

ДИНАМІКА ЗАБРУДНЕННЯ ДНІПРОВСЬКИХ ВОДОСХОВИЩ БІОГЕННИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ЗА ГІДРОХІМІЧНИМИ ТА СУПУТНИКОВИМИ МЕТОДАМИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Грига Марина Юріївна,

кандидат геологічних наук, науковий співробітник

Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка НАН України,

співзасновник, головний аналітик

Центру інноваційних досліджень Землі та космічного простору

ORCID ID: 0009-0003-9297-1161

Поверхневі води Дніпра зазнають постійного антропогенного навантаження через стоки різної природи. Біогенні елементи, які потрапляють зі стоками, чинять негативний вплив на водну екосистему та сприяють розвитку процесів евтрофікації. Забруднення є найбільш вираженим в межах водосховищ Дніпра. Мета роботи полягала у дослідженні динаміки забруднення поверхневих вод дніпровських водосховищ біогенними елементами із застосуванням гіdroхімічних методів та методів дистанційного зондування Землі. Об'єктом дослідження були території в межах Дніпровського водосховища та нижньої частини Кам'янського водосховища, від сел. Аули до міста Дніпро. Предметом дослідження були багаторічні та сезонні зміни концентрацій амоній-іонів NH_4^+ та фосфат-іонів PO_4^{3-} у поверхневих водах для періоду з 2015 по 2023 рік, та водні індекси NDWI, отримані в результаті дистанційного зондування Землі супутником Sentinel-2A для періоду з 2017 по 2023 рік. Було встановлено, що територія дослідження в межах Дніпровського водосховища та нижньої частини Кам'янського водосховища належить до однієї зони еколого-гіdroхімічних змін через подібні риси річних та сезонних розподілів біогенних елементів. Характер багаторічних змін концентрацій амонію вказує на його поступове зростання в межах усієї території дослідження. Фосфати мають більш виражену сезонність в порівнянні з амонієм та набувають явно вираженого максимуму в серпні-вересні, що відповідає максимальному прояву евтрофікації в межах території досліджень за супутниковими даними. Характер сезонних змін якості води за амонієм та індексами NDWI, вказує на системне зростання забруднення поверхневих вод у вегетаційний період, та сповільнення забруднення в холодну пору року. Поєднання гіdroхімічних даних і даних дистанційного зондування Землі забезпечує надійний метод оцінки динаміки забруднення поверхневих вод біогенними елементами, який може бути використаний для вдосконалення систем моніторингу та стратегій управління якістю води.

Ключові слова: поверхневі води, біогенні елементи, амоній, фосфати, евтрофікація, дніпровські водосховища, дистанційне зондування Землі, водний індекс.

Hryha Maryna. Dynamics of nutrient pollution in Dnieper Reservoirs: combining hydrochemical and remote sensing techniques

The Dnieper River's surface waters are under constant anthropogenic pressure due to various wastewater discharges. These discharges introduce nutrients to water that negatively impact the aquatic ecosystem, driving eutrophication which is the process that occurs when the environment becomes enriched with nutrients, increasing the amount of plant and algae growth. Nutrients include nitrogen and phosphorus compounds due to their ability to affect the vital functions of microorganisms and plants and cause biogenic pollution of water bodies. As the Dnipro River provides drinking and food water for 70% of the population, studying its pollution dynamics is strategically vital. The Dnipro reservoir cascade exhibits heightened sensitivity to biogenic contamination due to diminished water exchange rates, sedimentation, and progressive shallowing of extensive regions. This study aimed to investigate the dynamics of nutrient pollution in reservoir surface waters using hydrochemical analyses and remote sensing techniques. The study focused on the Dnieper Reservoir and the lower Kamianske Reservoir, specifically from Auly to Dnipro. It examined long-term and seasonal changes in ammonium (NH_4^+) and phosphate (PO_4^{3-}) concentrations in surface waters from 2015 to 2023 and analyzed NDWI derived from Sentinel-2A satellite data from 2017 to 2023. The findings indicated that the Dnieper and lower Kamianske Reservoirs form a single ecological-hydrochemical zone, characterized by similar annual and seasonal nutrient distribution patterns. Long-term ammonium trends show a gradual increase across the study area. Phosphate levels exhibited greater seasonal variability than ammonium, peaking in August-September, which aligned with maximum eutrophication with algae bloom observed via satellite imagery. Seasonal water quality trends, based on ammonium and NDWI, revealed consistent increases in pollution during the growing season, followed by a slowdown in colder months. Combining hydrochemical and remote sensing data provides a robust method for assessing surface water pollution dynamics, which can inform the development of effective monitoring systems and water quality management strategies.

Key words: surface waters, nutrients, ammonium, phosphates, eutrophication, algae bloom, Dnieper reservoirs, remote sensing, NDWI.

Вступ. Поверхневі води України зазнають постійного антропогенного навантаження через дифузні і точкові джерела комунально-побутового, промислового та сільськогосподарського характеру [1]. Щорічно до водойм України потрапляють сотні мільйонів кубометрів забруднених стічних вод, половина з яких припадає на Дніпро [2].

Оскільки Дніпро при цьому є джерелом забезпечення питних та продовольчих потреб 70% споживачів держави [3], стратегічно важливим є всебічне дослідження динаміки його забруднення. Особливу роль при забрудненні поверхневих вод Дніпра відіграють біогенні елементи [4]. До біогенних

елементів (речовин) відносять сполуки азоту і фосфору через їх здатність впливати на життєдіяльність мікроорганізмів та рослин і бути відповідальними за біогенне забруднення водойм [5; 6]. Надмірна кількість біогенних елементів у поверхневих водах викликає зміну поживних режимів водойм та створює передумови для виникнення евтрофікації («цвітіння» водойми) [6; 7]. В результаті масової евтрофікації, екосистема водойми може бути змінена, що супроводжується зменшенням біорізноманіття та розвитком шкідливих ціанобактерій [8].

Через уповільнення водообміну, замулення та обміління значних територій, каскад дніпровських водосховищ є чутливим до біогенного забруднення [9]. Поверхневі води Кам'янського та Дніпровського водосховищ, що розташовані в індустріальному регіоні з високою густотою населення, є під дією сумарних негативних впливів, а вода для комунально-побутових потреб з питних водозаборів цих територій має проходити численні методи очистки. Всебічне дослідження динаміки змін поверхневих вод складних водних системи, які зазнають постійного антропогенного впливу, передбачає комплексування різних підходів та методів.

Сучасні проблеми зміни стану поверхневих вод Дніпра були досліджені в [10; 11], де відмічено погіршення рівня забруднення за деякими сполуками азоту, фосфатами, виявлене зростання рівня біохімічного споживання кисню значної частини території басейну. Дослідженню екологічного стану Кам'янського та Дніпровського водосховищ, в тому числі із використанням методів дистанційного зондування Землі присвячені роботи [3; 12; 13]. Реалізація гідрохімічних досліджень із застосуванням методів математичної статистики продемонструвала значимі результати при оцінці просторово-часових змін забруднення поверхневих вод при негативних антропогенних впливах [14]. Застосування індексу NDWI при дослідженні біогенного забруднення та евтрофікації поверхневих вод дозволило оцінити забруднення водних систем по всьому світу [15; 16; 17; 18]. Отже, комплексування гідрохімічних та методів дистанційного зондування Землі є вдалим рішенням при дослідженні динаміки забруднення біогенними елементами дніпровських водосховищ.

Матеріал та методи. В процесі дослідження були задіяні дані Державного водного агентства, яке проводить моніторинг поверхневих вод відповідно до Порядку здійснення державного моніторингу вод, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 19.09.2018 № 758. В статті були використані дані, отримані Лабораторією моніторингу вод РОВР у Дніпропетровській області при щомісячних вимірюваннях концентрацій наступних біогенних елементів: амонію (амоній-іонів NH_4^+) і фосфатів (фосфат-іонів PO_4^{3-}). Дослідження проводились для періоду з січня 2015 року по грудень 2023 року для трьох пунктів спостереження, розташованих в межах питних водозаборів Кам'янського та Дніпровського водосховищ. Станції спостереження розташовані зверху вниз за течією Дніпра в наступній послідовності: S(462) – на території нижньої частини Кам'янського водосховища в межах водозабору м.

Кам'янське біля сел. Аули на відстані 462 км від гирла Дніпра, S(420) – на території Дніпровського водосховища в межах Кайдакського водозабору м. Дніпро на відстані 420 км від гирла Дніпра, S(404) – на території Дніпровського водосховища в межах питного водозабору м. Дніпро на відстані 404 км від гирла Дніпра.

При проведенні дослідження поверхневих вод із використанням даних дистанційного зондування Землі були використані матеріали, отримані супутником Sentinel-2A Європейського космічного агентства за період з 2017 по 2023 рік включно. Для аналізу якості поверхневих вод був використаний водний індекс NDWI [19; 20], який є показником, що визначається як відношення різниці діапазонів B03 та B08 до їх суми, та реалізована оцінка знімків у видимому діапазоні у форматі Highlight Optimized Natural Color. Був проведений аналіз NDWI в межах території розташування станцій спостереження для 342 космічних знімків, отриманих при хмарності від 0 до 30%. Візуалізація даних була проведена з використанням Copernicus Browser.

В процесі дослідження застосовувались методи математичної статистики з розрахунком базових статистичних показників [21]. Були розраховані середньорічні та середньомісячні медіанні значення концентрацій амонію і фосфатів для кожного пункту спостереження за період з 2015 по 2023 рік, встановлені кореляційні зв'язки з розрахунком коефіцієнтів кореляції Пірсона [22] та оцінкою значущості кореляції з використанням альфа-рівнів.

Результати. В представленій статті оцінка харктеру змін концентрацій біогенних елементів в межах усіх станцій спостереження була реалізована з використанням статистичних методів, а висновки щодо сезонних трендів змін якості води були виконані, зважаючи на аналіз гідрохімічних даних та NDWI індексів.

З метою оцінки багаторічної динаміки забруднення поверхневих вод були розраховані медіанні значення для кожного року спостережень, основані на даних щомісячних вимірювань концентрацій амонію та фосфатів (рис. 1).

За результатами аналізу багаторічних змін концентрацій амонію та фосфатів (рис. 1) можна виділити ряд закономірностей. Амоній демонструє стабільний висхідний тренд зростання концентрацій в межах усіх станцій спостереження. В порівнянні з 2015 роком середньорічні концентрації амонію зросли в середньому на 25%. Найбільші концентрації серед усіх років дослідження спостерігались в 2018 році (0,38 мг/дм³ для S(462), 0,41 мг/дм³ для S(420), 0,39 мг/дм³ для S(404)), та в 2023 році ((0,41 мг/дм³ для S(462), 0,43 мг/дм³ для S(420), 0,42 мг/дм³ для S(404)). Фосфати за період дослідження змінили тренд і почали демонструвати щорічний ріст після різкого падіння показників протягом 2020 року, а в 2023 році концентрації фосфатів знову набули рівнів, характерних для періоду 2015-2019 років та склали 0,27 мг/дм³ для S(462), 0,31 мг/дм³ для S(420) та 0,33 мг/дм³ для S(404).

Характер багаторічних змін концентрацій фосфатів і амонію в межах усіх станцій спостереження вказує на спільні гідрологічні, гідрохімічні, антропогенні та клі-

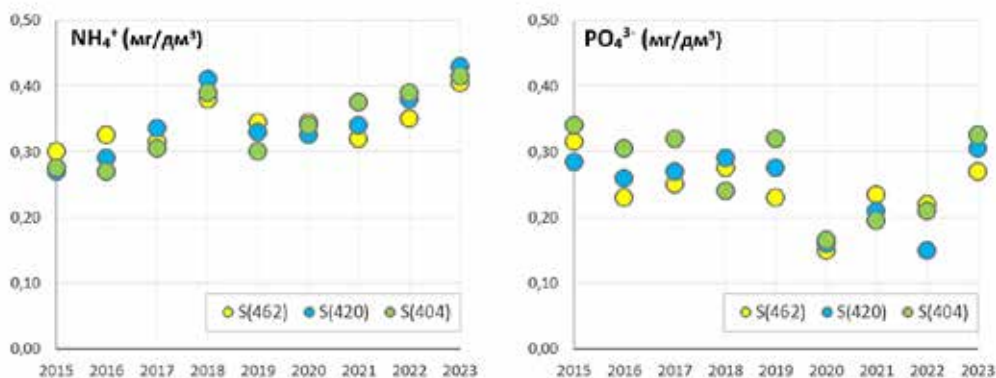


Рис. 1. Багаторічні зміни концентрацій амонію та фосфатів протягом 2015-2023 рр. в межах Дніпровського та нижньої частини Кам'янського водосховищ Дніпра

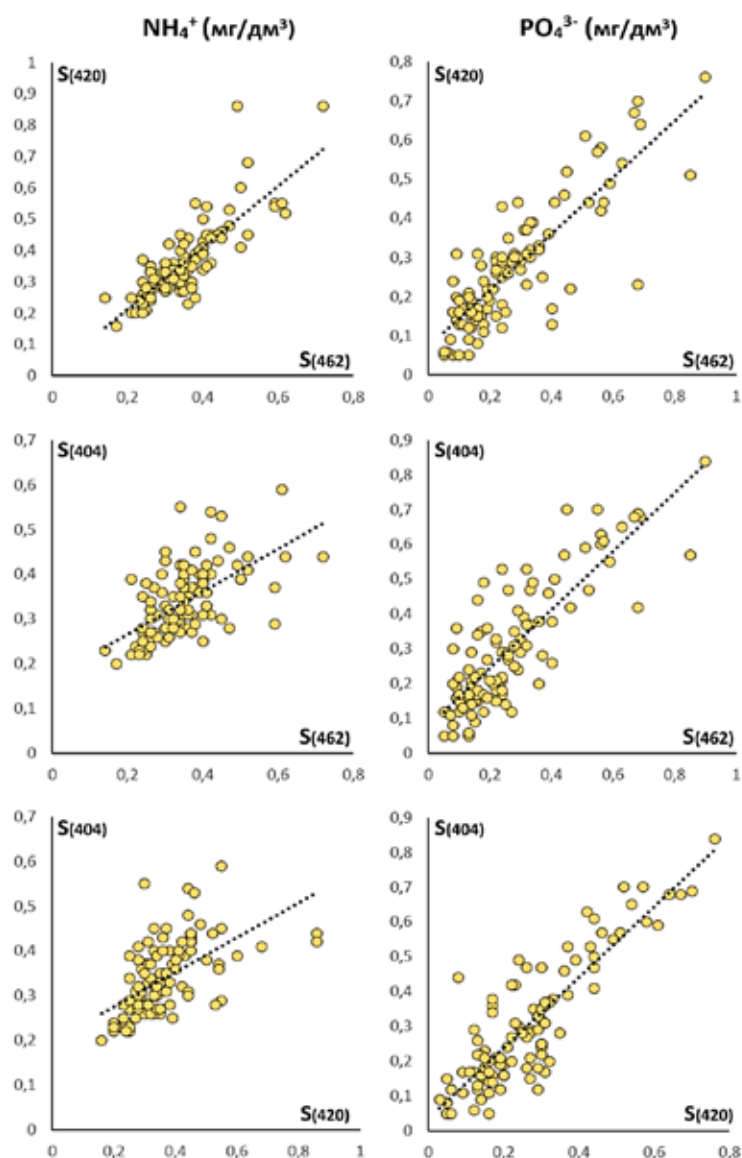


Рис. 2. Діаграми розсіювання залежності розподілу амонію та фосфатів для станцій спостереження в межах Дніпровського та нижньої частини Кам'янського водосховищ Дніпра

матичні чинники, які одночасного впливають на якість поверхневих вод в Дніпровському та південній частині Кам'янського водосховищ. Це підтверджується при розгляді діаграм розсіювання залежності щомісячних концентрацій біогенних елементів за 2015–2023 рр. між станціями спостереження (рис. 2).

На графіках можна спостерігати наявність виражених лінійних зв'язків у розподілах фосфатів та амонію між станціями спостереження, що вказує на одночасність змін рівнів забруднення біогенними елементами усю територію дослідження. Подібна лінійність також відображена в результатах кореляційного аналізу Пірсона. Для усіх станцій спостереження був встановлений високий рівень кореляційних зв'язків у розподілі фосфатів. Тут характерні значення коефіцієнтів кореляції Пірсона $r = 0,84$ між S462 та S420, $r = 0,84$ між S462 та S404 та $r = 0,89$ між S420 та S404. Для амонію високі кореляції спостерігаються між S462 та S420 зі значеннями $r = 0,82$. Окремо виділяється станція спостереження S404, для якої є характерними менші кореляційні зв'язки з іншими станціями спостереження за розподілом амонію, що також відображене на діаграмах розсіювання на рис. 2. Коефіцієнти кореляції характеризуються значеннями $r = 0,57$ між S462 та S404 та $r = 0,59$ між S420 та S404, які незважаючи на невисокі показники знаходяться суттєво вище рівня значущості, границя якого знаходиться на рівні 0,20 (при $\alpha=0,05$). Саме для станції S404 характерні найбільш виражені тренди зростання середньорічних концентрацій амонію, починаючи з 2019 року, а її розміщення в межах міста Дніпро вказує на можливі додаткові антропогенні чинники впливу на водну екосистему, відмінні від інших двох станцій спостереження (рис. 2).

З метою встановлення закономірностей сезонних змін сполук азоту і фосфору, були визначені середні за медіанами значення щомісячних показників для періоду з 2015 по 2023 рік. Графіки розподілу для амонію та фосфатів представлені на рис. 3. Було встановлено, що амоній характеризується сезонними коливаннями показників з найбільш типовим зростанням концентрацій у липні та серпні, і високими рівнями концентрацій у травні та, частково, вересні. Найменші показники концентрацій характерні для березня. Фосфати мають більш виражений сезонний розподіл в порівнянні з амонієм. Вони характеризуються наявністю мінімальних значень у квітні і травні, набувають поступового зростання починаючи з червня і досягають максимальних значень протягом періоду з серпня по жовтень, які змінюються падінням показників у холодну пору року. Як зазначене у [23], такий сезонний розподіл фосфатів може відображати періоди водопілля в квітні – травні, та масового розкладання фітопланктону наприкінці літа та на початку осені (рис. 3).

Особливості сезонної динаміки стану поверхневих вод Кам'янського та Дніпровського водосховищ було також досліджено з використанням даних супутникового зондування Землі. Був проведений аналіз космічних знімків для періоду з 2017 р по 2023 рік в межах територій розташування станцій спостереження. Дослідження проводилися з використанням водного індексу NDWI та у видимому оптичному діапазоні у форматі Highlight Optimized Natural Color. Було встановлено, що в межах усієї території дослідження присутні істотні зміни у розподілі водних індексів протягом року, які водночас корелюють з характером сезонних змін біогенних елементів. Загальний сезонний розподіл NDWI є співставним зі змінами концентрацій амонію, а при максимальних значеннях відповідає наявності максимальних концентрацій фосфатів. В холодну пору року водосховища характеризуються індексами вищими за 0,3, що є показниками чистих водойм, при можливому діапазоні змін NDWI від -1 до 1. В теплу пору року якість поверхневих вод починає погіршуватись з квітня, коли показники NDWI набувають значень від 0,15 до 0. Найгірших значень показники водного індексу набувають в серпні та на початку вересня, коли значення NDWI можуть бути від 0, при частковому забрудненні територій і до -0,5, коли значну частину водойми перекривають смуги водоростей, а прибережні зони та мілководні ділянки покриваються суцільною плівкою ціанобактерій.

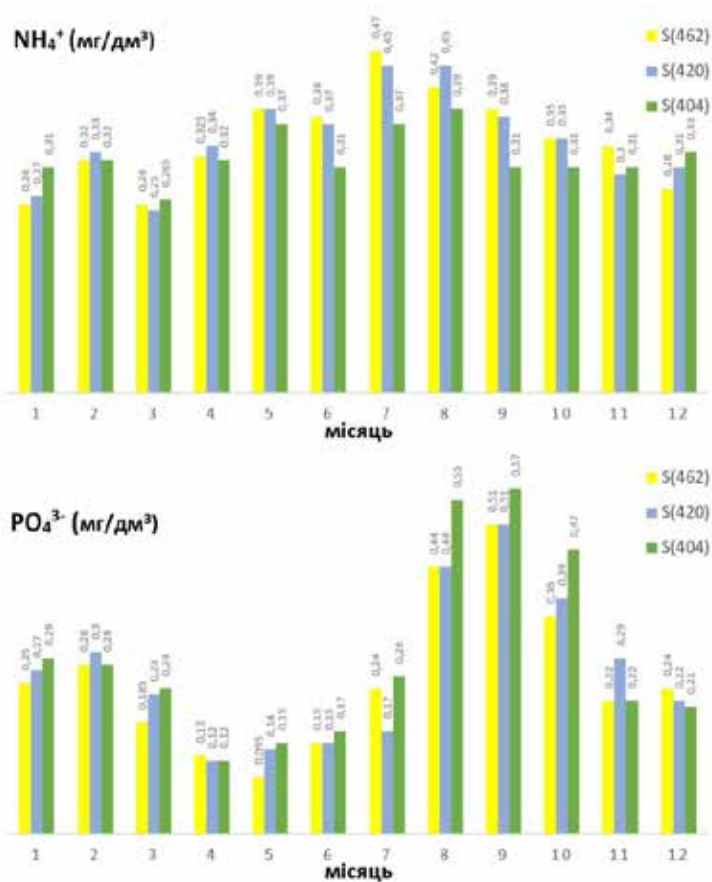


Рис. 3. Щомісячні зміни концентрацій амонію і фосфатів у поверхневих водах Дніпровського та нижньої частини Кам'янського водосховищ Дніпра

Покращення стану водойм простежуються з кінця вересня або в жовтні, а з листопаду і до льодоставу водні індекси можуть демонструвати значення 0,4 і вище. На рисунках 4, 5, 6 показано типові відображення водосховищ у періоди наявності та відсутності біогенного забруднення. Продемонстровано серпневе забруднення поверхневих вод Кам'янського та Дніпровського водосховищ з нульовими та від'ємними

індексами NDWI та проявами евтрофікації, які спостерігаються як за водними індексами, так і у видимому діапазоні. Також на рисунках 4, 5, 6 зображено типову для осінніх вод картину, що відображає їх очищення, в тому числі від біогенних елементів.

Було встановлено, що прояви евтрофікації носять системний характер в серпні та на початку вересня для усіх територій дослідження в межах Кам'янського

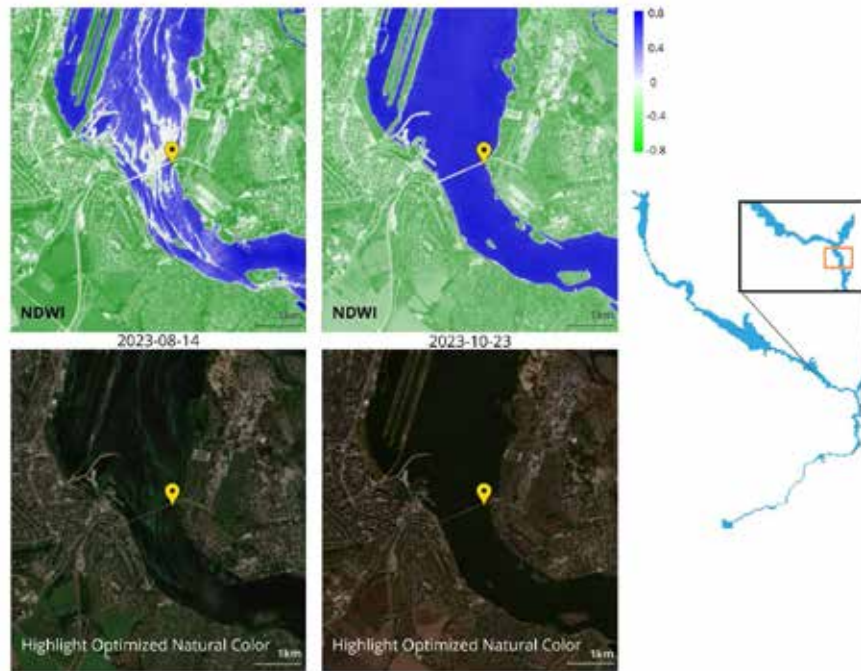


Рис. 4. Результати супутникових досліджень території в межах станції спостереження S404 (Дніпровське водосховище)

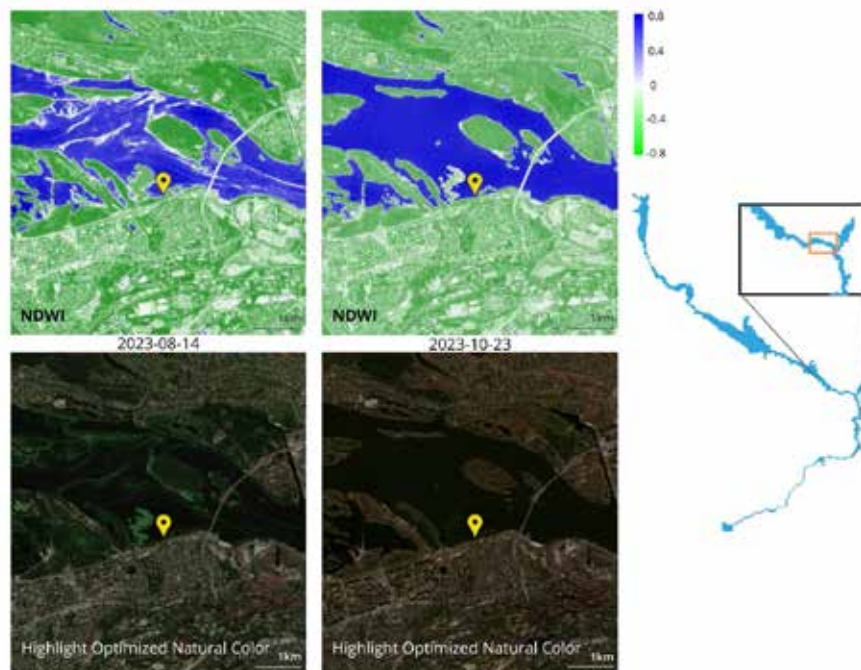


Рис. 5. Результати супутникових досліджень території в межах станції спостереження S420 (Дніпровське водосховище)

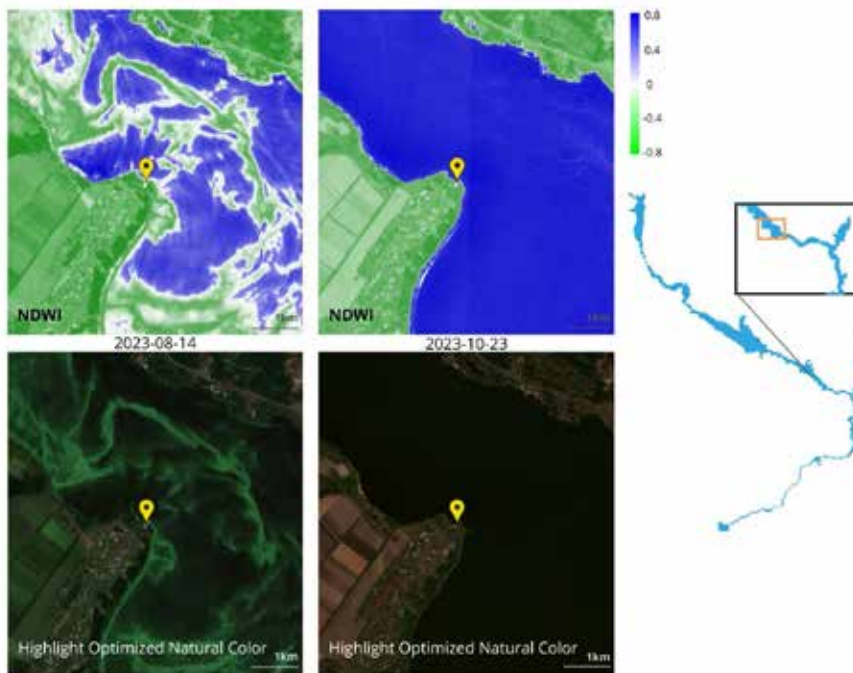


Рис. 6. Результати супутникових досліджень території в межах станції спостереження S462 (Кам'янське водосховище)

та Дніпровського водосховища та були типовими протягом усіх років, для яких проводились дослідження супутникових даних.

Висновки. В результаті проведених досліджень були отримані наступні результати. Було встановлено, що комплексуювання гідрохімічних методів та методів дистанційного зондування Землі дає можливість проведення системної оцінки динаміки забруднення поверхневих вод.

Було встановлено, що територія дослідження в межах Кам'янського та Дніпровського водосховищ належить до однієї зони еколого-гідрохімічних змін через подібні риси річних та сезонних розподілів біогенних елементів.

Характер багаторічних змін концентрацій амонію вказує на його поступове зростання в межах усієї території дослідження.

Фосфати мають більш виражену сезонність в порівнянні з амонієм та набувають явно вираженого максимуму в серпні-вересні, що відповідає максимальному прояву евтрофікації територій досліджень за супутниковими даними.

Характер сезонних змін якості води за амонієм та індексами NDWI, вказує на системне зростання забруднення поверхневих вод у вегетаційний період, та сповільнення забруднення в холодну пору року.

Поєднання гідрохімічних даних і даних дистанційного зондування Землі забезпечує надійний метод оцінки динаміки забруднення поверхневих вод біогенними елементами, який може бути використаний для вдосконалення систем моніторингу та стратегій управління якістю води.

Література:

1. Звіт про стратегічну екологічну оцінку проекту Закону України «Про внесення змін до Закону України «Про затвердження Загальнодержавної цільової програми розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2021 року». 2021. 55 с. DOI: <https://davr.gov.ua/proyekt-zakonu-ukraini-pro-vnesennya-zmin-do-zakonu-ukraini-pro-zatverdzhennya-zagalnoderzhavnoi-cilvoi-programi-rozvitku-vodnogo-gospodarstva-ta-ekologichnogo-ozdorovlennya-basejnu-richki-dni-pro-na-period-do-2021-roku>.
2. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. М-во зах. довкілля та природ. ресурсів України, 2021. 514 с. DOI: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>.
3. Пічура В. І., Потравко Л. О. Екологічний стан басейну ріки Дніпро та удосконалення механізму організації природокористування на водозабірній території. *Водні біоресурси та аквакультура*. 2021. №. 1. Р. 170–200. DOI: <https://doi.org/10.32851/wba.2021.1.14>
4. Строкаль В. П., Ковпак А. В. Причинно-наслідковий зв'язки забруднення біогенними елементами басейну річки Дніпра: синтез теоретичних даних. *Екологічні науки*. 2021. Vol. 35, no. 2. Р. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.2-35.6>
5. Хільчевський В. К., Осадчий В. І., Курило С. М. Основи гідрохімії : підручник. Київ : Ніка-Центр, 2012. 312 с.
6. Дудник С. В., Євтушенко М. Ю. Водна токсикологія: основні теоретичні положення та їхнє практичне застосування : монографія. Київ : Вид-во Укр. фітосоціол. центру, 2013. 298 с.
7. Khan F. A., Ansari A. A. Eutrophication: an ecological vision. *The botanical review*. 2005. Vol. 71, no. 4. Р. 449–482. DOI: [https://doi.org/10.1663/0006-8101\(2005\)071\[0449:eaev\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1663/0006-8101(2005)071[0449:eaev]2.0.co;2)

8. Чуб І. М. Мікробіологія і хімія води. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекет., 2019. 122 с.
9. Хільчевський В. К., Гребін В. В. Великі і малі водосховища України: регіональні та басейнові особливості поширення. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2021. Т. 60, № 2. С. 6–17. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.2.1>
10. Грига М. Ю. Оцінка просторово-часових змін біохімічного споживання кисню (БСК) поверхневих вод Дніпра. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2024. Т. 72, № 2. С. 29–41. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2024.2.3>
11. Грига М. Ю. Еколого-геохімічна оцінка закономірностей розподілу сполук азоту і фосфору в поверхневих водах Дніпра. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*. 2024. Т. 29, № 2 (45). С. 122–136. DOI: [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.2\(45\).318044](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.2(45).318044)
12. Вишневський В. І. Просторово-часова мінливість «цвітіння» води у дніпровських водосховищах. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2019. Т. 20. С. 18–27.
13. Пічур В. І. Просторово-часові тенденції зміни трофічного стану водосховищ річки Дніпро. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Сільськогосподарські науки*. 2016. Вип. 4 (76). С. 3–21.
14. Hryha M. Y. Evaluation of chemical indicators of anthropogenic influence in the Lower Danube basin. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*. 2024. No. 1 (71). P. 74–84. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2024.1.7>
15. Özalkan E. Water body detection analysis using NDWI indices derived from landsat-8 OLI. *Polish journal of environmental studies*. 2020. Vol. 29, no. 2. P. 1759–1769. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/110447>
16. Detection of floating algae blooms on water bodies using planetscope images and shifted windows transformer model / J. Ahn et al. *Remote sensing*. 2024. Vol. 16, no. 20. P. 3791. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16203791>
17. Distinguishing algal blooms from aquatic vegetation in Chinese lakes using Sentinel 2 image / J. Pu et al. *Remote sensing*. 2022. Vol. 14, no. 9. P. 1988. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14091988>
18. Alharbi B. Remote sensing techniques for monitoring algal blooms in the area between Jeddah and Rabigh on the Red Sea Coast. *Remote sensing applications: society and environment*. 2023. P. 100935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100935>
19. McFetters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*. 1996. Vol. 17, no. 7. P. 1425–1432. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
20. Gao B.-c. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*. 1996. Vol. 58, no. 3. P. 257–266. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(96)00067-3)
21. Vu J., Harrington D. Introductory statistics for the life and biomedical sciences. OpenIntro, Inc., 2020. 472 p.
22. Schober P., Boer C., Schwarte L. A. Correlation coefficients. *Anesthesia & analgesia*. 2018. Vol. 126, no. 5. P. 1763–1768. DOI: <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000002864>
23. Хільчевський В. К., Осадчий В. І., Курило С. М. Регіональна гідрохімія України : підручник. ВПЦ «Київ. ун-т», 2019. 343 с.

References:

1. Zvit pro stratehichnu ekolohichnu otsinku proiektu Zakonu Ukrainy «Pro vnesennia zmin do Zakonu Ukrainy «Pro zatverdzhennia Zahalnodержavnoi tsilovoi prohramy rozvytku vodnoho hospodarstva ta ekolohichnoho ozdorovlennia baseinu richky Dnipro na period do 2021 roku». (2021). DOI: <https://davr.gov.ua/proyekt-zakonu-ukraini-pro-vnesennya-zmin-do-zakonu-ukraini-pro-zatverdzhennya-zagalnodержavnoi-cilovoi-programi-rozvitku-vodnoho-gospodarstva-ta-ekologichnogo-ozdorovlennya-basejnu-richki-dnipro-na-period-do-2021-roku> [in Ukrainian].
2. Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Ukraini u 2021 rotsi. (2021). Ministerstvo zakhystu dovkillya ta pryrodnykh resursiv Ukrainy. DOI: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf> [in Ukrainian].
3. Pichura, V. I., & Potravka, L. O. (2021). Ecological condition of the Dnipro River Basin and improvement of the mechanism of organization of nature use on the water catchment territory. *Water Bioresources and Aquaculture*, (1), 170–200. DOI: <https://doi.org/10.32851/wba.2021.1.14> [in Ukrainian].
4. Strokal, V. P., & Kovpak, A. V. (2021). Causes of nutrient pollution in the Dnieper river basin: theoretical syntheses. *Ecological Sciences*, 35(2), 37–44. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.2-35.6> [in Ukrainian].
5. Khilchevskiy, V. K., Osadchyi, V. I., & Kurylo, S. M. (2012). Osnovy hidrokhimii. Nika-Tsentr [in Ukrainian].
6. Dudnyk, S. V., & Yevtushenko, M. Yu. (2013). Vodna toksykologhiia: osnovni teoretychni polozhennia ta yikhie praktychne zastosuvannia. Vydavnytstvo Ukrainkoho fitosotsiologichnoho tsentru [in Ukrainian].
7. Khan, F. A., & Ansari, A. A. (2005). Eutrophication: An ecological vision. *The Botanical Review*, 71(4), 449–482. DOI: [https://doi.org/10.1663/0006-8101\(2005\)071\[0449:caev\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1663/0006-8101(2005)071[0449:caev]2.0.co;2) [in Ukrainian].
8. Chub, I. M. (2019). Mikrobiologhiia i khimiiia vody. KhNUMH im. O. M. Beketova [in Ukrainian].
9. Khilchevskiy, V. K., & Grebin, V. V. (2021). Large and small reservoirs of Ukraine: Regional and basin distribution features. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 60(2), 6–17. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.2.1>
10. Hryha, M. Yu. (2024). Spatiotemporal variation evaluation of biochemical oxygen demand (BOD) in Dnipro River. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, (2 (72)), 29–41. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2024.2.3> [in Ukrainian].
11. Hryha, M. Yu. (2024). Evaluation of the ecological and geochemical patterns of nitrogen and phosphorus distribution in the Dnipro River's surface waters. *Odesa National University Herald. Geography & Geology*, 29(2 (45)), 122–136. DOI: [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.2\(45\).318044](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.2(45).318044) [in Ukrainian].

12. Vyshnevskiy, V. I. (2019). Spatial-temporal variability of algal bloom in the Dnipro Reservoirs. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 20, 18–27 [in Ukrainian].
13. Pichura, V. I. (2016). Prostorovo-chasovi tendentsii zminy trofichnoho stanu vodoskhovyshech richky Dnipro. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Silskohospodarski nauky*, (vyp. 4 (76)), 3–21 [in Ukrainian].
14. Hryha, M. Yu. (2024). Evaluation of chemical indicators of anthropogenic influence in the Lower Danube basin. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, (1 (71)), 74–84. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2024.1.7>
15. Özelkan, E. (2020). Water body detection analysis using NDWI indices derived from landsat-8 OLI. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(2), 1759–1769. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/110447>
16. Ahn, J., Kim, K., Kim, Y., Kim, H., & Lee, Y. (2024). Detection of floating algae blooms on water bodies using planetscope images and shifted windows transformer model. *Remote Sensing*, 16(20), 3791. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16203791>
17. Pu, J., Song, K., Lv, Y., Liu, G., Fang, C., Hou, J., & Wen, Z. (2022). Distinguishing algal blooms from aquatic vegetation in Shinese lakes using Sentinel 2 image. *Remote Sensing*, 14(9), 1988. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14091988>
18. Alharbi, B. (2023). Remote sensing techniques for monitoring algal blooms in the area between Jeddah and Rabigh on the Red Sea Coast. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 100935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100935>
19. McFEETERS, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
20. Gao, B.-c. (1996). NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(96)00067-3)
21. Vu, J., & Harrington, D. (2020). Introductory statistics for the life and biomedical sciences. OpenIntro, Inc.
22. Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients. *Anesthesia & analgesia*, 126(5), 1763–1768. DOI: <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000002864>
23. Khilchevskiy, V. K., Osadchyi, V. I., & Kurylo, S. M. (2019). Rehionalna hidrokhimiia Ukrainy. VPTs "Kyivskiy universytet" [in Ukrainian].