk S. A., Post-graduate Student (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

MONITORING SOIL COMPACTION AND DEGRADATION WITH SATELLITE DATA: A REVIEW OF CURRENT APPROACHES AND PERSPECTIVES

This review article presents a comprehensive analysis of current remote sensing approaches for assessing soil compaction and surface physical properties, with a particular focus on dark-grey podzolized soils typical of the Western Forest-Steppe of Ukraine. The study emphasizes the use of multispectral (Sentinel-2), radar (Sentinel-1), and thermal (MODIS, Landsat) data to identify indirect indicators of soil structural degradation. Vegetation and bare-soil indices such as NDVI, Brightness Index, NDWI, and SAR backscatter are evaluated as proxies for compaction-related stress on crops and soil hydrology. Additionally, the article highlights recent advances in Digital Soil Mapping (DSM) and machine learning applications (e.g., Random Forest, Cubist, CNN), which enable accurate spatial modeling of compaction risks and topsoil texture variations.

Case studies from Ukraine and Central Europe are reviewed, including the application of the Two-Dimensional Bare Soil Separation (TDBSS) algorithm, which combines SAVI and NDRGI indices for precise detection of bare soil from Sentinel-2 images. Field-validated results demonstrate that integration of remotely sensed indices with in-situ penetrometer measurements can achieve mapping accuracies exceeding 80%. Limitations of current methods—such as atmospheric interference, shallow sensor penetration, and the need for local calibration—are discussed in detail. The authors conclude that hybrid systems combining satellite imagery, field observations, and AI-based soil models represent a promising pathway for implementing national-scale soil monitoring frameworks. Future research directions include the development of open-access soil data platforms and operational systems for early detection of physical soil degradation under climate change and intensive farming.

Keywords: soil compaction; remote sensing; Sentinel-2; Sentinel-1; Digital Soil Mapping; NDVI; TDBSS; machine learning; bare soil; Ukraine.