

О.О. Кавац, Ю.В. Кавац, К.Л. Сергєєва, Д.М. Рой

## ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО КАРТУВАННЯ ВОДНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ОСНОВІ СПЕКТРАЛЬНИХ ІНДЕКСІВ

*Анотація.* У роботі проведені дослідження з оцінки точності автоматизованого виділення поверхневих вод на основі спектральних водних індексів у поєднанні з методом порозування *Оцу* для території, що зазнали техногенної катастрофи після руйнування Каховської ГЕС. Використано оптичні супутникові знімки *Sentinel-2* та оцінено точність маскування водних об'єктів, які мають гетерогенні властивості. Проаналізовано основні водні індекси з автоматичним визначенням оптимального порогу за методом *Оцу*. Встановлено, що *MNDWI* забезпечує найвищу точність визначення меж водних поверхонь для малих об'єктів зі складними неоднорідними контурами, тоді як *AWEI* демонструє високу чутливість до дрібних водойм. Отримані результати підтверджують доцільність поєднання спектральних індексів з автоматизованим порозуванням за методом *Оцу* для оперативного моніторингу водних об'єктів у динамічно трансформованих ландшафтах.

*Ключові слова:* водні ресурси, водні поверхні, водойми, автоматизоване картування, супутниковий моніторинг, методи ДЗЗ, геопросторові данні, спектральні індекси, метод *Оцу*, *Sentinel-2*.

**Вступ.** Водні ресурси є критично важливим елементом для забезпечення сталого розвитку країни, підтримання екологічної рівноваги та гарантування продовольчої безпеки. В умовах глобальних і регіональних змін спостерігається суттєве погіршення стану водних екосистем, що підкреслює необхідність їхнього постійного, системного та високоточного моніторингу. Одним із основних чинників цих змін є глобальне потепління, яке спричиняє підвищення середньорічних температур, збільшення частоти й інтенсивності посушливих періодів, зменшення річкового стоку та деградацію водноболотних угідь [1-4].

За даними Українського гідрометеорологічного інституту, протягом останніх трьох десятиліть середньорічна температура повітря в Україні зросла приблизно на 1,2 °С, що перевищує середні глобальні темпи потепління та є вищим за показники більшості регіонів Європи. Незважаючи на стабільність річної кількості опадів, підвищення потенційної випаровуваності призводить до зростання дефіциту вологи та погіршення водного балансу, що підсилює водний стрес на території країни [5].

Прогнозні кліматичні моделі свідчать про подальше зростання температури: очікується підвищення на 1,2–1,5 °С до 2050 року та на 2,9–3,3 °С до кінця XXI

століття залежно від сценаріїв викидів парникових газів [5]. Одночасно передбачається зміна просторово-часового розподілу опадів: їх збільшення у зимовий період та зменшення влітку й восени, особливо в південних та східних регіонах. Сукупність таких тенденцій – подовження теплого сезону, зростання частоти теплових хвиль, нерівномірний розподіл опадів та інтенсифікація випаровування – призводить до суттєвих змін гідрологічного режиму, поглиблення проблеми посух, зниження рівнів ґрунтових вод і деградації малих водойм.

Антропогенні фактори також сприяють погіршенню стану водних екосистем. Зокрема, активні військові дії, спричинені повномасштабним вторгненням росії на територію України, які супроводжуються руйнівними наслідками для інфраструктури, значно змінюють гідроморфологічні умови водних об'єктів. Прикладом є руйнування Каховської ГЕС, яке призвело до екологічної катастрофи та зміни гідрологічних параметрів Дніпровського каскаду, зумовивши втрату значних площ водного дзеркала, трансформацію берегової лінії та порушення структури прибережних екосистем.

У цих умовах зростає потреба у застосуванні високоточних методів картографування водних об'єктів, зокрема на основі даних дистанційного зондування Землі. Визначення точних просторових меж водних поверхонь є важливим етапом для ефективного управління водними ресурсами, оцінки ризиків, розроблення природоохоронних заходів і стратегій адаптації до змін клімату та техногенних впливів.

**Постановка проблеми.** Традиційні методи отримання даних про стан і конфігурацію водних об'єктів, зокрема геодезичні вимірювання та польові гідрологічні обстеження, характеризуються високою трудомісткістю, значними витратами та низкою обмежень в умовах важкодоступних територій. Крім того, під час активних бойових дій їх ефективність значно знижується через ризики для персоналу та фізичну недосяжність окремих ділянок, що ускладнює оперативне здійснення моніторингу.

Завдання ускладнюється в регіонах із трансформованими ландшафтами. Після техногенної катастрофи на Каховській ГЕС на території колишнього Каховського водосховища виник високо фрагментований водний ландшафт, представлений численними дрібними водоймами, які частково заросли молодими деревами, утворюючи густу рослинність. Крім того, річка Дніпро повернулася до свого історичного русла, що призвело до суттєвих змін у гідроморфологічних характеристиках території. Така просторово-структурна неоднорідність, що поєднує відкриті водойми, заболочені ділянки та заліснені території, значно ускладнює точну ідентифікацію водних поверхонь за спектральними ознаками.

У цьому контексті особливе значення набувають методи дистанційного зондування Землі, які дозволяють здійснювати регулярне, масштабне і безпечно отримання інформації про просторовий розподіл водних об'єктів. Однак точність автоматизованого вилучення водних поверхонь значною мірою залежить від специфіки вибраних спектральних індексів та алгоритмів порогування, що безпосередньо впливають на визначення меж водних об'єктів. За таких умов виникає необхідність у науково обґрунтованій оцінці точності результатів картографування, отриманих за допомогою водних спектральних індексів, у порівнянні з масками, сформованими шляхом автоматизова-

ного порогоування за методом Оцу [6, 7]. Це дозволить визначити точність, надійність і придатність таких методів для застосування в умовах високої гідрологічної та ландшафтної динаміки, що характерні для територій, змінених під впливом техногенних катастроф, на прикладі акваторії Каховського водосховища.

**Мета дослідження** полягає в оцінці точності автоматизованого виділення поверхневих вод на основі спектральних індексів із використанням методу порогоування Оцу для території Каховського водосховища. Дослідження спрямоване на визначення ефективності індексного підходу в умовах різко зміненого гідрологічного режиму після руйнування Каховської ГЕС та на встановлення оптимальних методів картування водних об'єктів у динамічно трансформованих ландшафтах.

**Основна частина.** Посилення антропогенного впливу, прискорення кліматичних змін та нерівномірний просторово-часовий розподіл опадів формують складні виклики для ефективного управління водними ресурсами України, особливо в регіонах, чутливих до дефіциту вологи. За цих умов зростає потреба в регулярному, високоточному й технологічно обґрунтованому моніторингу стану та площі поверхневих вод, що є основою збалансованого водокористування, підтримання гідрологічної рівноваги та планування адаптаційних заходів.

Традиційні польові методи – геодезичні зйомки та гідрологічні обстеження – хоча й забезпечують високий рівень просторової деталізації, залишаються трудомісткими, ресурсоемними та залежними від доступності місцевості. Їх застосування суттєво ускладнюється у віддалених і техногенно трансформованих районах, а також у зонах активних бойових дій. На цьому тлі оптичні супутникові дані Sentinel-2 відкривають можливість отримання систематичних, стандартизованих і просторово репрезентативних спостережень, що робить їх одним із ключових інструментів сучасного гідроекологічного супутникового моніторингу.

Ландшафт колишнього Каховського водосховища після руйнування Каховської ГЕС перетворився на складну просторову мозаїку, що поєднує оголені ділянки, мулові поверхні, заболочені масиви, молоді насадження й численні дрібні водойми. Така гетерогенність значно ускладнює автоматизоване спектральне виділення води, оскільки спектральні характеристики підстилаючої поверхні різко варіюють у межах коротких відстаней. Територія, трансформована внаслідок техногенної катастрофи, вирізняється високою спектральною неоднорідністю, що потребує ретельно підібраних інструментів для коректної ідентифікації водних поверхонь.

Спектральні водні індекси залишаються одним із базових інструментів дистанційного картографування водних об'єктів, адже дозволяють виокремлювати водні поверхні на основі відмінностей у їх спектральних характеристиках. Проте чутливість кожного індексу до взаємодії води з рослинністю, ґрунтами чи антропогенними об'єктами істотно впливає на кінцевий результат. Додатково ситуація ускладнюється в умовах тіней, змішаних пікселів і фрагментованої берегової лінії, що створює потребу у використанні індексів із підвищеною спектральною селективністю. Для цього широко застосовують спектральні індекси, які базуються на контрасті між відбивною здатністю

води, ґрунтів та рослинності [8-12]. Серед них Normalized Difference Water Index (NDWI) розраховується за формулою:

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

де NIR – коефіцієнти відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектру, Green – у зеленому. Ефективний для відкритих водних акваторій, проте чутливий до впливу рослинності та урбанізованих поверхонь.

Свій розвиток отримав Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), який забезпечує більш точне виділення водних об'єктів на супутникових знімках, ніж стандартний NDWI [10-12]. Індекс MNDWI розраховується за формулою:

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

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

Заміна NIR на SWIR підвищує точність виділення води в умовах фрагментованих і техногенно модифікованих ландшафтів.

Широкого застосування набув індекс автоматичного виділення води Automated Water Extraction Index (AWEI). AWEI дозволяє підвищити точність автоматичного виділення водних об'єктів на супутникових зображеннях, особливо в умовах тіней, урбанізованих територій та змішаних пікселів. AWEI описується такими формулами, адаптованими під різні типи поверхонь [8-12]. Для територій без тіней:

$$AWEI_{sh} = 4 * (Green - SWIR1) - (0.25 * NIR + 2.75 * SWIR2), \quad (3)$$

Для ділянок із тінями:

$$AWEI_{sh} = Blue + 2.5 * Green - 1.5 * (NIR + SWIR1) - 0.25 * SWIR2, \quad (4)$$

де NIR – коефіцієнти відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектру; Green, Blue – у зеленому та синьому, відповідно; SWIR1, SWIR2 - коефіцієнти відбиття у короткохвильовому інфрачервоному спектрі.

AWEI демонструє стійкість до змішаних пікселів, рельєфної неоднорідності та умов, притаманних ландшафтам, зміненим техногенною катастрофою.

Для автоматизованого отримання масок поверхневих вод застосовано метод Оцу, що дозволяє автоматично визначати оптимальне порогове значення на основі мінімізації внутрішньокласової дисперсії між групами пікселів. Такий підхід усуває суб'єктивність ручного вибору порогів, що є критично важливим у спектрально неоднорідних середовищах, сформованих внаслідок техногенної трансформації території. Поєднання спектральних індексів із автоматизованим порогоуванням забезпечує можливість створення репрезентативних масок водної поверхні навіть у складних умовах

гідродинамічної неоднорідності, трансформованих внаслідок техногенних катастроф. На рисунку 1 наведено супутникове зображення Sentinel-2 за червень 2022 року – через два тижні після техногенної катастрофи – та за рік, у червні 2023 року.



Рисунок 1 – Супутникове зображення Sentinel-2:

- а) RGB-комполит за червень 2022 року;
- б) RGB-комполит за червень 2023 року

На супутникових зображеннях чітко відображається гідрологічна неоднорідність території Каховського водосховища, що виникла внаслідок техногенної катастрофи.

Порівняльний аналіз спектральних масок води, наведений на рисунку 2, сформованих на основі різних індексів, підтвердив суттєву залежність ефективності їх роботи від спектральної конфігурації каналів та особливостей просторової структури досліджуваної території. Отримані результати свідчать, що використання SWIR-діапазону (насамперед каналів SWIR1 та SWIR2 Sentinel-2) істотно підвищує контрастність між водними об'єктами та навколишніми поверхнями, що безпосередньо впливає на точність подальших індексних розрахунків.

Найбільш стабільну якість класифікації продемонстрував індекс MNDWI, який, завдяки залученню SWIR 1, забезпечує чітке відокремлення води навіть у випадку дрібних водойм, ділянок із низькою відбивною здатністю та локально затемнених зон. В умовах складної морфологічної структури — зокрема, тіньових фрагментів, уривчастих берегових ліній та ділянок із підвищеною неоднорідністю — найбільш ефективним виявився індекс AWEI<sub>sh</sub>. Його здатність компенсувати вплив оптичних артефактів та зашумлених пікселів SWIR-діапазону дозволила мінімізувати хибнопозитивні результати класифікації. Індекс NDWI, побудований без використання SWIR-каналів, продемонстрував нижчу стійкість: спостерігалася тенденція до недооцінки площі водойм, частково перекритих рослинністю або змішаними типами поверхонь. Таким чином найменше значення площі води на дослідній ділянці Каховського водосховища, отримано для NDWI (15.88 км<sup>2</sup>), що зумовлено його схильністю недооцінювати водні об'єкти, особливо за наявності змішаних пікселів. Індеси MNDWI та AWEI (sh/nsh) показали значно більші площі — від 31.86 до 44.68 км<sup>2</sup>, що відповідає їхній здатності ефективно придушувати фонові сигнали та виділяти водні маси навіть у складних умовах спостереження.

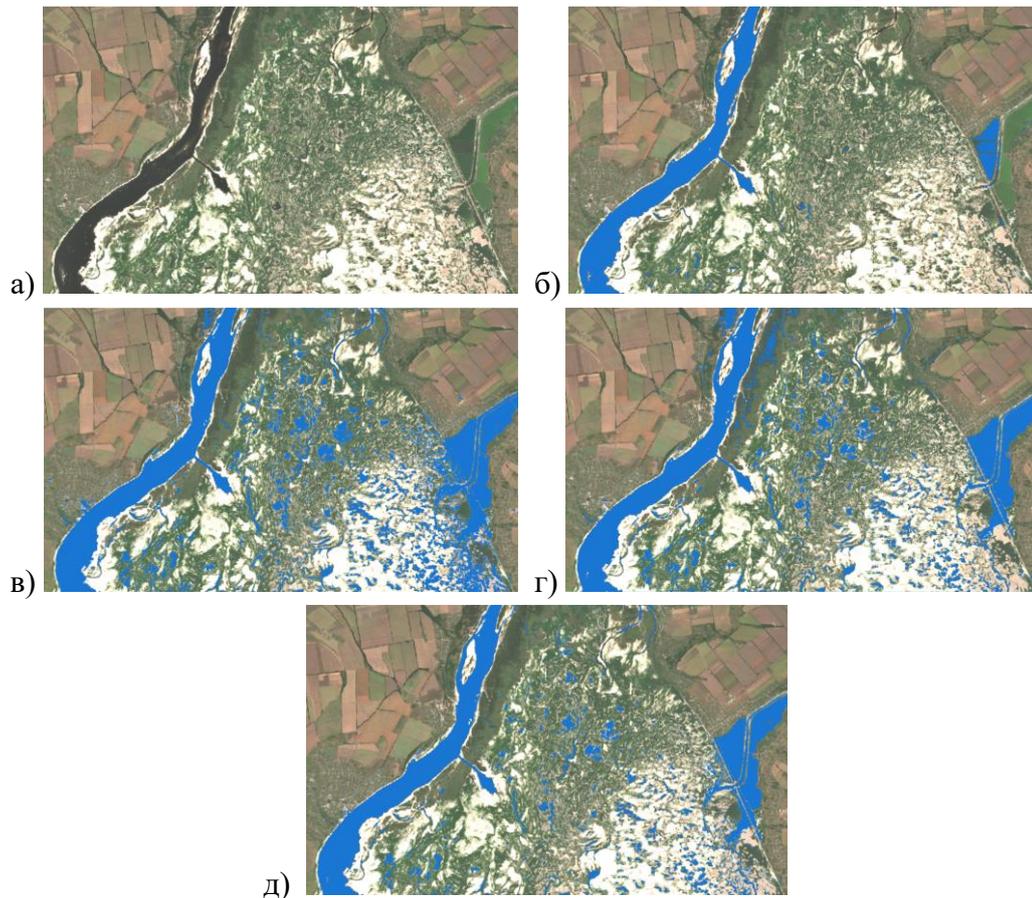


Рисунок 2 – Супутникове зображення Sentinel-2 за 20.06.2023 та отримана маска води за спектральними індексами із застосуванням автоматизованого порогоування за методом Оцу: а) RGB -компонент; б) маска води на основі NDWI\_Оцу; в) маска води на основі  $AWEI_{sh}$ \_Оцу; г) маска води на основі  $AWEI_{h}$ \_Оцу; д) маска води на основі MNDWI\_Оцу

Для оцінки точності отриманих масок на основі спектральних індексів з автоматизованим порогоуванням за методом Оцу проводилося обчислення за класичними метриками з використанням еталонної маски. Графічне представлення отриманих метрик наведено на рисунку 3.

Порівняння з еталонною маскою, побудованою на основі GSW та Sentinel-2 (27.35 км<sup>2</sup>), побудованою на основі GSW та Sentinel-2, показало, що MNDWI забезпечує найкращий баланс показників: Precision = 83.50%, Recall = 97.30%, F1 = 89.87%, Overall Accuracy = 97.61%,  $\kappa = 0.885$ . Особливу практичну цінність має потенціал комбінованих масок, сформованих на основі MNDWI та AWEI. Для територій, які зазнали техногенних катастроф, характерні сильна спектральна неоднорідність, наявність змішаних пікселів «вода–рослинність», «вода–мул», домішки техногенних матеріалів та осадів. В таких умовах застосування одного індексу може бути недостатньо стабільним. Поєднання високої повноти AWEI та здатності MNDWI ефективно придушувати міські та ґрунтові шуми може забезпечити точніше відтворення просторової структури водних поверхонь і покращити надійність класифікації.

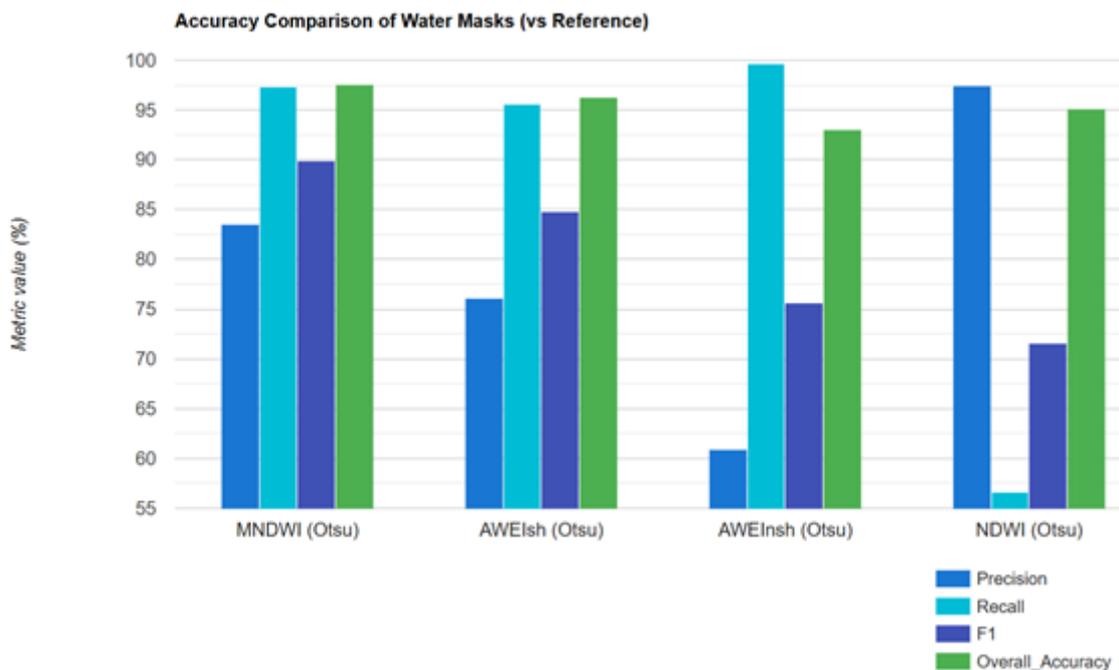


Рисунок 3 – Графічне представлення оцінки точності отриманих результатів

**Висновки.** Проведене дослідження продемонструвало, що спектральні індекси на основі оптичних даних Sentinel-2 у поєднанні з автоматизованим пороговнням за методом Оцу є ефективним інструментом для оперативного моніторингу та детекції поверхневих вод у спектрально неоднорідних умовах, характерних для територій, що зазнали техногенних катастроф. Порівняння водних індексів показало суттєві відмінності у їх здатності коректно відтворювати гідрологічну структуру, при цьому найвища узгодженість із еталоном спостерігалася для масок, отриманих на основі MNDWI. Індекси сімейства AWEI засвідчили високу чутливість до дрібних та слабо контрастних водних об'єктів, що робить їх корисними у складних техногенно трансформованих ландшафтах. NDWI, навпаки, продемонстрував обмеження у точності для зон зі змішаними або затемненими пікселями. Отримані результати вказують на доцільність використання комбінованих масок, побудованих на основі MNDWI та AWEI, що може забезпечити кращий баланс між повнотою та достовірністю. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку адаптивних методів інтеграції індексів, здатних підвищити якість супутникового моніторингу водних поверхонь у складних антропогенно змінених середовищах.

**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.; Lanza, 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-до переліку заходів, реалізації яких сприятиме забезпеченню водної та продо-волчої 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%20%D0%B4%D0%BE%20%25>. (дата звернення: 11.04.2025).
6. 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]
7. 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]
8. 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]
9. 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]
10. 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]
11. 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>.
12. K Sergieieva, O Kavats, V Vasyliiev, 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.

Received 03.12.2025.

Accepted 11.12.2025.

***Assessment of the accuracy of automated mapping methods  
for water surfaces based on spectral indices***

*The paper presents a comprehensive analysis of the effectiveness of Sentinel-2 spectral water indices in combination with automated thresholding using the Otsu method for mapping surface waters in areas affected by man-made disasters. The object of the study was the water area of the former Kakhovka Reservoir, whose landscape after the destruction of the Kakhovka HPP is characterized by pronounced spectral heterogeneity, the presence of mixed pixels, and a fragmented shoreline. Sentinel-2 optical images of medium spatial resolution were used for the analysis, which made it possible to assess the impact of spatial and structural heterogeneity of landscapes, including fragmented water bodies, wetlands, bare soil, and young vegetation. Four spectral indices – NDWI, MNDWI, AWEIsh, and AWEInsh – were used to evaluate water delineation effectiveness, followed by automatic determination of the optimal threshold using the Otsu method.*

*Comparison of the resulting masks with reference data showed that MNDWI provides the highest accuracy and overall consistency, while the AWEI indices exhibit increased sensitivity to small and low-contrast water bodies. NDWI demonstrated limitations under spectrally complex conditions, particularly in the presence of vegetation and turbid surfaces.*

*The obtained results emphasize the importance of using Sentinel-2 SWIR channels to increase the contrast of water features and confirm the feasibility of combining the MNDWI and AWEI indices. This approach improves the completeness and reliability of mapping in areas affected by man-made disasters. The study demonstrates the potential of automated satellite monitoring methods to support hydro-ecological management in complex anthropogenically modified environments. The proposed methodology can serve as a basis for further work on water mapping, water-use planning, and developing adaptation strategies for water-landscape transformations.*

*Keywords: water resources, water surfaces, reservoirs, automated mapping, satellite monitoring, remote sensing methods, geospatial data, spectral indices, Otsu method, Sentinel-2.*

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0172-7856>

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0180-5957>

**Сергеєва Катерина Леонідівна** - к.т.н., доц., доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7345-2209>

**Рой Дмитро Миколайович** - аспірант кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1281-8632>

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0172-7856>

**Kavats Yurii Vitaliiovich** - Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0180-5957>

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7345-2209>

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

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1281-8632>