

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МОНІТОРИНГУ ДИНАМІКИ ЗМІН ТА
ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ**

Кавац Ю.В.¹ [ORCID], Кавац О.О.² [ORCID],

Фененко Т.М.³ [ORCID], Рой Д.М.⁴ [ORCID]

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

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

³ Український державний університет науки і технологій,

старший викладач, Україна

⁴ Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

Анотація. У дослідженні запропоновано методологічний підхід до комплексного супутникового моніторингу водних ресурсів на основі інтеграції двох математичних моделей. Особливу увагу приділено застосуванню моделей у межах складних посткатастрофічних ландшафтів, зокрема території колишнього Каховського водосховища. Гетерогенність таких зон, що поєднують оголені мулові поверхні, заболочені масиви та молоду рослинність, зумовлює високу спектральну неоднорідність і ускладнює автоматизоване виділення води. Перша модель базується на синергії оптичних і радарних даних для точного картування меж водойм в умовах різкої варіації характеристик підстилаючої поверхні. Для підвищення точності поєднано адаптивні спектральні індекси з методами машинного навчання. Друга модель орієнтована на оцінку ступеня забруднення поверхневих вод. Використання різночасових супутникових даних дозволяє аналізувати просторово-часову динаміку об'єктів та встановлювати взаємозв'язки між трансформацією ландшафтів і рівнем їх екологічного навантаження, забезпечуючи стійкість моніторингу до впливу зовнішніх чинників.

Ключові слова. Водні ресурси, супутниковий моніторинг, спектральні індекси, оцінка стану забруднення.

Вступ. Україна посідає одне з провідних місць серед європейських країн за рівнем дефіциту водних ресурсів [1]. Основним джерелом поповнення водних запасів є атмосферні опади, однак сучасні кліматичні зміни призводять до зменшення їх кількості та нерівномірного розподілу протягом року. Зокрема, упродовж останнього десятиліття спостерігається тенденція до

зниження обсягів літніх опадів, що спричиняє підвищення концентрації забруднювальних речовин у поверхневих водах [1-2].

Суттєвий вплив на стан водних ресурсів також здійснює антропогенна діяльність. Основними джерелами забруднення залишаються підприємства промисловості, об'єкти житлово-комунального господарства та аграрний сектор. Значна частина агрохімікатів потрапляє у водойми через поверхневий і підземний стік, що ускладнює оцінку реального рівня екологічного навантаження.

Поверхневі води є динамічними природними системами, просторово-часові зміни яких безпосередньо впливають на стан довкілля. Це обумовлює необхідність розробки методів моніторингу, здатних одночасно враховувати як якісні характеристики води, так і зміни геометрії водних об'єктів.

Сучасні технології дистанційного зондування Землі відкривають нові можливості для вирішення зазначених задач. Супутникові дані дозволяють здійснювати регулярний моніторинг великих територій із високою просторовою та часовою деталізацією. Це визначає доцільність створення інтегрованих математичних моделей, які поєднують аналіз динаміки водних об'єктів та оцінку їх екологічного стану.

Основна частина. Сучасні задачі моніторингу водних об'єктів вимагають комплексного підходу, який враховує як просторову динаміку водойм, так і зміни їх екологічного стану [3-4]. Традиційні методи картування водних поверхонь переважно базуються на використанні спектральних індексів, таких як NDWI, MNDWI, AWEI та їх різноманітні модифікації. Вони дозволяють ефективно виділяти водні об'єкти на оптичних супутникових знімках за рахунок специфічних спектральних властивостей води.

Разом з тим, застосування лише спектральних індексів має ряд обмежень. Зокрема, їх точність суттєво знижується в умовах наявності хмарності, тіней, сезонних змін рослинності, а також при високому рівні каламутності води або наявності домішок. Крім того, складні гідрологічні умови та антропогенний вплив можуть призводити до спектральної невизначеності, що ускладнює процес класифікації.

У зв'язку з цим доцільним є використання комбінованих підходів, які поєднують спектральні індекси з іншими методами обробки даних. У роботі запропоновано підхід, що базується на інтеграції декількох джерел інформації та методів аналізу.

Перша складова моделі передбачає використання оптичних супутникових даних Sentinel-2 для розрахунку набору спектральних індексів. На їх основі формується початкове наближення маски водних об'єктів. Для підвищення точності картування застосовується комбінування декількох індексів та використання адаптивних порогових значень, що враховують сезонні та регіональні особливості вбо пост катастрофічні зміни [5].

Другою важливою складовою є використання радарних супутникових даних Sentinel-1, які не залежать від погодних умов та освітленості. Це дозволяє забезпечити безперервність моніторингу та підвищити достовірність визначення меж водних об'єктів, особливо в умовах хмарності або у періоди несприятливих метеорологічних умов. Радарні знімки є особливо ефективними для виявлення затоплених територій та змін рівня води.

Інтеграція оптичних та радарних даних здійснюється в рамках єдиної моделі, що дозволяє зменшити невизначеність класифікації та підвищити стійкість результатів до зовнішніх факторів.

Наступним етапом є застосування методів машинного навчання для уточнення результатів картування. Використання алгоритмів класифікації (таких як Random Forest, Support Vector Machines, нейронні мережі) дозволяє враховувати нелінійні залежності між спектральними ознаками та типами поверхні [7-8]. Вхідними даними для таких моделей можуть виступати як спектральні канали, так і розраховані індекси, текстурні характеристики та радарні параметри.

Застосування методів машинного навчання дозволяє:

- підвищити точність класифікації водних об'єктів;
- зменшити вплив шумів та спотворень;
- автоматизувати процес обробки великих обсягів супутникових даних;
- адаптувати модель до різних природно-кліматичних умов.

Таким чином, перша математична модель набуває вигляду гібридної системи, що поєднує спектральні індекси, мультисенсорні дані та методи машинного навчання для визначення меж водних об'єктів і аналізу їх динаміки.

Друга математична модель спрямована на оцінку ступеня забруднення водних об'єктів. В її основі лежить використання спектральних індексів, чутливих до змін якості води. До таких індексів належать індекси, що відображають концентрацію завислих речовин (NDTI), хлорофілу (CI, NDChl), органічних домішок (CDOM) тощо [5].

Для підвищення достовірності оцінювання доцільним є використання комбінації декількох індексів, а також аналіз їх змін у часі. Це дозволяє виявляти аномалії, пов'язані з антропогенним впливом, зокрема внаслідок військових дій, техногенних аварій або інтенсивного сільськогосподарського використання територій.

Особливу увагу приділено використанню різночасових супутникових даних, що дає змогу формувати часові ряди та аналізувати динаміку змін як площ водних об'єктів, так і показників їх забруднення. Такий підхід дозволяє переходити від статичного аналізу до динамічного моніторингу.

Інтеграція двох моделей — картування водних об'єктів та оцінки їх забруднення — дозволяє отримати комплексну інформацію про стан водних ресурсів. Це дає можливість встановлювати взаємозв'язки між змінами площ водойм і рівнем їх екологічного навантаження.

Запропонований підхід є особливо актуальним для територій з обмеженим доступом або підвищеним рівнем небезпеки, де проведення наземних вимірювань є ускладненим або неможливим.

Висновки. В роботі запропоновано підхід до комплексного супутникового моніторингу водних об'єктів, що базується на поєднанні двох математичних моделей. Перша модель забезпечує картування меж водних об'єктів і аналіз динаміки їх змін на основі різночасових супутникових даних. Друга модель передбачає використання спектральних індексів для оцінки рівня забруднення поверхневих вод.

Інтеграція результатів моделей дозволяє здійснювати всебічний аналіз стану водних ресурсів та отримувати більш повну і об'єктивну інформацію про їх екологічний стан. Запропонований підхід може бути використаний для моніторингу територій з обмеженим доступом, а також у кризових умовах.

Подальші дослідження будуть спрямовані на використання часових рядів супутникових даних, розширення набору спектральних індексів, а також застосування методів машинного навчання для підвищення точності і автоматизації процесів аналізу динаміки водних об'єктів та оцінки їх забруднення.

ЛІТЕРАТУРА

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. Кавац О.О., Кавац Ю.В., Сергеева К.Л., Фененко Т.М., Дебрій Д.А. Супутниковий моніторинг та оцінка ступеня забрудненості водойм під впливом військових дій. *Системні технології*. 2025, 4(159), 114–124. [Google Scholar]
6. Кавац О.О., Кавац Ю.В., Сергеева К.Л., Рой Д.М. Оцінка точності автоматизованого картування водних поверхонь на основі спектральних індексів, *Регіональний міжвузівський збірник наукових праць «Системні технології»* 1(162)2026, стр. 36-45. [Google Scholar]
7. Kavats, O.; Khramov, D.; Sergieieva, K. Surface Water Mapping from SAR Images Using Optimal Threshold Selection Method and Reference Water Mask. *Water* 2022, 14(24), 4030. [Google Scholar]
8. Sergieieva, K.; Kavats, O.; Vasyliiev, V.; Kavats, Y.; Kovro, O. Machine learning-based monitoring of war-damaged water bodies in Ukraine using satellite images. *CEUR Workshop Proc.* 2024, 3790, 422–434. [Google Scholar].

MATHEMATICAL MODELS FOR MONITORING THE DYNAMICS OF CHANGES AND POLLUTION OF WATER BODIES BASED ON SATELLITE DATA

Yurii Kavats, Olena Kavats, Tatjana Fenenko, Dmytro Roi

Abstract. *The study proposes a methodological approach to complex satellite monitoring of water resources based on the integration of two mathematical models. Particular attention is paid to the application of models within complex post-catastrophic landscapes, in particular the territory of the former Kakhovka reservoir. The heterogeneity of such zones, which combine bare silt surfaces, wetlands and young vegetation, causes high spectral heterogeneity and complicates automated water extraction. The first model is based on the synergy of optical and radar data for accurate mapping of reservoir boundaries in conditions of sharp variation in the characteristics of the underlying surface. To increase accuracy, adaptive spectral indices are combined with machine learning methods. The second model is focused on assessing the degree of surface water pollution. The use of multi-temporal satellite data allows analyzing the spatio-temporal dynamics of objects and establishing relationships between landscape transformation and the level of their ecological load, ensuring the stability of monitoring to the influence of external factors.*

Keywords: *Water resources, satellite monitoring, spectral indices, pollution assessment.*

REFERENCE

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. Kavats O.O., Kavats Yu.V., Serhieieva K.L., Fenenko T.M., Debrii D.A. Suputnykovyi monitorynh ta otsinka stupenia zabrudnenosti vodoim pid vplyvom viiskovykh dii. *Systemni tekhnolohii*. 2025, 4(159), 114–124. [Google Scholar]
6. Kavats O.O., Kavats Yu.V., Serhieieva K.L., Roi D.M. Otsinka tochnosti avtomatyzovanoho kartuvannia vodnykh poverkhon na osnovi spektralnykh indeksiv, Rehionalnyi mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats «Systemni tekhnolohii» 1(162)2026, str. 36–45. [Google Scholar]
7. Kavats, O.; Khramov, D.; Sergieieva, K. Surface Water Mapping from SAR Images Using Optimal Threshold Selection Method and Reference Water Mask. *Water* 2022, 14(24), 4030. [Google Scholar]
8. Sergieieva, K.; Kavats, O.; Vasyliiev, V.; Kavats, Y.; Kovro, O. Machine learning-based monitoring of war-damaged water bodies in Ukraine using satellite images. *CEUR Workshop Proc.* 2024, 3790, 422–434. [Google Scholar].