DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.095

# АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВОДНОГО БАЛАНСУ ВОЛОГОСТІ ГРУНТІВ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ

Кавац Ю.В.[1] [ORCID], Кавац О.О.[2] [ORCID], Олексієнко М.А.[3] [ORCID]

*[1] Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна*

*[2] Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна*

*[3]Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна*

***Анотація.*** *У роботі узагальнено підходи до оцінки водного балансу та вологості ґрунтів на основі даних дистанційного зондування Землі та проаналізовано їх адаптацію для умов України. Показано, що внаслідок кліматичних змін і руйнування водної інфраструктури водний баланс набуває критичного стану, а традиційні спостереження є просторово обмеженими. Розглянуто оптичні, теплові та мікрохвильові методи, а також підходи даунскейлінгу для інтеграції супутникових даних різної роздільної здатності. Обґрунтовано доцільність мультиметодного підходу, що поєднує NDVI/NDWI, LST, SAR (Sentinel-1), SMAP та ERA5-Land для отримання просторово-суцільних оцінок. Відзначено потенціал Google Earth Engine для обробки часових рядів та автоматизації моніторингу. Визначено перспективність застосування методів машинного навчання для картування водного балансу.*

***Ключові слова.*** *Водний баланс, вологість ґрунтів, дистанційне зондування, машинне навчання.*

**Вступ.** Водний баланс є визначальним інтегральним показником функціонування наземних екосистем, який безпосередньо впливає на продуктивність сільського господарства, формування гідрологічних ризиків (посухи та повені) та забезпечення водними ресурсами. З огляду на те, що аграрний сектор формує близько 10% ВВП та 41% експорту України, точна оцінка водного балансу на регіональному рівні набуває стратегічного значення [1].

Традиційна мережа гідрометеорологічних спостережень характеризується просторовою нерівномірністю, яка суттєво посилилася внаслідок бойових дій, а на тимчасово окупованих територіях унеможливлює проведення вимірювань. За таких умов дистанційне зондування Землі фактично виступає єдиним інструментом отримання просторово-суцільної інформації. Попри стрімкий

розвиток супутникових методів протягом останнього десятиліття, їх застосування в Україні залишається фрагментарним і недостатньо систематизованим [2-3].

Метою роботи є узагальнення сучасних підходів до оцінки вологості ґрунтів і водного балансу за супутниковими даними та визначення перспектив їх адаптації для умов України.

**Основна частина.** Клімат України характеризується як помірно континентальний із чітко вираженою сезонністю, що супроводжується зростанням міжрічної мінливості. Аналіз довготривалих рядів спостережень свідчить про підвищення частоти та інтенсивності метеорологічних посух, найбільш виражених у 2003, 2015, 2019 та 2020 роках [4-5]. Зокрема, посуха 2019–2020 рр. призвела до втрати 80–100% врожаю в окремих районах Одеської області, що супроводжувалося критичним виснаженням запасів ґрунтової вологи. Згідно з кліматичними сценаріями CMIP6, до середини XXI століття екстремальні посухи можуть перейти у категорію кліматичної норми, а за сценарієм SSP5-8.5 їх інтенсивність і тривалість зростуть щонайменше вдвічі.

Додатковим дестабілізуючим фактором є руйнування водної інфраструктури внаслідок війни. Зокрема, підрив Каховської ГЕС у 2023 році спричинив втрату значної частки запасів прісної води, порушення водопостачання для мільйонів населення та деградацію зрошуваних систем [6-8]. Скорочення площ зрошення до приблизно 18% від довоєнного рівня та зростання температури поверхні ґрунту на зрошуваних раніше територіях вказують на прискорення процесів аридизації та формування ознак опустелювання.

За таких умов застосування супутникових методів оцінки вологості ґрунтів є обґрунтованою альтернативою наземним спостереженням. Основні підходи доцільно класифікувати за типом сенсорів та фізичними принципами вимірювання.

Оптичні та теплові методи базуються на аналізі спектральних індексів, таких як NDVI та NDWI, що відображають стан рослинності та вміст вологи у

верхньому шарі ґрунту. Поєднання температури поверхні (LST) з індексами рослинності реалізується у вигляді трикутника NDVI–LST, що дозволяє оцінювати вологість без використання калібрувальних вибірок. Водночас обмеженням таких методів є залежність від хмарності, що призводить до просторово-часових прогалин у даних.

Мікрохвильові методи активного типу (SAR), реалізовані зокрема на базі Sentinel-1, забезпечують всепогодний моніторинг завдяки чутливості сигналу зворотного розсіювання до діелектричних властивостей ґрунту [9-10]. Використання фізичних моделей (AIEM, WCM) та алгоритмів машинного навчання (Random Forest, SVR, нейронні мережі) дозволяє підвищити точність оцінок, хоча на результати впливають щільна рослинність і складний рельєф.

Пасивні мікрохвильові сенсори (SMOS, SMAP) забезпечують регулярне глобальне покриття, проте їх низька просторова роздільна здатність (десятки кілометрів) є недостатньою для регіонального аналізу [11-12]. Це обумовлює необхідність застосування методів даунскейлінгу, які поєднують дані різних джерел у єдині високороздільні продукти. Зокрема, інтеграція SMAP, MODIS, Sentinel-2 та Sentinel-1 у рамках багаторівневих моделей дозволяє отримувати щоденні карти вологості з роздільністю до 30 м.

Практичні реалізації таких підходів продемонстровано в агрометеорологічних системах, де поєднання супутникових індексів і кліматичних даних дозволяє визначати ключові фактори врожайності. Аналіз часових рядів також підтверджує суттєве погіршення водного балансу на півдні України після втрати зрошення, що супроводжується зростанням випаровування та деградацією земель.

Окремо слід відзначити потенціал платформи Google Earth Engine, яка забезпечує доступ до довготривалих архівів супутникових даних та можливість їх обробки безпосередньо в хмарному середовищі. Поєднання MODIS, Sentinel та ERA5-Land відкриває можливості для автоматизованого моніторингу водного балансу в реальному часі.

**Висновки.** У роботі зроблено огляд сучасних методів оцінки водного балансу та вологості ґрунтів на основі даних дистанційного зондування

Землі, а також проаналізовано їх застосовність для умов України з урахуванням кліматичних змін та наслідків руйнування водної інфраструктури внаслідок війни.

Показано, що сучасний стан водного балансу України характеризується як критичний, що зумовлено зростанням частоти та інтенсивності посух, деградацією зрошувальних систем та обмеженням наземних гідрометеорологічних спостережень. За таких умов методи дистанційного зондування виступають ключовим інструментом забезпечення просторово моніторингу.

Обґрунтовано, що найбільш ефективним для умов України є мультиметодний підхід, який передбачає інтеграцію оптичних індексів (NDVI, NDWI), теплових даних (LST), радарних спостережень (Sentinel-1), пасивних мікрохвильових продуктів (SMAP, ESA CCI SM) та кліматичних реаналізів (ERA5-Land) із використанням хмарних платформ обробки даних.

Визначено, що перспективним напрямком подальших досліджень є розробка програмних систем типізації територій України за рівнем водного балансу та водної безпеки на основі поєднання супутникових часових рядів, методів машинного навчання (Random Forest, LSTM) та адаптивних алгоритмів просторової класифікації, орієнтованих на підтримку прийняття управлінських рішень в умовах воєнних та кліматичних викликів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Світовий банк. Збитки для водних ресурсів. Режим доступу: https://eu4waterdata.eu (дата звернення: 2026).
2. Freitas, F.R.; et al. Review of soil moisture estimation methods using remote sensing. Advances in Technology, 2025. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100648.
3. Bauer-Marschallinger, B.; et al. Soil moisture retrieval from Sentinel-1 data. Remote Sensing of Environment, 2025. https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114771.
4. Семенова І.; та ін. Довгострокова мінливість та тенденції метеорологічних посух в Україні. International Journal of Climatology, 2024. https://doi.org/10.1002/joc.8416.

5. Zarepour, M.; et al. Extreme droughts under climate change. Climatic Change, 2025. https://doi.org/10.1007/s10584-025-03958-9.
6. Гапіч Г.; Новицький Р.; та ін. Наслідки російсько-української війни для водної безпеки та повоєнні перспективи. Natural Hazards Research, 2024. https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.01.004.
7. ЮНІСЕФ; Світовий банк. Третя швидка оцінка збитків та потреб України (RDNA3). Режим доступу: https://documents.worldbank.org (дата звернення: 2026).
8. Гапіч Г.; та ін. Вплив війни на природно-кліматичну трансформацію територій у зоні зрошення. SN Applied Sciences, 2025. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07404-4.
9. Chun, J.; et al. Soil moisture estimation based on Sentinel-1 SAR using artificial neural networks. Remote Sensing, 2022, 14. https://doi.org/10.3390/rs14030465.
10. He, L.; et al. Soil moisture retrieval by integrating Sentinel-1A and MODIS data. Water, 2020, 12. https://doi.org/10.3390/w12061726.
11. Gruber, A.; et al. Evolution of soil moisture climate data records in ESA CCI. Earth System Science Data, 2019, 11, 717–739. https://doi.org/10.5194/essd-11-717-2019.
12. Guo, Y.; et al. Microwave-optical multi-stage synergy for downscaling soil moisture to 30 m. Remote Sensing, 2025, 17. https://doi.org/10.3390/rs17223677.
13. Раздавовський Р.; та ін. Оцінка аномалій врожайності сільськогосподарських культур у 2022 році в Україні на основі даних Copernicus Sentinel та ERA5. Sensors, 2024, 24. https://doi.org/10.3390/s24072257.
14. Сніжко С.; та ін. Річка Південний Буг: водна безпека та кліматичні зміни. Frontiers in Water, 2024. https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1447378.

## ANALYSIS OF METHODS FOR SOIL MOISTURE WATER BALANCE USING SATELLITE DATA

Yurii Kavats, Olena Kavats, Mykyta Oleksiienko

***Abstract.*** *This paper summarises approaches to assessing the water balance and soil moisture based on Earth remote sensing data and analyses their adaptation to conditions in Ukraine. It demonstrates that, as a result of climate change and the deterioration of water infrastructure, the water balance is reaching a critical state, whilst traditional observations are spatially limited. Optical, thermal and microwave methods are considered, as well as downscaling approaches for integrating satellite data of varying resolutions. The feasibility of a multi-method approach combining NDVI/NDWI, LST, SAR (Sentinel-1), SMAP and ERA5-Land to obtain spatially continuous estimates is justified. The potential of Google Earth Engine for processing time series and automating monitoring is noted. The prospects for applying machine learning methods to water balance mapping are identified.*

***Keywords:*** *Water balance, soil moisture, remote sensing, machine learning.*

## REFERENCE

1. World Bank. Water Sector Damage Assessment. Available online: https://eu4waterdata.eu (accessed: 2026).
2. Freitas, F.R.; et al. Review of soil moisture estimation methods using remote sensing. Advances in Technology, 2025. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100648.
3. Bauer-Marschallinger, B.; et al. Soil moisture retrieval from Sentinel-1 data. Remote Sensing of Environment, 2025. https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114771.
4. Semenova, I.; et al. Dovhostrokova minlyvist ta tendentsii meteorolohichnykh posukh v Ukraini [Long-term variability and trends of meteorological droughts in Ukraine]. International Journal of Climatology, 2024. https://doi.org/10.1002/joc.8416.
5. Zarepour, M.; et al. Extreme droughts under climate change. Climatic Change, 2025. https://doi.org/10.1007/s10584-025-03958-9.
6. Hapich, H.; Novytskyi, R.; et al. Naslidky rosiisko-ukrainskoi viiny dlia vodnoi bezpeky ta povoienni perspektyvy [Impacts of the Russia–Ukraine war on water security and post-war prospects]. Natural Hazards Research, 2024. https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.01.004.
7. UNICEF; World Bank. Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3). Available online: https://documents.worldbank.org (accessed: 2026).
8. Hapich, H.; et al. Vplyv viiny na pryrodno-klimatychnu transformatsiiu terytorii u zoni zroshennia [Impact of war on natural-climatic transformation in irrigated areas]. SN Applied Sciences, 2025. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07404-4.
9. Chun, J.; et al. Soil moisture estimation based on Sentinel-1 SAR using artificial neural networks. Remote Sensing, 2022, 14. https://doi.org/10.3390/rs14030465.
10. He, L.; et al. Soil moisture retrieval by integrating Sentinel-1A and MODIS data. Water, 2020, 12. https://doi.org/10.3390/w12061726.
11. Gruber, A.; et al. Evolution of soil moisture climate data records in ESA CCI. Earth System Science Data, 2019, 11, 717–739. https://doi.org/10.5194/essd-11-717-2019.
12. Guo, Y.; et al. Microwave-optical multi-stage synergy for downscaling soil moisture to 30 m. Remote Sensing, 2025, 17. https://doi.org/10.3390/rs17223677.
13. Razdavovskyi, R.; et al. Otsinka anomalii vrozhainosti silskohospodarskykh kultur v Ukraini na osnovi danykh Copernicus Sentinel ta ERA5 [Crop yield anomaly assessment in Ukraine based on Copernicus Sentinel and ERA5 data]. Sensors, 2024, 24. https://doi.org/10.3390/s24072257.
14. Snizhko, S.; et al. Richka Pivdennyi Buh: vodna bezpeka ta klimatychni zminy [Southern Bug River: water security and climate change]. Frontiers in Water, 2024. https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1447378.