

А. О. Наюк¹
 Є. М. Крижановський¹
 І. М. Штельмах¹
 О. О. Войцеховська¹

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩІ ДЗЕРКАЛ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ ВОДОГОСПОДАРСЬКОЇ ДІЛЯНКИ З ВИКОРИСТАННЯМ СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

¹Вінницький національний технічний університет

Проаналізовано сучасні підходи до визначення площі водної поверхні за даними дистанційного зондування Землі в контексті задач водогосподарського балансу. Розглянуто структуру витратної частини балансу на прикладі ВГД (водогосподарської ділянки) М5.4.0.02 річки Південний Буг. Авторами обґрунтовано використання дистанційного зондування Землі як альтернативи традиційним польовим замірам, що не забезпечують необхідної динаміки даних. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю прогнозування дефіцитів водних ресурсів, точність якого особливо важлива у засушливі періоди.

Основу методу становить обробка супутникових знімків місії Sentinel-2 із застосуванням NDWI (нормалізованого різницевого водного індексу) та емпірично визначеного порога водних пікселів 0,05. Запропоновано часосерійно-ваговий підхід до визначення площі води на ВГД. Метод передбачає використання серії знімків за певний період, де кожному знімку присвоюється ваговий коефіцієнт залежно від рівня хмарності та якості зображення. Такий підхід дозволяє нівелювати вплив випадкових похибок окремих кадрів та отримувати репрезентативну зважену оцінку площі.

В ході дослідження вирішено проблему технічних обмежень платформи Planet Labs шляхом алгоритмічного поділу території на тайли, що дозволило отримати високу роздільну здатність. За замовчуванням роздільна здатність всієї ВГД М5.4.0.02 становить 48 м² на піксель, а поділ території на тайли дозволив збільшити якість зображень у п'ять разів, що достатньо для подальшого дослідження.

Апробація методу для літнього та осіннього періодів 2025 року виявила значну сезонну варіабельність площі (від 41,425 км² до 30,048 км²), що підкреслює важливість врахування сезонних змін водної поверхні під час виконання завдань водогосподарського балансу. Отримані результати інтегровані у програмний комплекс на базі Python, що створює підґрунтя для автоматизації розрахунку додаткового випаровування у загальній системі управління водними ресурсами басейну.

Ключові слова: площа водної поверхні, NDWI, часосерійно-ваговий підхід, водогосподарський баланс, Sentinel-2, автоматизація.

Вступ

Існує багато різних факторів, які впливають на точність розрахунку водогосподарського балансу: зміни у використанні земель, антропогенний вплив, сезонність, зміни клімату. Без правильних розрахунків об'єму притоку та відтоку і їхніх компонентів на водогосподарській ділянці, зокрема, актуальність даних про площу водних об'єктів та рівень випаровування, неможливо отримати достовірні результати. В результаті цих похибок ускладнюється планування водокористування, прогнозування дефіцитів і резервів.

На відміну від витрат, що вимірюються на гідрологічних постах, таких як: водозабір чи перекидання стоку за межі водогосподарської ділянки (ВГД), випаровування є величиною, яка чутлива до вхідних параметрів. Одним з таких ключових параметрів є площа водойм. Повна формула для розрахунку витрат на додаткове випаровування така [1]:

$$W_{eva} = \left(W_{eva0} \cdot \frac{S}{k_{eva}} \right) - \left(X - \left(\frac{W}{F} \cdot 10^3 \right) \right),$$

де W_{eva} — середньобогаторічна величина випаровування з поверхні водойм, мм, визначається на основі багаторічних даних по метеостанціях, розташованих в межах ВГД; S — площа водойм на території ВГД, км²; k_{eva} — коефіцієнт для узгодження розмірності; X — кількість опадів; W — об'єм стоку, м³; F — площа басейну, км².

За останні роки різко зріс доступ до супутникових даних з високою роздільною здатністю. Місії Sentinel-2, Landsat та інші надають відкритий доступ до архівів даних і платформи для обробки, що уможливило автоматизування задачі, пов'язані з водогосподарським балансом. Використання супутникових даних дозволяє перейти від статичних оцінок до оперативного картографування водойм на основі спектральних властивостей води.

Актуальність дослідження

Згідно з даними Державного агентства водних ресурсів України [2] витрати на додаткове випаровування на водогосподарській ділянці М5.4.0.02 Південного Бугу, в яку входить місто Вінниця, становить відносно невелику частку. Хоча з весняних до осінніх місяців цей параметр в середньому становить 0,03 % від загальної витратної складової, він все одно залишається важливим погляду точності підрахунку всього балансу, особливо у засушливі періоди або під час прогнозування дефіцитів.

Традиційними методами розрахунку площ водойм є: польові заміри, ручна інтерпретація, інструментальна зйомка. Всі вони мають суттєві обмеження. Підрахунок площ великих та віддалених водойм потребує багато часу та ресурсів. Результати таких вимірювань дають статичну оцінку. А виконувати оперативний моніторинг такими методами доволі складно. Проблема ускладнюється також тим, що площа водних об'єктів змінюється сезонно, після паводків та внаслідок антропогенного впливу (водозабір, скид, регулювання рівня води), і наявні довідникові дані не враховують цих змін.

На противагу традиційним з'являються нові методи на основі дистанційного супутникового зондування. Огляд L. Jiaxin та інших авторів роботи "Satellite Detection of Surface Water Extent: A Review of Methodology" [3] підкреслює, що сьогодні методи на основі оптичних (через спектральні властивості води) та радіолокаційних зображень (через низьке відношення відбиття) є основними джерелами для картографування водойм. А в роботі «Аналіз методів виділення водних об'єктів на супутникових зображеннях» [4] В. Гнатушенко та М. Міщенко аналізують сучасні підходи на основі спектральних водних індексів, методи класифікації зображень та рішення на основі машинного навчання.

Отже, існує потреба у розробці автоматизованих рішень, які дозволять отримувати динамічні та точні оцінки площі водної поверхні як для оперативних водогосподарських задач, так і для задач екологічного моніторингу та для інших адміністративних й організаційних цілей. Саме на розв'язання цієї проблеми спрямоване це дослідження.

Огляд методів виділення води

Методи, що застосовуються для виділення водних об'єктів на супутникових знімках, В. Гнатушенко та М. Міщенко поділяють на три групи:

спектрально-індексні; методи класифікації зображень; методи, що ґрунтуються на машинному навчанні.

До найпопулярніших спектральних індексів належать: NDWI, MNDWI (модифікований нормалізований різницевий водний індекс) та AWEI (автоматизований індекс виділення води). Принцип роботи методів, що використовують ці індекси, базується на підсиленні контрасту між водною поверхнею та іншими типами покриття. Після цього виділяють водні пікселі, використовуючи певний поріг, заданий вручну. Ці прийоми хоч і є найшвидшими та простими в реалізації, але точність визначення площі дуже залежить від якості зображення: тіні, кута освітлення, сезону, стану рослинності.

Методи класифікації зображень, такі як: метод нульового порогу, Оцу та kNN (k-найближчих сусідів), застосовують для автоматизації процесу виокремлення пікселів, що позначають поверхню води. Всі ці алгоритми базуються на результатах, отриманих після застосування спектрально-індексних методів, але суттєво відрізняються за реалізацією між собою. Наприклад, метод Оцу з певним інтервалом підбирає оптимальний водний індекс, на відміну від методу нульового порогу, який визначає воду як пікселі з порогом більше нуля. А метод kNN порівнює пікселі зображення з оберненою відстанню до тренувальних водних пікселів.

У своїй роботі L. Jiaxin та інші автори аналізують методи машинного навчання: метод опорних векторів, дерева рішень, об'єктно-орієнтована класифікація та алгоритми глибокого навчання.

Дослідники підсумовують, що ці методи дають високу точність, але для їх використання потрібні великі вибірки тренувальних даних та необхідність проведення калібрування під регіон. Через це такі засоби розв'язання поставленої задачі стають менш придатними для оперативних водогосподарських задач.

Методика дослідження

В загальному вигляді часосерійно-ваговий підхід та алгоритм розрахунку водної поверхні за індексом NDWI висвітлені авторами у матеріалах [5]. Ця робота є логічним продовженням цих досліджень, де кроки програмної реалізації представлені розширено та виконано порівняння отриманих результатів з довідниковими даними.

Серед спектральних водних індексів для дослідження вибрано саме NDWI через простоту реалізації, стабільний результат та доступність необхідних параметрів для обчислення на онлайн сервісах супутникових знімків. NDWI обчислюється за формулою

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR},$$

де *Green* — це зелений канал, а *NIR* — це ближній інфрачервоний канал.

Пороговим значенням NDWI вибрано 0,05 емпірично на основі аналізу реальних супутникових знімків досліджуваної місцевості та візуальним зіставленням результатів з ідентифікованими водними об'єктами.

В якості сервісу знімків вибрано Planet Labs [6], оскільки він надає достатню квоту на скачування зображень протягом безкоштовного місячного періоду. Досліджувались зображення, отримані з супутників місії Sentinel-2, на яку посилаються вищезазначені статті.

Для визначення площі водних об'єктів на ВГД запропоновано часосерійно-ваговий метод. Він полягає у такому: для різних дат скачується серія супутникових знімків, які покривають ВГД. Кожному знімку присвоюється вага, що відображає його якість (за критеріями хмарності та іншими умовами). Після цього обчислюється індекс NDWI для всіх зображень. Так формується часовий ваговий підхід, в якому фінальна оцінка площі водної поверхні є зваженою середньою для всіх оброблених дат.

Цей метод має такі переваги:

1. Враховує мінливість умов супутникової зйомки за рахунок аналізу декількох знімків, а не єдиного «вдалого».
2. Уникає суттєвого впливу аномалій чи низької якості окремих знімків завдяки використанню ваг.
3. Бере до уваги зміну водних об'єктів з плином часу (на рівні тижневих або місячних змін чи сезонних коливань).

Формула для обчислення площі часосерійно-ваговим методом така:

$$S = \sum (S_i \cdot \omega_i),$$

де S_i — площа водних об'єктів, отримана зі знімка певного дня, а ω_i — вага, надана цій даті. Сума ваг для серії дат дорівнює 1.

Planet Labs накладає обмеження на максимальний розмір одного знімка: 2500×2500 пікселів. Тому, для охоплення всієї ВГД з високою роздільною здатністю її площу попередньо треба поділити на тайли (квадрати місцевості).

Рис. 1 схематично демонструє поділ ВГД на тайли, а на рис. 2 зображено детальний алгоритм розрахунку площі водойм на ВГД часосерійно-ваговим методом.

Результати дослідження

Реалізацію часосерійно-вагового методу для автоматизованого розрахунку площі води на ВГД виконано за допомогою Python і розміщено на платформі Colab [7]. Досліджувалася ділянка M5.4.0.02 (р. Південний Буг від гирла р. Іква до г/п Селище), на території якої знаходиться місто Вінниця.

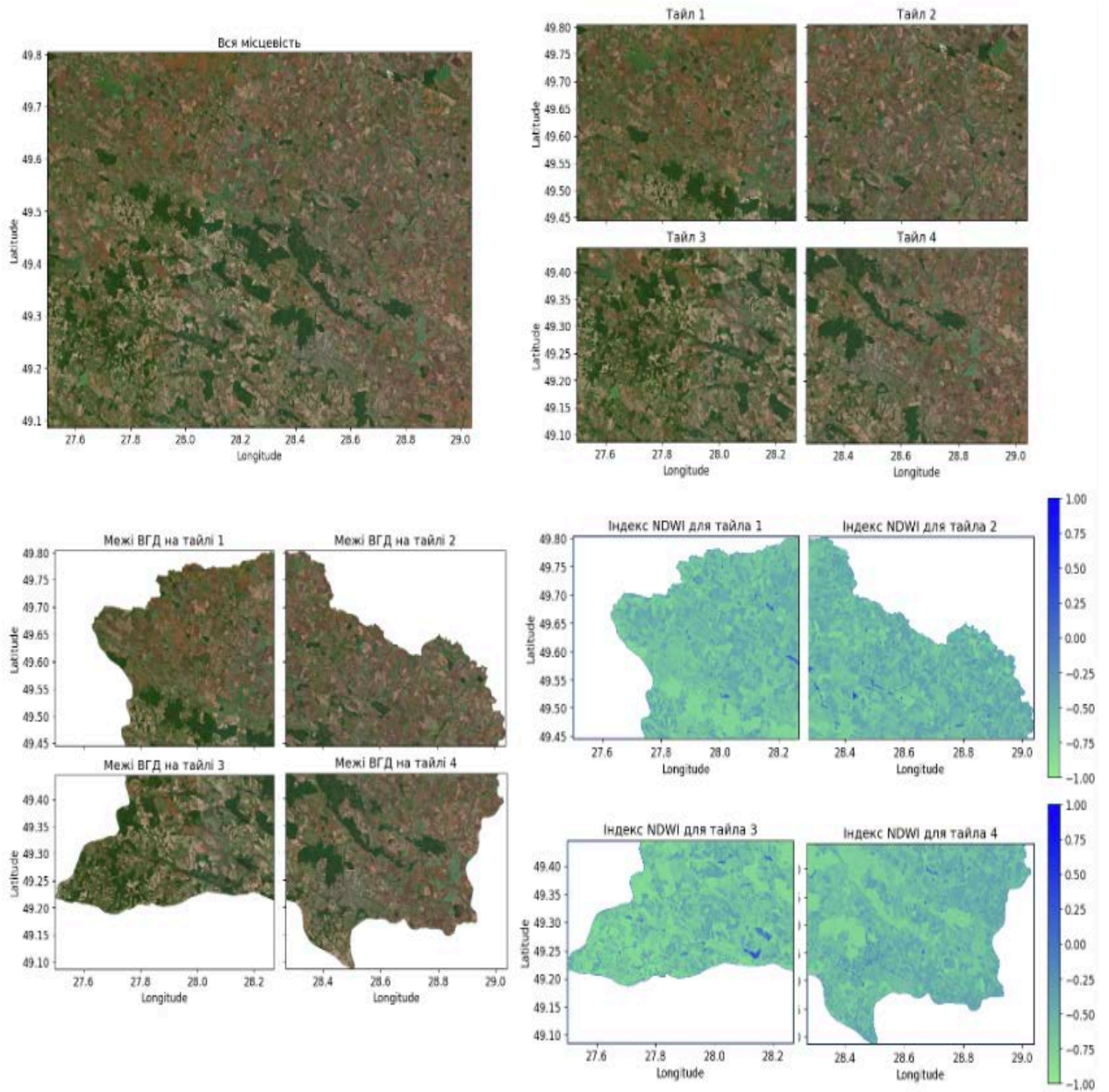


Рис. 1. Поділ місцевості на тайли. Зліва направо зверху вниз: початкова місцевість, її поділ на тайли, накладання меж ВГД, обчислення NDWI

На початковому етапі визначена оптимальна кількість тайлів для поділу площі ВГД. Результати тестування знімків, зроблених 26.09.2025, представлені в таблиці 1. Вибрана ця дата, оскільки в цей день була відсутня хмарність та зашумленість зображень водойм, спричинених сезонними факторами. На рисунку 3 та 4 зображені індекс NDWI для території ВГД та поріг водних пікселів.

Таблиця 1

Порівняння впливу роздільної здатності зображення на розраховану площу для 26.09.25

Кількість тайлів, які складають ділянку	Роздільна здатність, м ² на 1 піксель	Площа води, км ² , отримана програмно
2×2	24	40,562
5×5	9,6	32,652
8×8	6	32,680
12×12	4	32,672

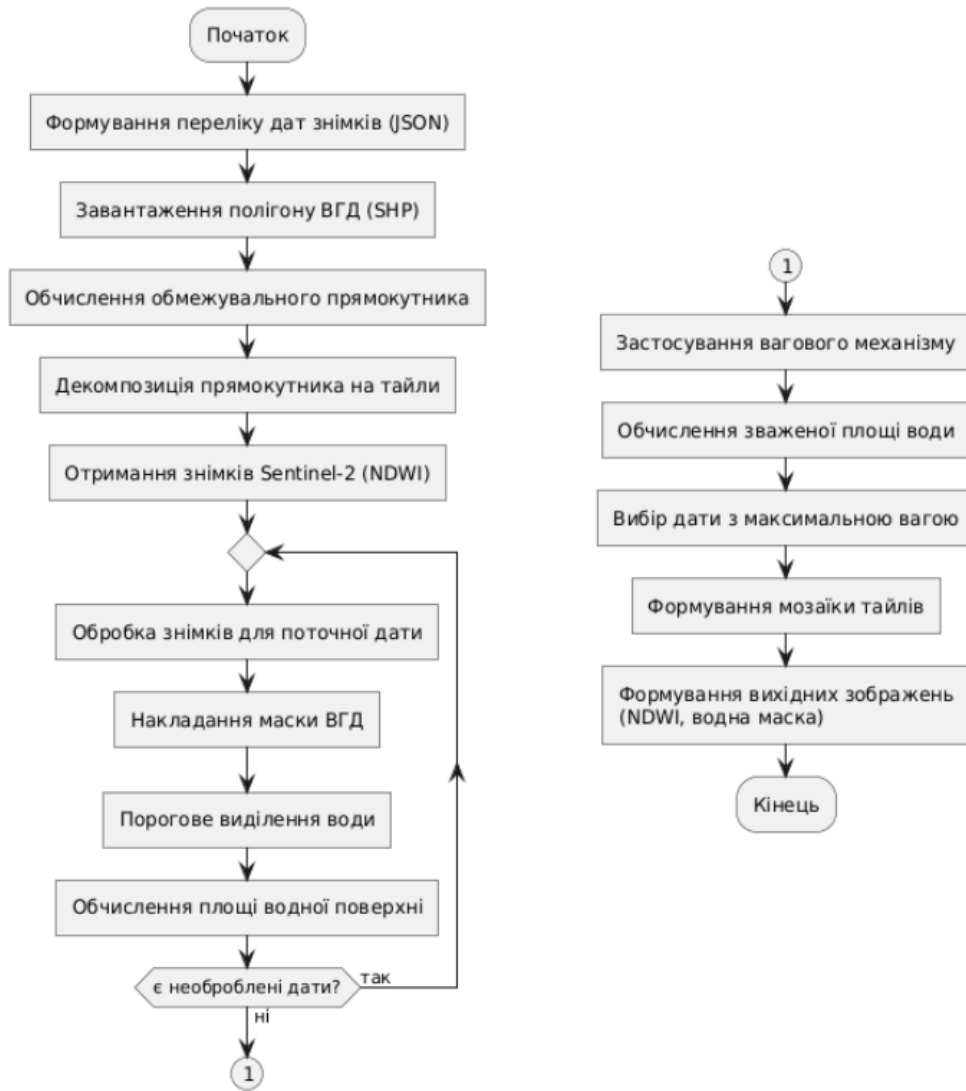


Рис. 2. Блок-схема алгоритму розрахунку площі водної поверхні на ВГД

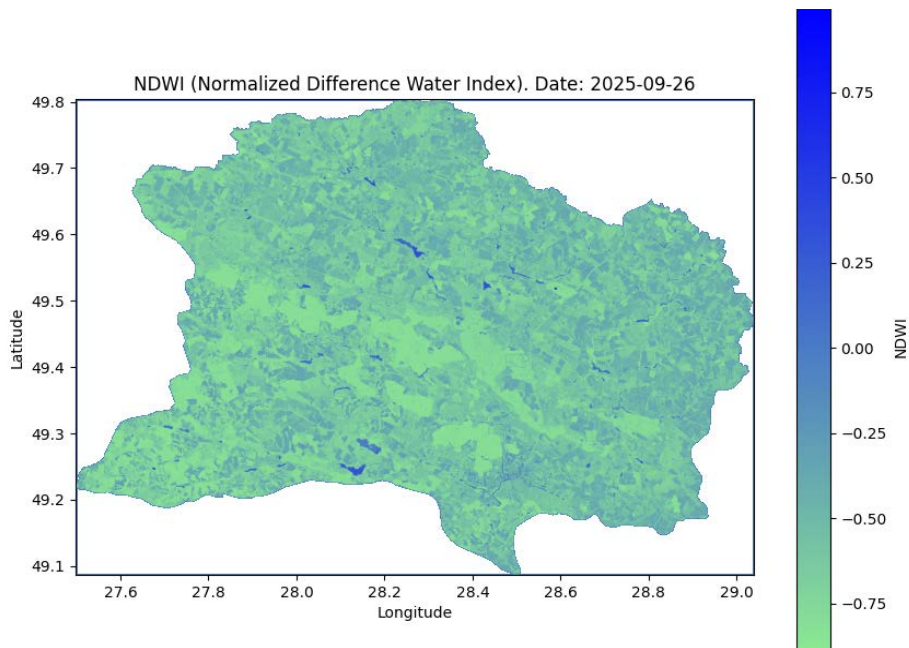


Рис. 3. Індекс NDWI для 26.09.2025

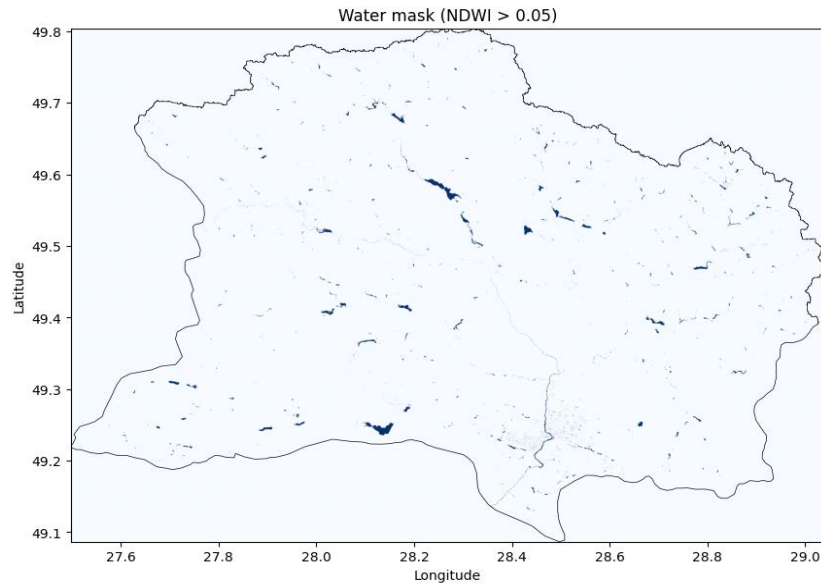


Рис. 4. Поріг водних пікселів для 26.09.2025

Суттєвих змін розрахованої площі зі зменшенням роздільної здатності з $9,6 \text{ м}^2$ на 1 піксель не спостерігається. Тому вирішено подальші обчислення виконувати з поділом зображення території ВГД на 25 тайлів.

З метою дослідження впливу сезонності на площу водних об'єктів проаналізовано знімки двох періодів 2025 року: першої половини літа та початку осені. В табл. 2 подані результати розрахунку площі водойм в першій половині літа, а в табл. 3 — на початку осені.

Таблиця 2

Площа водної поверхні в першій половині літа 2025

Дата	Хмарність, %	Вага цієї дати	Площа, км^2
05.06.2025	11	0,09	25.134
08.06.2025	4	0,4	36.794
03.07.2025	2	0,42	47.93
08.07.2025	13	0,09	47.938
Зважена площа, км^2			41,425

Таблиця 3

Площа водної поверхні на початку осені 2025

Дата	Хмарність, %	Вага цієї дати	Площа, км^2
03.09.2025	1	0,3	26.722
06.09.2025	14	0,05	26.861
23.09.2025	1	0,3	30.867
26.09.2025	0	0,35	32.652
Зважена площа, км^2			30,048

Отримані результати демонструють суттєву варіабельність розрахованих площ водної поверхні як між окремими датами в межах одного періоду, так і між різними сезонними періодами. Одною з ключових причин таких відмінностей є чутливість алгоритму до вибраного порогового значення NDWI для класифікації водних пікселів. Зокрема, для дати 05.06.2025 ($25,134 \text{ км}^2$) за використання порогу 0,05 частина пікселів, що відповідають окремим водоймам, не ідентифікована як водна поверхня, тоді як для знімків 03.07.2025 ($47,93 \text{ км}^2$) за аналогічного порогу ці ж ділянки вже коректно класифікувалися.

Для оцінки точності та доцільності впровадження запропонованого алгоритму проведено порівняння отриманих значень з довідниковими показниками площі водної поверхні на ВГД М5.4.0.02 (табл. 4).

Довідникові дані площі водної поверхні для М5.4.0.02

Сумарна площа ставків, км ²	Сумарна площа водосховищ, км ²	Загальна площа, км ²
29,856	4,149	34,005

Порівняння показує, що хоча результат часосерійно-вагового підходу для визначення площі води за супутниковими знімками для осіннього періоду (30,048 км²) має незначне відхилення від статистичних довідникових даних (відхилення становить близько 11 %), проте для літнього періоду (41,425 км²) відхилення є суттєвим (близько 38 %). Це доводить доцільність використання актуальних супутникових даних замість застосування незмінних табличних показників для задач водного балансу. Запропонований підхід враховує реальний стан водних об'єктів, що особливо важливо в критичні періоди року, забезпечуючи вищу точність визначення витрат на додаткове випаровування [8]—[10].

Висновки

У роботі виконано огляд сучасних методів визначення площі водної поверхні за даними дистанційного зондування Землі та проаналізовано їх застосування для задач водогосподарського балансу. Використовуючи нормалізований різницевий водний індекс та супутникові знімки Sentinel-2, розроблено метод визначення площі дзеркал водних об'єктів водогосподарської ділянки з використанням супутникових зображень, який на відміну від наявних використовує часосерійно-ваговий підхід для зменшення впливу окремих знімків з підвищеною зашумленістю і для забезпечення стабільнішої оцінки площ водної поверхні. Здійснено програмну реалізацію для автоматизованого визначення площі водних об'єктів на основі розробленого методу.

У ході дослідження опрацьовано серії супутникових знімків ділянки М5.4.0.02 для двох періодів 2025 року: першої половини літа та початку осені. Для кожної дати виконано обчислення площі водної поверхні, після чого з урахуванням якості знімків, відображених значенням ваг, отримано зважену середню площу для цього періоду. За результатами розрахунків зваженої оцінки площі водної поверхні для періоду першої половини літа отримано 41,425 км², тоді як для періоду початку осені — 30,048 км², що відображає чутливість алгоритму до вибраного порогового значення NDWI, а також фактор сезонної зміни площі водойм.

Виконано порівняльний аналіз отриманих результатів з довідниковими даними. Отримані розбіжності демонструють, що сезонність та багаторічна динаміка руслових процесів суттєво впливає на площу поверхні водних об'єктів. На відміну від застосування статичних табличних значень, запропонований автоматизований метод дозволяє отримувати актуальну площу випаровування для конкретного розрахункового місяця.

Отримані результати свідчать, що застосування часосерійно-вагового підходу є доцільним для зменшення впливу окремих знімків з підвищеною зашумленістю і для забезпечення стабільнішої оцінки площ водної поверхні. Запропонований метод може бути використаний у розрахунках компоненти втрат на додаткове випаровування під час формування водного балансу басейну річки чи окремої водогосподарської ділянки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. Б. Мокін, В. В. Гребінь, та Є. М. Крижановський, *Методи оцінювання та засоби автоматизації розрахунку складових водогосподарського балансу районів річкових басейнів України*, моногр. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2023.
- [2] Державне агентство водних ресурсів України, *Водогосподарські баланси основних районів річкових басейнів*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://davt.gov.ua/vodogospodarski-balansi-osnovnih-rajoniv-richkovih-basejniv>. Дата звернення: 10.12.2025.
- [3] J. Li et al., "Satellite detection of surface water extent: a review of methodology," *Water*, vol. 14, no. 7, p. 1148, 2022: <https://doi.org/10.3390/w14071148>.
- [4] В. В. Гнатушенко, і М. С. Міщенко, «Аналіз методів виділення водних об'єктів на супутникових зображеннях,» *Системні технології*, т. 4, № 159, с. 108-113, 2025. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-159-2025-11>.
- [5] А. О. Наюк, і Є. М. Крижановський, «Автоматизація розрахунку площі водної поверхні для потреб водного балансу з використанням супутникових зображень,» на *LV Всеукраїнській науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету*, Вінниця, 2026. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2026/paper/view/27256/22340>. Дата звернення: 08.02.26.
- [6] Planet Documentation, *Cloud-native platform for Earth observation with reliable data, scalable analytics, and accessible integrations and APIs*. [Electronic resource]. Available: <https://docs.planet.com/>. Accessed: 08.02.26.
- [7] *Алгоритм розрахунку площі водної поверхні на ВГД часосерійно-ваговим методом*. Google Colab. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://colab.research.google.com/drive/1zirCxbKA9yufda0E7oNh9yLOxxAf9Tqh?usp=sharing>. Дата звернення: 08.02.26.

[8] В. К. Хільчевський, і В. В. Гребінь, «Деякі аспекти щодо стану території районів річкових басейнів та моніторингу вод під час вторгнення Росії в Україну (2022 р.),» *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, № 3 (65), с. 6-14, 2022. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.3.1> .

[9] В. В. Гребінь, і Г. А. Беженару, «Оцінка стоку для розрахунку водогосподарського балансу в басейні Дністра,» на *Міжнародній науково-практичній конференції. Рельєф, клімат та поверхневі води як об'єкти природничо-географічних досліджень*. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, Київ, 2019, № 3 (54), с. 24-26.

[10] В. Б. Мокін, В. В. Гребінь, Є. М. Крижановський, і Л. М. Скорина, «Технологія оптимізації управління водними ресурсами басейну р. Дністер шляхом автоматизації складання його водогосподарського балансу,» на *XIV Міжнародній науково-практичній конференції. Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях*, Київ, 2015, с. 131-135.

Рекомендована кафедрою системного аналізу та інформаційних технологій ВНТУ

Дата надходження: 19.02.2026

Дата прийняття до публікації: 27.03.2026

Дата публікації: 8.04.2026

Наюк Андрій Олексійович — аспірант кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: anaiuk.stu@gmail.com . <https://orcid.org/0009-0007-1379-0477> ;

Крижановський Євгеній Миколайович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: kruzhan@gmail.com , <https://orcid.org/0000-0003-1311-1175> ;

Штельмах Ігор Миколайович — канд. техн. наук, асистент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: igor.shtelmakh@vntu.edu.ua , <https://orcid.org/0009-0008-1259-448X> ;

Войцеховська Ольга Олександрівна — д-р філософії, доцент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: olgav1085@gmail.com , <https://orcid.org/0000-0001-8504-1204> .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

A. O. Naiuk¹

Ye. M. Kryzhanovskiy¹

I. M. Shtelmakh¹

O. O. Voitsekhovska¹

Automation of Water Surface Area Calculation for Water Balance Purposes Using Satellite Images

¹Vinnitsia National Technical University

The paper analyzes modern approaches to determining the water surface area using Earth remote sensing data within the context of water management balance tasks. The structure of the consumption component of the balance is examined using the example of the Water Management Area (WMA) M5.4.0.02 of the Southern Bug River. The authors justify the use of remote sensing as an alternative to traditional field measurements, which fail to provide the necessary data dynamics. The relevance of the study is driven by the need to predict water resource deficits, the accuracy of which is particularly critical during arid periods.

The core methodology involves processing Sentinel-2 satellite imagery using the Normalized Difference Water Index (NDWI) and an empirically determined water pixel threshold of 0.05. A time-series weighted approach is proposed for determining the water area within the WMA. This method utilizes a series of images over a specific period, where each image is assigned a weighting coefficient based on cloud cover and overall image quality. Such an approach mitigates the impact of random errors in individual frames and yields a representative weighted area estimate.

During the study, the technical limitations of the Planet Labs platform were addressed through the algorithmic division of the territory into tiles, ensuring high spatial resolution. By default, the resolution for the entire WMA M5.4.0.02 is 48 m² per pixel, while the territorial tiling allowed for a fivefold increase in image quality, which proved sufficient for further research.

Testing the method for the summer and autumn periods of 2025 revealed significant seasonal area variability (from 41.425 km² to 30.048 km²), highlighting the importance of accounting for seasonal water surface changes when performing water balance tasks. The results are integrated into a Python-based software package, creating a foundation for automating additional evaporation calculations within the overall river basin water resource management system.

Keywords: water surface area, NDWI, time-series weighted method, water balance, Sentinel-2, automation

Naiuk Andrii O. — Post-Graduate Student, of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: anaiuk.stu@gmail.com , <https://orcid.org/0009-0007-1379-0477>;

Kryzhanovskiy Yevhenii M. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: kruzhan@gmail.com , <https://orcid.org/0000-0003-1311-1175>;

Shtelmakh Ihor M. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: igor.shtelmakh@vntu.edu.ua , <https://orcid.org/0009-0008-1259-448X>;

Voitsekhovska Olha O. — PhD, Associate Professor of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: olgav1085@gmail.com , <https://orcid.org/0000-0001-8504-1204>