

АНАЛІЗ МЕТОДИК АВТОМАТИЗОВАНОГО КАРТУВАННЯ ЗМІН ВОДОЙМ

Анотація. Моніторинг внутрішніх вод має стратегічне значення для розвитку країни. Оцінка екологічного стану, об'єм та площа водойм є ключовим у аналізі та прогнозі водного балансу. Внаслідок зміни клімату в Україні відбувається негативний за наслідками процес погіршення умов природного вологозабезпечення, в результаті якого у зоні Полісся зникають території надлишкового зволоження, а на півдні розпочався процес опустелювання земель. Наземні вимірювання з оцінки змін площі водойм є дорогим і ресурсоємним підходом, який особливо складний у віддалених районах. В статті розглянуті основні методи автоматизованого картування змін водойм на основі даних ДЗЗ. Використання різнорідних даних у поєднанні з комбінацією методів на основі спектральних індексів та машинного навчання демонструють найкращий результат. Ключові слова: водні ресурси, водойми, автоматизоване картування, супутниковий моніторинг, методи ДЗЗ, спектральні індекси, машинне навчання

Постановка проблеми. Внутрішні водні ресурси для кожної країни є життєво важливими компонентами водної системи, а їх запас є стратегічним. Озера, річки, водно-болотні угіддя та водосховища є частиною екосистемних послуг у різних країнах світу, які в основному пов'язані з побутовим, промисловим та сільськогосподарським використанням, таким як продукти харчування, електроенергія (гідроенергія), виробництво лікарських речовин та інших матеріалів, а також створення рекреаційних зон [1,2,3,4]. Флора водойм поглинає парникові гази, тоді як невеликі природні водойми та болотисті території захищають ґрунт від ерозії та деградації [4,5]. Зміна клімату та діяльність людини посилили тиск на ці водойми, негативно впливаючи на їх екологічні умови та стан навколишніх екосистем. Кліматичні зміни у поєднанні зі зростаючим попитом на воду ще більше посилюють сезонні та щорічні коливання зі зберігання площі і наповненості водних ресурсів, що потенційно призводить до скорочення або зникнення озер, річок та водно-болотних угідь [2,3]. Гостро постає питання попиту на воду у посушливих та напів-посушливих регіонах [4,5,6]. Особливо вразливими є регіони, які стикаються з нерегулярними опадами, високими темпами евапотранспірації та посухами. Крім того, зростаючий попит на воду, в основному для зрошення, збільшує ризик дефіциту води та загрожуює життєздатності населення і ускладнює основні види економічної діяльності.

Дослідження проведені українським Гідрометцентром підтверджують суттєвий вплив зміни клімату на середньорічну температуру повітря. За останні 30 років цей показник підвищився на 1,2°C для всієї території України, а швидкість підвищення є значно вищою порівняно з глобальними та європейськими масштабами. Слід зазначи-

ти, що кількість опадів залишається практично незмінною [5]. У дослідженнях проведених Інститутом водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України при оцінці впливу змін клімату на умови вологозабезпечення території України використовувалась величина кліматичного водного балансу (КВБ), яка характеризує різницю між величиною опадів та потенційним сумарним випаровуванням [5]. Внаслідок зміни клімату в Україні відбувається негативний за наслідками процес погіршення умов природного вологозабезпечення, в результаті якого у зоні Полісся зникають території надлишкового зволоження, а на півдні розпочався процес опустелювання земель. За умови реалізації даного прогнозного сценарію, навіть, при зростанні кількості опадів, кліматичний водний баланс території України до 2050 року може знизитись на 45-115 мм, а його дефіцит в зоні Степу становитиме 560 мм і більше. З урахуванням цього, територія країни з недостатнім рівнем зволоження збільшиться до 56% і лише 28% території будуть відповідати вологим і надмірно вологим умовам [5].

Свій негативний відсоток у прогнозну оцінку вносять активні військові дії, спричинені повномасштабним вторгненням, які призводять до екологічних катастроф. В більшості випадків це навмисне руйнування ворогом інфраструктури, підлив плотин, очисних споруд і водопроводів, що спричиняє затоплення територій із витокami у водойми токсичних речовин та стічних вод. Однією із наймасштабніших екологічних катастроф - є підлив росіянами внутрішніх приміщень Каховської ГЕС, в результаті якого відбувся витік 18.2 кубічних кілометрів води, які затопили величезну територію. Сьогодні територія, яку раніше займало Каховське водосховище, покриває густий ліс, а річка Дніпро повернулася в своє історичне русло. Техногенна катастрофа змінила не тільки стан річки Дніпро, а й ускладнила вирощування сільськогосподарських культур за умови мінімальних водних ресурсів для їх зрошування.

У зв'язку з цим технології, розроблені для виявлення водойм та проведення моніторингу змін їх площі в режимі реального часу на даних супутникового спостереження, мають велике значення.

Мета дослідження полягає у визначенні ефективності застосування сучасних методик моніторингу водних ресурсів. Для цього необхідно провести порівняльний аналіз основних методів автоматизованого картування та оцінки динаміки змін водних ресурсів і визначити коло доступних даних, на які можна спиратися.

Основна частина. Зростаючий попит на воду та зміна клімату посилюють проблеми управління водними ресурсами в посушливих та напівпосушливих регіонах, які відчувають дефіцит води внаслідок низьких і нерегулярних опадів та високої евапотранспірації. Моніторинг внутрішніх вод має стратегічне значення для розвитку країни. Оцінка екологічного стану, об'єм та площа водойм є ключовим у аналізі та прогнозі водного балансу і просторовому розподілі серед регіонів. Особливу актуальність набуває моніторинг водойм у країнах які найбільше потерпають від стрімких змін клімату. Ці аспекти є вирішальними для оцінки їх довгострокової здатності підтримувати різні види використання води відповідно до цілей сталого розвитку (ЦСР) [7,8]. Наземні вимірювання з оцінки змін площі водних об'єктів є дорогим і ресурсоємним підходом, який особливо складний у віддалених районах та при оцінці сукупності невеликих во-

дойм. В свою чергу дистанційне зондування забезпечує економічно ефективну альтернативу, покращуючи існуючі системи моніторингу, та зменшуючи залежність від дорогих наземних обстежень, які в умовах активних військових дій, неможливі. Пропонуючи просторові та часові спостереження з високою роздільною здатністю зі збільшенням точності, дистанційне зондування значно покращує оцінку та управління водоймами [6,7].

Використання даних дистанційного зондування для моніторингу та картографування водойм значно розвинулось за останні роки, одним із чинників, який сприяє цьому процесу - доступність супутникових даних різної роздільної здатності та їх періодичність. Науковці використовують різноманітні методи комбінуючи різнорідні дані з активних та пасивних датчиків зйомки [11,12,13]. У перших дослідженнях моніторингу поверхневих вод використовували зображення Landsat, які доступні в архівах даних з 1970-х років [10,14,15]. З 8-денним покриттям та роздільною здатністю 30 м при умові відсутності хмарності, Landsat забезпечує довгостроковий моніторинг. Основною проблемою даних середньої просторової роздільної здатності, є точність ідентифікації визначення кордону між водою та сушею, що призводить до значних похибок. Запущена пізніше місія MODIS, зробили свій значний внесок у довгостроковий моніторинг поверхневих вод [16,17]. Основна перевага даних MODIS - щоденне глобальне покриття та відкритість даних, через низьку просторову роздільну здатність значно зменшується можливість ідентифікації та виявлення водойм, особливо невеликих озер та річок [11,13]. MODIS, і Landsat є пасивними оптичними датчиками, які фіксують відбите сонячне світло і теплове випромінювання з поверхні Землі. Вони працюють у видимих, ближніх інфрачервоних, короткохвильових інфрачервоних та теплових інфрачервоних областях електромагнітного спектру, щоб забезпечити зображення придатні для візуальної інтерпретації. Однак вони обмежені погодними умовами, зокрема покриттям хмарністю.

Радарні супутникові датчики, зокрема радар з синтетичною діафрагмою (SAR), пропонують можливість отримувати дані вдень і вночі, забезпечуючи безперервний моніторинг незалежно від погодних умов. Їх зображення з високою роздільною здатністю забезпечують широке покриття, швидке сканування та можливість детального моніторингу невеликих об'єктів. Радіолокаційні зображення часто менш інтуїтивно зрозумілі для візуальної інтерпретації через відсутність кольорової інформації та надмірну чутливість, включаючи перешкоди. Все частіше вчені з спостереження Землі інтегрують оптичні та радіолокаційні дані для покращення аналізу, що призводить до більш точної класифікації земельного покриття, покращення моніторингу навколишнього середовища та більш обґрунтованого прийняття рішень у різних сферах.

Sentinel-1 і Sentinel-2 - це дві сім'ї супутників з програми Copernicus Європейського космічного агентства (ESA). Разом ці місії пропонують оптичні зображення з високою роздільною здатністю з видимих, ближніх інфрачервоних (NIR) та короткохвильових інфрачервоних (SWIR) частин спектру, а також технологію радара з синтетичною

діафрагмою (SAR). У поєднанні з інноваційними методами картографування зображення Sentinel пропонують нові можливості для точного виявлення та моніторингу водойм.

Методології картографування водних об'єктів значно розвинулися з підвищенням роздільної здатності супутникових даних, що дозволяє застосовувати методи дистанційного зондування для великих і маленьких водойм, охоплюючи регіони країни.

Більшість досліджень побудовані на використанні спектральних індексів NDWI та Modified NDWI (MNDWI) [12,14]. Один із спектральних індексів, що широко використовується та дозволяє проводити моніторинг змін площі водного дзеркала у водоймах – Normalized Difference Water Index (NDWI). Оскільки водойми сильно поглинають світло у видимому та інфрачервоному діапазонах електромагнітного спектра, NDWI використовує зелені та ближні інфрачервоні смуги для виділення водойм. Він чутливий до присутності міської забудови та може призводити до переоцінки площ водних об'єктів. Значення індексу понад 0.5 зазвичай відповідає водоймам. Рослинність, як правило, має значно менші значення, а забудовані території — значення в діапазоні від 0 до 0.2.

Індекс NDWI розраховується за формулою:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR), \quad (1)$$

де NIR – коефіцієнти відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектру, Green – у зеленому.

Свій розвиток отримав модифікований нормалізований різницевий водний індекс (MNDWI), через більш точне виділення водних об'єктів на супутникових знімках, ніж стандартний NDWI [12,14]. Індекс MNDWI розраховується за формулою:

$$MNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR), \quad (2)$$

де SWIR - коефіцієнти відбиття у короткохвильовому інфрачервоному спектрі, Green – у зеленому.

Використання SWIR при розрахунку спектрального індексу MNDWI, дозволяє зменшити вплив рослинності та інших поверхонь, які також можуть відображати у NIR, та покращити виявлення водних об'єктів. Значення MNDWI перебувають у діапазоні від -1 до 1, де понад 0.5 зазвичай відповідають водоймам.

Окреме використання спектральних індексів для аналізу змін водойм за багаторічний період не дає повної інформації. Свій подальший розвиток моніторингу поверхневих вод набули дослідження з використанням алгоритмів класифікації Random Forest та Artificial Neural Networks [18]. Використання методів машинного навчання для моніторингу стану водних об'єктів на основі оптичних та радарних супутникових знімків дозволяє автоматизувати процеси аналізу та надавати більш точні, що важливо для прийняття обґрунтованих рішень. У дослідженні [19] на основі даних Sentinel-1 та Sentinel-2 з використанням згорткової нейронної мережі були розроблені інструменти для картографування та оцінки динаміки змін поверхневих водних об'єктів.

Іншим підходом, який був широко вивчений - це методи пороговання зображень, включаючи метод Оцу [20]. Метод Оцу продемонстрував ефективність серед методів порогового значення, перевершуючи більшою точністю при виявленні водних об'єктів. Простота та ефективність порогового підходу Оцу скорочує час обробки, зберігаючи точність у порівнянні з методами класифікації. Метод Оцу починається з сегментації зображення шляхом аналізу розподілу інтенсивності пікселів, а потім визначає оптимальний поріг, який максимізує дисперсію між об'єктом та класами фону, що призводить до бінарної сегментації зображення. Цей метод особливо ефективний у зображеннях SAR, де варіації у відтінках сірого відповідають мікрохвильовим відмінностям зворотного розсіювання у воді, рослинності та ґрунті.

Однак такі методи не дозволяють отримати правильне порогове значення коефіцієнта зворотного розсіювання для відносно невеликих водойм. У роботі [21] представлено метод картографування поверхні водойм, який дозволяє правильно ідентифікувати водойми навіть у ситуаціях дисбалансу класів «вода»/«суша». Метод працює за принципом максимальної відповідності отриманої маски води SAR заданій еталонній масці. Таким чином, метод дозволяє дослідити можливості пошуку та вибору оптимальних параметрів (поляризація та спекл-фільтрація), які забезпечують максимальну якість маски води SAR. За наявності опорної маски води запропонований метод є точнішим, ніж метод Оцу.

Висновки. Розглянуто методи автоматизованого картування із застосування дистанційного моніторингу та применимость методів для аналізу водних ресурсів України. Визначено основні чинники, які спричиняють зневоднення та зникнення водойм.

Проаналізовано методи моніторингу поверхневих вод на основі супутникових даних. Основні класичні методи базуються на використанні спектральних індексів, машинного навчання та пороговання зображень. Застосування різнорідних даних у поєднанні з комбінацією методів демонструють найкращий результат. Слід зазначити що такі методи не дозволяють отримати точне порогове значення для відносно невеликих водойм. Метод картування поверхневих вод із застосуванням радарних зображень та використанням методу вибору оптимального порогу, еталонної маски води, показав найкращий результат.

Подальші дослідження будуть присвячені розробці комплексної методології картування та аналізу водойм із залученням машинного навчання та різнорідних даних.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Biemans, H.; Haddeland, I.; Kabat, P.; Ludwig, F.; Hutjes, R.W.A.; Heinke, J.; von Bloh, W.; Gerten, D. Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century. *Water Resour. Res.* 2011, 47. [Google Scholar] [CrossRef]
2. Haines-Young, R.; Potschin, M. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1; Technical Report; Fabis Consulting Ltd.: Nottingham, UK, 2018. [Google Scholar]

3. Grizzetti, B.; Lanzaova, D.; Lique, C.; Reynaud, A.; Cardoso, A. Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environ. Sci. Policy* 2016, 61, 194–203. [Google Scholar] [CrossRef]
4. Shaad, K.; Souter, N.J.; Vollmer, D.; Regan, H.M.; Bezerra, M.O. Integrating Ecosystem Services Into Water Resource Management: An Indicator-Based Approach. *Environ. Manag.* 2022, 69, 752–767. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
5. Аналітичні матеріали, наукові прогнози та пропозиції НААН щодо переліку заходів, реалізація яких сприятиме забезпеченню водної та продовольчої безпеки України в умовах змін клімату URL: <http://naas.gov.ua/slide/v-umovakh-suchasnikh-zm-n-kl-matu-r-ven-zvolozhennya-na-teritor-ukra-ni-golovnim-chinnikom-yakiy-obm/#:~:text=%D0%92%D0%B6%D0%B5%20%D0%B2%20%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D1%87%D0%B0%D1%81%20%D0%BD%D0%B0,%E2%80%94%D0%B2%D1%96%D0%B4%20%D0%B4%BE%2050%25>. (дата звернення: 11.04.2025).
6. Aguirre, I.; Lozano-Parra, J.; Garrido Velarde, J. Reservoir time-series filling from remote sensing data in the Central Valley, Chile. In *Analyzing Sustainability in Peripheral, Ultra-Peripheral, and Low-Density Regions*; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2022; pp. 117–130. [Google Scholar]
7. Liu, J.; Jiang, L.; Zhang, X.; Druce, D.; Kittel, C.M.M.; Tøttrup, C.; Bauer-Gottwein, P. Impacts of water-resources management on land-water storage in the North China Plain. *J. Hydrol.* 2021, 603 Pt C, 126933. [Google Scholar] [CrossRef]
8. Vörösmarty, C.; McIntyre, P.; Gessner, M.; Dudgeon, D.; Prusevich, A.; Green, P.; Glidden, S.; Bunn, S.E.; Sullivan, C.A.; Liermann, C.R.; et al. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 2010, 467, 555–561. [Google Scholar] [CrossRef]
9. Peng, J.; Liu, S.; Lu, W.; Liu, M.; Feng, S.; Cong, P. Continuous Change Mapping to Understand Wetland Quantity and Quality Evolution and Driving Forces: A Case Study in the Liao River Estuary from 1986 to 2018. *Remote Sens.* 2021, 13, 4900. [Google Scholar] [CrossRef]
10. Yao, F.; Wang, J.; Wang, C.; Crétaux, J.-F. Constructing long-term high-frequency time series of global lake and reservoir areas using Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* 2019, 232, 111210. [Google Scholar] [CrossRef]
11. Deng, X.; Song, C.; Liu, K.; Ke, L.; Zhang, W.; Ma, R.; Zhu, J.; Wu, Q. Remote-sensing estimation of catchment-scale reservoir water impoundment in the upper Yellow River. *J. Hydrol.* 2020, 585, 124791. [Google Scholar] [CrossRef]
12. Di Francesco, S.; Casadei, S.; Di Mella, I.; Giannone, F. The role of small reservoirs in a water-scarcity scenario: A computational approach. *Water Resour. Manag.* 2022, 36, 875–889. [Google Scholar] [CrossRef]
13. Shi, J.; Hu, C. Evaluation of ECOSTRESS thermal data over South Florida estuaries. *Sensors* 2021, 21, 4341. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

14. Condeça, J.; Nascimento, J.; Barreiras, N. Monitoring the storage volume of water reservoirs using Google Earth Engine. *Water Resour. Res.* 2022, 58, e2021WR030026. [Google Scholar] [CrossRef]
15. Pekel, J.F.; Cottam, A.; Gorelick, N. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 2016, 540, 418–422. [Google Scholar] [CrossRef]
16. Gao, H.; Birkett, C.; Lettenmaier, D.P. Global monitoring of large-reservoir storage from satellite remote sensing. *Water Resour. Res.* 2012, 48. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Khandelwal, A.; Karpatne, A.; Marlier, M.E.; Kim, J.; Lettenmaier, D.P.; Kumar, V. An approach for global monitoring of surface-water-extent variations in reservoirs using MODIS data. *Remote Sens. Environ.* 2017, 202, 113–128. [Google Scholar] [CrossRef]
18. Ghansah, B.; Foster, T.; Higginbottom, T.P.; Adhikari, R.; Zwart, S.J. Monitoring spatial-temporal variations of surface areas of small reservoirs in Ghana. *Phys. Chem. Earth* 2022, 125, 103082. [Google Scholar] [CrossRef]
19. K Sergieieva, O Kavats, V Vasyliov, Y Kavats, O Kovro, Machine learning-based monitoring of war-damaged water bodies in Ukraine using satellite images. *CEUR Workshop Proceedings*, 2024, V3790, «Information Control Systems & Technologies 2024., p. 422–434.
20. Tan, J.; Tang, Y.; Liu, B.; Zhao, G.; Mu, Y.; Sun, M.; Wang, B. A self-adaptive thresholding approach for automatic water extraction using Sentinel-1 SAR imagery. *Remote Sens.* 2023, 15, 2690. [Google Scholar] [CrossRef]
21. Kavats, O., Khramov, D., & Sergieieva, K. (2022). Surface Water Mapping from SAR Images Using Optimal Threshold Selection Method and Reference Water Mask. *Water*, 14(24), 4030, DOI: <https://doi.org/10.3390/w14244030>.

Received 18.06.2025.

Accepted 24.06.2025.

Analysis of automated mapping techniques for changes in water bodies

Inland water resources are vital components of the water system for every country, and their supply is strategic. Growing demand for water and climate change are exacerbating water management problems in arid and semi-arid regions, which experience water shortages due to low and irregular rainfall and high evapotranspiration. Monitoring inland waters is of strategic importance for a country's development. Assessing the ecological status, volume and area of water bodies is key to analysing and forecasting the water balance and spatial distribution among regions. Monitoring water bodies is particularly relevant in countries most affected by rapid climate change. As a result of climate change in Ukraine, there is a negative process of deterioration of natural moisture conditions, as a result of which areas of excessive moisture are disappearing in the Polissya zone, and the process of desertification has begun in the south. Ground-based measurements to assess changes in the area of water bodies are an expensive and resource-intensive approach, which is particularly difficult in remote areas. The article discusses the main methods of automated mapping of changes in water bodies using remote sensing data. The use of heterogeneous data in combination with a combination of methods based on spectral indices and machine learning demonstrates the

best results. The article discusses automated mapping methods using remote monitoring and the applicability of these methods for analysing water resources in Ukraine. The main classical methods are based on the use of spectral indices, machine learning and image thresholding. The use of heterogeneous data in combination with a combination of methods demonstrates the best results. It should be noted that such methods do not allow obtaining an accurate threshold value for relatively small water bodies. The method of mapping surface waters using radar images and the method of selecting the optimal threshold, the reference water mask, showed the best results.

Keywords: water resources, water bodies, automated mapping, satellite monitoring, remote sensing methods, spectral indices, machine learning

Кавац Олена Олександрівна — к.т.н., доц., доцент кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

Кавац Юрій Віталійович — к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

Сергєєва Катерина Леонідівна — к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Рой Дмитро Миколаєвич — аспірант кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

Kavats Olena Oleksandrivna — Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

Kavats Yuriy Vitaliiovych — Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

Kateryna Sergieieva — Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Computer Engineering of Dnipro University of Technology.

Roi Dmytro — graduate student of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.