

О.О. Кавац, Ю.В. Кавац, Д.А. Дібрій

АНАЛІЗ МЕТОДИК ОЦІНКИ СТУПЕНЮ ЗАБРУДНЕНOSTІ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація. В статті розглянуті основні методи моніторингу водних об'єктів їх стану забруднення та оцінка якості води. Загальноприйняті, стандартизовані методи оцінювання якості води в водних об'єктах, включають в себе наземний набір зняття проб, що в певних умовах не відповідає оперативності та є дорогорартісним. Розвиток сучасних інформаційних технологій дозволяє використовувати різноманітні інструменти та набори даних, які застосовуються при проведенні супутникового моніторингу із певною періодичністю. Наявність архівних даних відкриває можливість порівнювати отримані результати та аналізувати чинники впливу на стан водних об'єктів. В роботі описано основні методи та набори даних, які можна використовувати для застосування методів дистанційного моніторингу на основі машинного навчання. Проаналізовано приклади застосування дистанційного підходу щодо оцінки ступеню забрудненості водних об'єктів на великих територіях .

Ключові слова: водні об'єкти, водойми, супутниковий моніторинг, оцінка стану забруднення, екологічне навантаження, методи ДЗЗ, машинне навчання, валідація, Landsat 8.

Постановка проблеми. За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, понад 60% водойм України забруднені, зокрема, це стосується річок. Для України водні ресурси є важливим джерелом питної води та використовуються в багатьох галузях промисловості і агросекторі. Через це забруднення водойм може впливати на здоров'я людей, тварин та шкодить екосистемі країни. Аналіз екологічного стану водойм України дає змогу окреслити основні проблеми з якими стикається навколишнє середовище. Забруднення водних об'єктів внаслідок скидання стічних вод, промислових відходів в прилеглі водойми, зміна русел річок призводить до їх обміління, заболочування і як наслідок цвітіння. Порушення норм розташування у прибережних зонах пахотних сільськогосподарських земель сприяє потраплянню в воду добрив та хімікатів, які використовуються при обробці сільськогосподарських рослин. Окремою проблемою з якою наразі стикається Україна під час повномасштабної війни - це руйнування гідрологічних споруд,

що призводить до забруднення та виснаження водноресурсного потенціалу. Всі ці чинники впливають на якість прісної води.

Сьогодні не існує загальноприйнятого єдиного й універсального методу оцінювання якості води в водних об'єктів, ступеня їх забруднення. Одним з основних методів моніторингу якості води у водоймах є спостереження на місці, що вимагає значних ресурсів через необхідність встановлювати контролююче обладнання у декількох точках водойм та постійного подальшого аналізу зразків у лабораторії. Якість води напряму впливає на флору і фауну, тому якісний та швидкий аналіз якості води у водних об'єктах є важливою складовою екологічної безпеки країни. Саме тому оцінка стану ступеня забрудненості водних об'єктів є актуальною проблемою, яка може знайти вирішення завдяки застосуванню сучасних інформаційних технологій та супутникового моніторингу.

Мета дослідження полягає у виборі методики оцінки ступеня забруднення водних об'єктів України. Для цього необхідно розглянути методики оцінки ступеня забруднення водних об'єктів, якості води, визначити коло доступних даних, на які можна спиратися, а також виконати аналіз підходів до вирішення подібних завдань та проблем, що виникають при їх реалізації.

Основна частина. Прісна вода є життєво важливим ресурсом для навколишнього середовища та людства. Велика кількість прісної води зберігається у внутрішніх водоймах країни. Якість води внутрішніх водойм дуже вразлива до розвитку економіки, зростання населення та землекористуванню. В останні роки у світі спостерігається тенденція дефіциту прісної води, однією із глобальних причин виникнення якої є забруднення. Моніторинг якості води та її параметрів у внутрішніх водоймах є важливим для захисту ресурсів прісної води та управління ними. Відповідно до Водної рамкової директиви Європейського Союзу (ВРД ЄС), екологічний стан водойми оцінюється на основі трьох основних груп параметрів: гідробіологічних, гідрохімічних і гідроморфологічних [3].

У рамках державної системи моніторингу довкілля України оцінювання якості поверхневих вод ведеться окремо за гідрохімічними й гідробіологічними показниками. Основний принцип оцінювання якості водного середовища, що використовується вже тривалий час у водоохоронній практиці нашої країни, полягає в визначенні в окремих точках водного об'єкта хімічного складу, фізичних властивостей і бактеріологічних показників води та

зіставлення результатів з нормативними величинами відповідних показників [1-4].

Однак традиційні методи моніторингу, які в широкому сенсі визначаються як спостереження на місці, вважаються надто дорогими для використання в місцевому середовищі для визначення різноманітних просторово-часових характеристик. Це неминуче створює проблему для оперативного реагування на події пов'язані з водним середовищем і проблемами громадського здоров'я.

Враховуючи дороговартість та складність отримання показників особливо у зонах бойових дій, постає актуальна задача по розробці інформаційної технології із залученням різнорідних даних дистанційного зондування Землі.

На сьогодні численні дослідження показали великий потенціал і корисність методів дистанційного зондування для покращення та оперативного отримання інформації про характеристики навколишнього середовища в різних часових і просторових масштабах. Супутники, обладнані різними оптичними та тепловими датчиками, є перспективними в порівнянні з вимірюванням на місці, оскільки забезпечують постійно зростаючий потік геопросторових даних, що охоплюють великі території з високою роздільною здатністю, а головне більш економічним [5-14]. Гіперспектральні датчики з низькою або середньою роздільною здатністю, такі як MERIS, MODIS і SeaWiFS використовувались дослідниками протягом багатьох років для оцінки якості води та стану забрудненості водних об'єктів. В основному дослідження проводились у великих річках і озерах, лиманах і прибережних районах або в регіональному масштабі. Вищезазначені супутникові дані продемонстрували можливість та достовірність застосування супутникових даних для оцінок якості води [9, 15-19]. Тим не менш, вони не дуже підходять для моніторингу невеликих за розміром озер і річок через обмежену просторову інформацію. Багато досліджень показало ефективність багатоспектральних датчиків Landsat, у тому числі TM (Thematic Mapper), MSS (Multispectral Scanner), ETM (Enhanced Thematic Mapper) і OLI (Operational Land Imager), для пошуку зміни якості води, цей параметри є дуже важливим при оцінці стану забруднення водного об'єкту. Отримання інформації за ним дозволяє оперативно реагувати та визначати чинники впливу на навколишнє середовище. Оскільки супутникові набори даних Landsat доступні та мають відповідну часову частоту та просторову роздільну здатність. Супутникові набори даних Landsat дозволяють здійснювати щомісячний моніторинг на невеликих ділянках внутрішніх водних об'єктів і надають ключову інформацію про стан водного середовища.

Складові води, такі як хлорофіл, глибина диска Секкі (SDD), загальна зависла речовина (TSM), кольорова розчинена органічна речовина (CDOM) та інші, визначені як оптично активні змінні, широко вивчається багатьма дослідниками [20]. Однак кілька інших важливих показників є не оптично активними, наприклад хімічне споживання кисню (COD), біологічне споживання кисню (BOD), загальний азот (TN), перманганат хімічного споживання кисню (CODMn), аміак (NH₃-N) і загальний фосфору (TP), не були добре вивчені та залишаються складним аспектом комплексної оцінки якості води. Крім того, більшість попередніх досліджень, які оцінювали стан якості води в закритих водних об'єктах, рідко зосереджувалися на конкретних сезонах або залежали від балових шкал із обмеженими лабораторними аналітичними даними. Це підкреслює необхідність ефективної оцінки, як оптично активних, так і неактивних змінних і вивчення їх просторово-часових моделей.

У дослідженнях дистанційного зондування оцінки стану забруднення та якості води впроваджуються різні підходи, щоб покращити знання про водну систему. Типова методологія інтерпретації та оцінки концентрацій різних змінних еволюціонувала від методів емпіричної регресії, включаючи просту лінійну регресію та не лінійну множинну регресію, до аналізу головних компонент (PCA) і нейронних мереж [14]. Тим не менш, деякі звичайні регресійні моделі можуть бути не оптимальними, особливо коли існують складні нелінійні зв'язки між поведінкою водної системи та факторами навколишнього середовища. В останні роки, замість того, щоб змінювати класичні підходи, використання інструментів і технологій великих даних у секторі оцінки стану забруднення та якості води, стало основним. Незважаючи на те, що деякі оцінки, засновані на машинному навчанні, показали багатообіцяючі результати у вирішенні проблеми низької точності часових рядів за допомогою простих емпіричних моделей, залишається проблемою глибоке розуміння складних двонаправлених взаємодій між складовими води та сонячним випромінюванням у часовому і просторовому контексті. Технології глибокого машинного навчання дають можливість вивчати більш складні статистичні характеристики, але іноді примусово відокремлюють просторові або часові кореляційні характеристики. Недавні дослідження, присвячені оцінці екологічних факторів на основі даних, таких як вологість ґрунту, виявили, що новий підхід штучного інтелекту (AI) моделі згорткової довготривалої короткочасної пам'яті (ConvLSTM) значно перевершує класичні методи моделювання послідовностей у захопленні просторово-часові кореляції вхідних да-

них супутникових зображень. Однак спроби застосувати алгоритм ConvLSTM для визначення якості води все ще рідкісні, що підкреслює необхідність приділяти особливу увагу складному моделюванню якості води.

Той факт, що проблеми з якістю води пов'язані з багатьма екологічними та антропогенними факторами, особливо ускладнив точне прогнозування складових якості води. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку та валідацію нової регресійної моделі на основі глибинного навчання для оптично активного та неактивного моделювання якості води. Використання супутникових зображень Landsat 8 OLI дозволить проводити моніторинг з високою частотою, що є потенційно потужніше у відображенні нелінійної просторово-спектральної інформації з відносно високою просторовою роздільною здатністю.

Висновки. Розглянуто основні існуючі підходи до оцінки забрудненості та якості води в закритих прісних водоймах. Найбільш адаптованим для практичного використання на великих територіях є дистанційний підхід, який поєднує наземні та супутникові вимірювання для класифікації змін та виявлення забруднень в водних об'єктах закритого типу.

Описано набори даних з оцінками якості забрудненості води, які можна використовувати для навчання та перевірки методів машинного навчання. Освітлено методи застосування дистанційного підходу до оцінки стану прісних водойм на території України. Вказано перспективні параметри та методи машинного навчання для вирішення прикладної задачі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бреус Д.С., Левченко М.В. Методи оцінювання та нормування якості природних водних ресурсів Таврійський науковий вісник Випуск № 110. Том 2 , 2019 р. Стр.126-131.
2. Berka C. Relationships between agricultural land use and surface water quality using a GIS. Sumas River watershed, Abbotsford, B.C.MSc thesis, Resource Management and Environmental Studies, University of British Columbia, Vancouver, B.C., 1996. 174 p.
3. EPA: 1996, Environmental Indicators of Water Quality in the United States. USEPA Rep. 841-R-96-002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C.
4. EU Water Framework Directive 2000/60/EC. Official Journal of the European Communities, 22.12 2000. L 327/1. 118 p.

5. Brooks, B.W., Lazorchak, J.M., Howard, M.D., Johnson, M.V.V., Morton, S.L., Perkins, D.A., Reavie, E.D., Scott, G.I., Smith, S.A., Steevens, J.A. Are harmful algal blooms becoming the greatest inland water quality threat to public health and aquatic ecosystems, *Environ. Toxicol. Chem.* 2016, 35, 6–13.
6. Arabi, B., Salama, M.S., Pitarch, J., Verhoef, W. Integration of in-situ and multi-sensor satellite observations for long-term water quality monitoring in coastal areas. *Remote Sens. Environ.* 2020, 239, 111632.
7. Najah Ahmed, A., Binti Othman, F., Abdulmohsin Afan, H., Khaleel Ibrahim, R., Ming Fai, C., Shabbir Hossain, M., Ehteram, M., Elshafie, A. Machine learning methods for better water quality prediction. *J. Hydrol.* 2019, 578, 124084.
8. Wang, P., Yao, J., Wang, G., Hao, F., Shrestha, S., Xue, B., Xie, G., Peng, Y. Exploring the application of artificial intelligence technology for identification of water pollution characteristics and tracing the source of water quality pollutants. *Sci. Total Environ.* 2019, 693, 133440.
9. Sagan, V., Peterson, K.T., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Sloan, J., Greeling, B.A., Maalouf, S., Adams, C. Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Sci. Rev.* 2020, 205, 103187.
10. Peterson, K.T., Sagan, V., Sloan, J.J. Deep learning-based water quality estimation and anomaly detection using Landsat-8/Sentinel-2 virtual constellation and cloud computing. *GIScience Remote Sens.* 2020, 57, 510–525.
11. Wang, J.-H., Li, C., Xu, Y.-P., Li, S.-Y., Du, J.-S., Han, Y.-P., Hu, H.-Y. Identifying major contributors to algal blooms in Lake Dianchi by analyzing river-lake water quality correlations in the watershed. *J. Clean. Prod.* 2021, 315, 128144.
12. Niu, C., Tan, K., Jia, X., Wang, X. Deep learning based regression for optically inactive inland water quality parameter estimation using airborne hyperspectral imagery. *Environ. Pollut.* 2021, 286, 117534.
13. Sun, C., Chen, L., Zhu, H., Xie, H., Qi, S., Shen, Z. New framework for natural-artificial transport paths and hydrological connectivity analysis in an agriculture-intensive catchment. *Water Res.* 2021, 196, 117015.
14. Sun, X., Zhang, Y., Shi, K., Zhang, Y., Li, N., Wang, W., Huang, X., Qin, B. Monitoring water quality using proximal remote sensing technology. *Sci. Total Environ.* 2022, 803, 149805.
15. Becker, R.H., Sultan, M.I., Boyer, G.L., Twiss, M.R., Konopko, E. Mapping cyanobacterial blooms in the Great Lakes using MODIS. *J. Great Lakes Res.* 2009, 35, 447–453.

16. Hansen, C.H., Williams, G.P., Adjei, Z., Barlow, A., Nelson, E.J., Miller, A.W. Reservoir water quality monitoring using remote sensing with seasonal models: Case study of five central-Utah reservoirs. *Lake Reserv. Manag.* 2015, 31, 225–240.
17. Shi, K., Zhang, Y., Qin, B., Zhou, B. Remote sensing of cyanobacterial blooms in inland waters: Present knowledge and future challenges. *Sci. Bull.* 2019, 64, 1540–1556.
18. Ho, J.C., Michalak, A.M., Pahlevan, N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature* 2019, 574, 667–670.
19. Woolway, R.I., Kraemer, B.M., Lenters, J.D., Merchant, C.J., O'Reilly, C.M., Sharma, S. Global lake responses to climate change. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2020, 1, 388–403.
20. Bonansea, M.; Ledesma, M.; Rodriguez, C.; Pinotti, L. Using new remote sensing satellites for assessing water quality in a reservoir. *Hydrol. Sci. J.* 2019, 64, 34–44

REFERENCES

1. Breus D.S., Levchenko M.V. Metody otsiniuvannia ta normuvannia yakosti pryrodnykh vodnykh resursiv Tavriiskyi naukovyi visnyk Vypusk № 110. Tom 2 , 2019 r. Str.126-131.
2. Berka C. Relationships between agricultural land use and surface water quality using a GIS. Sumas River watershed, Abbotsford, B.C.MSc thesis, Resource Management and Environmental Studies, University of British Columbia, Vancouver, B.C., 1996. 174 p.
3. EPA: 1996, Environmental Indicators of Water Quality in the United States. USEPA Rep. 841-R-96-002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C.
4. EU Water Framework Directive 2000/60/EC. Official Journal of the European Communities, 22.12 2000. L 327/1. 118 p.
5. Brooks, B.W., Lazorchak, J.M., Howard, M.D., Johnson, M.V.V., Morton, S.L., Perkins, D.A., Reavie, E.D., Scott, G.I., Smith, S.A., Steevens, J.A. Are harmful algal blooms becoming the greatest inland water quality threat to public health and aquatic ecosystems, *Environ. Toxicol. Chem.* 2016, 35, 6–13.
6. Arabi, B., Salama, M.S., Pitarch, J., Verhoef, W. Integration of in-situ and multi-sensor satellite observations for long-term water quality monitoring in coastal areas. *Remote Sens. Environ.* 2020, 239, 111632.
7. Najah Ahmed, A., Binti Othman, F., Abdulmohsin Afan, H., Khaleel Ibrahim, R., Ming Fai, C., Shabbir Hossain, M., Ehteram, M., Elshafie, A. Machine learning methods for better water quality prediction. *J. Hydrol.* 2019, 578, 124084.
8. Wang, P., Yao, J., Wang, G., Hao, F., Shrestha, S., Xue, B., Xie, G., Peng, Y. Exploring the application of artificial intelligence technology for identification of

water pollution characteristics and tracing the source of water quality pollutants. *Sci. Total Environ.* 2019, 693, 133440.

9. Sagan, V., Peterson, K.T., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Sloan, J., Greeling, B.A., Maalouf, S., Adams, C. Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Sci. Rev.* 2020, 205, 103187.

10. Peterson, K.T., Sagan, V., Sloan, J.J. Deep learning-based water quality estimation and anomaly detection using Landsat-8/Sentinel-2 virtual constellation and cloud computing. *GIScience Remote Sens.* 2020, 57, 510–525.

11. Wang, J.-H., Li, C., Xu, Y.-P., Li, S.-Y., Du, J.-S., Han, Y.-P., Hu, H.-Y. Identifying major contributors to algal blooms in Lake Dianchi by analyzing river-lake water quality correlations in the watershed. *J. Clean. Prod.* 2021, 315, 128144.

12. Niu, C., Tan, K., Jia, X., Wang, X. Deep learning based regression for optically inactive inland water quality parameter estimation using airborne hyperspectral imagery. *Environ. Pollut.* 2021, 286, 117534.

13. Sun, C., Chen, L., Zhu, H., Xie, H., Qi, S., Shen, Z. New framework for natural-artificial transport paths and hydrological connectivity analysis in an agriculture-intensive catchment. *Water Res.* 2021, 196, 117015.

14. Sun, X., Zhang, Y., Shi, K., Zhang, Y., Li, N., Wang, W., Huang, X., Qin, B. Monitoring water quality using proximal remote sensing technology. *Sci. Total Environ.* 2022, 803, 149805.

15. Becker, R.H., Sultan, M.I., Boyer, G.L., Twiss, M.R., Konopko, E. Mapping cyanobacterial blooms in the Great Lakes using MODIS. *J. Great Lakes Res.* 2009, 35, 447–453.

16. Hansen, C.H., Williams, G.P., Adjei, Z., Barlow, A., Nelson, E.J., Miller, A.W. Reservoir water quality monitoring using remote sensing with seasonal models: Case study of five central-Utah reservoirs. *Lake Reserv. Manag.* 2015, 31, 225–240.

17. Shi, K., Zhang, Y., Qin, B., Zhou, B. Remote sensing of cyanobacterial blooms in inland waters: Present knowledge and future challenges. *Sci. Bull.* 2019, 64, 1540–1556.

18. Ho, J.C., Michalak, A.M., Pahlevan, N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature* 2019, 574, 667–670.

19. Woolway, R.I., Kraemer, B.M., Lenters, J.D., Merchant, C.J., O'Reilly, C.M., Sharma, S. Global lake responses to climate change. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2020, 1, 388–403.

20. Bonansea, M.; Ledesma, M.; Rodriguez, C.; Pinotti, L. Using new remote sensing satellites for assessing water quality in a reservoir. *Hydrol. Sci. J.* 2019, 64, 34–44

Received 08.12.2023.

Accepted 15.12.2023.

Analysis of methods for assessing the degree of water pollution

The most important modern methods for the monitoring of water bodies, their state of pollution and the assessment of water quality are considered. Commonly accepted, standardized methods for assessing water quality in water bodies include ground-based sampling, which is untimely and expensive under certain conditions. Best suited for practical use in large areas is the remote approach, which combines ground and satellite measurements to classify changes and detect pollution in closed water bodies. Satellite monitoring is a reliable tool for obtaining operational information on the state of water bodies and their changes with a certain periodicity, thanks to the use of a large set of heterogeneous data. And the availability of archived data becomes a significant advantage, opening up the possibility of comparing the results obtained and analyzing the factors influencing the state of water bodies and the environment. The paper describes the main methods and datasets that can be used for the application of remote monitoring methods based on machine learning. The use of Landsat multispectral sensors, including TM (Thematic Mapper), MSS (Multispectral Scanner), ETM (Enhanced Thematic Mapper), and OLI (Operational Land Imager), is proposed as the main data set. Examples of the application of the remote sensing approach to the assessment of water pollution over large areas will be analyzed. Possible machine learning methods for solving an applied problem are presented.

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.

Дібрій Данило Андрійович — 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 Yurii Vitaliyovych — Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

Dibrii Danylo Andriyovych — graduate student of the Department of Information Technologies and Systems of the Ukrainian State University of Science and Technology.