

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-06>
УДК (UDC) 556.55:502.51(477.82)

В. О. ФЕСЮК, д-р геогр. наук, проф.,
професор кафедри фізичної географії
e-mail: fesyuk@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3954-9917>
Волинський національний університет імені Лесі Українки,
пр. Волі, 13, м. Луцьк, 43025, Україна

І. А. МОРОЗ, канд. хім. наук, доц.,
доцент кафедри харчових технологій та хімії
e-mail: i.moroz@lntu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-4876>
Луцький національний технічний університет,
вул. Львівська, 75, м. Луцьк, 43018, Україна

МЕТОДИКА ТА ОЦІНКА ГІДРОЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ОЗ. КРИМНЕ

Мета. Розробка та апробація методики індикативної та просторово-часової кількісної оцінки екологічного стану оз. Кримне для визначення сучасного рівня його екологічної стійкості, виявити гідроекологічні проблеми та окреслити пріоритетні напрями його використання та моніторингу.

Методи. Польові гідрологічні, картографічні, дистанційного зондування Землі, математичного моделювання та прогнозування.

Результати. Морфометричні особливості озера змінились порівняно із 1933 р., площа та об'єм скоротилися унаслідок меліорації середини-кінця ХХ ст. Водозбір озера зберіг риси природності. Проте озеро зазнає значної трансформації: частина прибережної смуги розорана, фіксуються локальні сміттєзвалища, зростає рекреаційний тиск. Вплив антропогенних чинників сприяє надходженню біогенів. Відбувається погіршення якості води, підвищення вмісту органіки, фосфатів та амонію, періодичний кисневий дефіцит, проявляються ознаки евтрофікації. Аналіз ДЗЗ (синтетичний індекс NDVI) підтверджує сезонні коливання та літнє зростання продуктивності з локальним розвитком водоростей і макрофітів. Озеро чутливе до навантажень і потребує постійного моніторингу його стану. Основні джерела антропогенного впливу – стоки із селищних територій, сільськогосподарських полів і сміттєзвалищ

Висновки. Озеро Кримне має задовільний гідроекологічний стан, проте властива тенденція до погіршення. На цей процес впливають зростання вмісту біогенів у воді, прояв евтрофікації та сезонний розвиток рослинності. Пріоритетні природоохоронні заходи: дотримання режиму прибережних захисних смуг, оптимізація землекористування, модернізація водовідведення у найближчих населених пунктах, ліквідація стихійних сміттєзвалищ, системний гідроекологічний моніторинг озера.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: морфометричні зміни, антропогенне навантаження, евтрофікація, гідрохімічний склад води, гідроекологічний стан, моніторинг озера Кримне

Як цитувати: Фесюк В. О., Мороз І. А. Методика та оцінка гідроекологічного стану оз. Кримне. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2025. Вип. 33. С. 83-94. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-06>

In cites: Fesyuk, V. O., Moroz, I. A. (2025). Methodology and the hydroecological state assessment of lake Krymne. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (33), 83-94. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-06> (in Ukrainian)

Вступ

Озера Волинського Полісся є невід'ємною частиною водних ресурсів регіону, відіграють значну роль у підтримці біорізноманіття та забезпеченні екосистемних послуг. Проте за останні десятиліття зростання антропо-

генного навантаження, зміни у структурі землекористування у водозбірних басейнах та зміна клімату зумовили поступове погіршення гідроекологічного стану багатьох озер, у т. ч. оз. Кримне. Це проявляється через евтрофі-

кацію, зниження якості води, трансформацію прибережних екосистем, накопичення завислих речовин і погіршення умов життя для гідробіонтів. Зміна гідроекологічного стану загрожує не лише природним комплексам, а й місцевим громадам, які використовують озеро для задоволення різноманітних потреб.

Питання кількісної оцінки гідро-екологічного стану озер досить добре висвітлені у іноземній науковій літературі. Проаналізовано гідроекологічний стан оз. Нойзедлер (Австрія, Угорщина) [1], визначено стан озер [2] в епоху глобальних змін як центрів збереження біорізноманіття та екосистемних послуг, та біологічні показники екологічної якості в типових міських річково-озерних екосистемах [3]. Дослідження [4] присвячено зміні гідро-екологічного стану гірських озер під впливом потепління та органічних речовин у воді, динаміці рівнів води американських озер [5], антропогенному впливу на фітопланктон Боденського озера [6], питанням екологічному відновленню озер [7], тощо.

В контексті дослідження Шацької групи озер, до яких відноситься оз. Кримне, слід згадати роботу [8], присвячену екологіко-токсикологічним дослідженням озер Шацького НПП, зокрема, вмісту органічних токсичних речовини у воді. Проаналізовано динаміку рівнів води Шацьких озер [9] та чинники, що на неї впливають, морфометрію та гідрохімію озер Шацької групи [10], динаміку гідро-морфологічних параметрів Шацьких озер [11] у порівнянні із 1933 р. Також ґрунтовно проаналізовані результати гідрохімічних досліджень озера Кримне [12], в дос-

лідженні [13] вивчається трансформація водних об'єктів Шацького поозер'я, рівень антропогенного навантаження на природні екосистеми джерелами забруднення Шацького національного природного парку [14], проведена екологічна оцінка евтрофікації озер біосферного резервату «Шацький» [15], виконано аналіз загроз антропогенного впливу на ландшафтне і біологічне різноманіття озер Шацької групи [16], досліджено причини обміління Шацьких озер [17] і шляхів регулювання їх водного балансу. Також досліджено особливості евтрофікації різних за походженням, розмірами та гідроекологічним станом озер Полісся Волині [18, 19].

Незважаючи на існуючі дослідження лімносистем регіону, кількісна оцінка гідроекологічного стану озера Кримне все ще недостатньо розроблена. Зокрема, бракує чітких кількісних оцінок окремих аспектів сучасного гідроекологічного стану, визначення ключових чинників деградації. У цьому контексті постає необхідність у розробці методики, яка забезпечить комплексну кількісну оцінку гідроекологічного стану озера на основі об'єктивних даних, доступних методів аналізу та інструментів дистанційного зондування Землі.

Метою є розробка та апробація методики індикативної та просторово-часової кількісної оцінки екологічного стану оз. Кримне, що дозволить визначити сучасний рівень його екологічної стійкості, виявити гідроекологічні проблеми та окреслити пріоритетні напрями його використання та моніторингу.

Об'єкти та методи дослідження

Об'єктом дослідження є гідроекосистема озера Кримне із властивими їй особливостями природного стану та господарського впливу.

Предметом є параметри сучасного гідроекологічного стану озера Кримне, рівень евтрофікації, можливості покращення гідроекологічного стану озера внаслідок розробки комплексу заходів раціонального використання і охорони озера.

Дослідження базується на результатах польових гідрологічних та гідрохімічних досліджень, картографічних методах (ГІС), даних дистанційного зондування (ДЗЗ), аналізі літературних та архівних даних, математичному моделюванні для прогнозування стану озера.

Методика оцінювання гідроекологічного стану озера передбачає послідовний аналіз наявних даних. Спершу опрацьовано інформацію про хімічний склад води, природні особливості водозбору та його морфометрію, освоєння та використання озера та водозбору в історичній ретроспективі.

Далі за супутниковими знімками, із використанням програми QGIS 3.34, оцінено динаміку берегової лінії, прояви ерозії, забруднення, кольоровість води, розвиток евтрофікації. Польові роботи зосереджені на візуальному огляді прибережної зони та визначенні характеру антропогенних впливів. Якість води визначено за опублікованими даними. На підсумковому етапі проведена інтеграція

всіх матеріалів, зроблено висновки про гідро-екологічний стан озера, визначено екологічні загрози і розроблено першочергові рекомендації для відновлення та раціонального використання озера.

Центральним із використаних методів є дистанційне зондування землі (ДЗЗ). Методика застосування індексу NDVI для оцінки евтрофікації озера передбачала використання мультиспектральних супутникових знімків високої роздільної здатності. Після завантаження даних проводиться попередня обробка їх, що включає атмосферну корекцію та перепроєктування знімків. Для використаних нами знімків Sentinel-2 L2A така корекція уже виконана. Індекс NDVI обчис-

люється як відношення між відбиттям у червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах. На основі отриманих значень формується маска водної поверхні, яка буде застосована при аналізі просторового розподілу NDVI над озером. Це дозволить виявити ділянки водного об'єкта з потенційним розвитком водоростей та завислими речовинами. Порівняння різночасових даних дозволяє визначити зміни у ступені евтрофікації, верифікувати їх із результатами наземних спостережень. На основі таких спостережень, оцінок та аналізу формулюються висновки про сучасний стан озера та проблемні зони, які потребують подальшого моніторингу й реалізації екологічних заходів.

Результати та обговорення

Озеро Кримне розташоване на півночі Шацької територіальної громади, на північному сході групи Шацьких озер, за 1,5 км на північ від с. Мельники, за 1 км на південь від державного кордону України (рис. 1). Водну поверхню озера оточують ліси й болота. Водойма має видовжену, складну улоговину, ймовірно сформовану навколо 3-4 карстових лійок. За походженням озеро Кримне – карстове, воно сполучене каналом із верхів'ям р. Рита. Береги озера, здебільшого,

низовинні, місцями заболочені, дно, переважно, піщане, у межах карстових лійок спостерігається замулення. Входить до складу Шацького НПП.

Морфометричні показники: площа дзеркала близько 145 га, довжина берегової лінії 6,3 км, максимальна глибина до 6 м, середня – приблизно 2,15 м; довжина водойми – близько 2 км, ширина – 0,72 км, об'єм – 3,23 млн м³. Форма улоговини – параболічна, близька до конічної, відповідний коефі-



Рис. 1 – Фрагмент супутникового знімку озера Кримне (запозичено з Google Earth Pro)

Fig. 1 – Fragment of a satellite image of Lake Krymne (taken from Google Earth Pro)

цієнт становить 0,358. Така форма характерна для озер карстового походження. В межах Шацького НПП озеро Кримне посідає шосте місце за площею й четверте – за глибиною [20].

Гідрологічний баланс озера характеризується домінуванням поверхневого стоку: у прихідній частині на поверхневий притік припадає близько 82%, опади – 14%, підземний притік – лише 4%. У витратній частині також помітно мала частка підземного стоку (4%), випаровування складає близько 17%, а основна витрата – поверхневий стік (79%). Такі особливості гідрологічного балансу зумовлені гідравлічними зв'язками між озерами Шацького поозер'я та, частково, регуляцією рівнів води через мережу каналів. Саме тому час повного водообміну для Кримного невеликий – близько 1,1 року, що є найкоротшим періодом серед Шацьких озер [20].

Водозбірні площі, переважно, зайняті природними угіддями – лісами й болотами, ступінь антропогенної трансформації не високий. За багаторічними спостереженнями (1929-2007 рр.) середній рівень води фіксується на 161,36 м, амплітуда коливань досягала 1,48 м. Порівняльний аналіз морфометрії озера за 1933 та 2021 рр., проведений в роботі [11], вказує на зменшення площі та об'єму озера. Так, за даними авторів площа оз. Кримне у 1933 р. становила 149,7 га, а у 2021 р. – лише 137,5 га, площа зменшилась на 12,2 га (12,2%). Об'єм води в озері теж скоротився на 1,157 млн. м³ (35,85%). Озеро суттєво обміліло, головним чином через масштабну осушувальну меліорацію на Поліссі в середині ХХ ст. [11].

Озеро має значне біорізноманіття: зростають латаття білі й деякі орхідеї, виявлено 25 видів риб та численна орнітофауна. Загалом Кримне – типове карстове озеро з переважанням поверхневого живлення, швидким водообміном, високою біорізноманітністю й помітними історичними змінами морфометрії через інтенсивні осушувальні роботи.

Для Кримного властивий гідрокарбонатно-кальцієвий тип мінералізації з переважанням гідрокарбонатів і катіонів кальцію; сольовий склад відображає літологічні особливості та ґрунти водозбору. Загальний вміст розчинених речовин – у межах нормативів (сухий залишок – 193-273 мг/дм³ при ГДК 1000 мг/дм³). Найбільш ґрунтовно хімічний склад води озера досліджено в статті [8]. Авторами вста-

новлено, що перші гідрохімічні дослідження озер Шацького НПП були проведені у 1948 р. Наступні гідрохімічні обстеження здійснено науковцями Інституту гідробіології в 1975 р. Згодом такі дослідження проводились ще у 1988 р., 1989 р., 1996-97 рр. В 2000-х рр. спостереження за гідрохімічним режимом мали епізодичний характер. Останні результати дослідження хімічного складу води оз. Кримне, знайдені в наукових джерелах, що датуються 2010 р. [8].

Гідрохімічний стан оз. Кримне за результатами цих досліджень відображає поєднання природних особливостей і тривалого антропогенного тиску. Якість води у 2010 р. досить висока, але вміст низки забруднюючих речовин свідчив про розвиток евтрофікаційних процесів. Значення рН зросло до 8,31, що відображає посилення продукційної діяльності водоростей і збільшення частки біогенних речовин у системі. Концентрації амонію (0,785 мг N/дм³), нітритів (0,001 мг N/дм³) та нітратів (0,018 мг N/дм³) не перевищували граничні нормативи, проте вміст фосфатів становив 0,02 мг P/дм³, що за певних умов може сприяти наростанню біологічної продукції. Перманганатна окисність у 2010 р. була підвищеною (32,8 мг O₂/дм³), що вказує на накопичення органічних домішок. Високі показники біхроматної окисності у попередні роки підтверджують тривалу тенденцію погіршення якості води.

Аналіз багаторічних гідрохімічних даних показує чітку тенденцію до погіршення якості води озера з 1970-х до 2010 р. У 1975 р. спостерігались початкові ознаки перенасичення води озера органічними речовинами. У 1988 р. у водоймі фіксувався дефіцит кисню, підвищення концентрації загального заліза, що вказувало на посилення редуційних процесів у донних шарах. Протягом 1989-2003 рр. біогенні показники різко погіршувались. Максимальні концентрації амоній-іону у 2003 р. сягнули 3,15 мг N/дм³ (понад 3 ГДК), фосфатів – 0,86 мг P/дм³ (перевищення у 1,7 раза), нітратів – 3,45 мг N/дм³ (перевищення на 72,5%), БСК₅ – 7,76 мг O₂/дм³ (перевищення у 2,6 раза). Все це ознаки високого органічного навантаження на екосистему. Загальна тенденція зміни гідрохімічних показників вказує на те, що озеро зазнає стабільного впливу антропогенних факторів. Серед них найважливішими є поверхневий стік із селитебної території, сільськогосподарських земель, стихійних

сміттєзвалищ. У результаті в озері відбувається накопичення органічних речовин, зростає вміст сполук азоту й фосфору, посилюються процеси біохімічного розпаду та дефіцит кисню. Після 2010 р. дані моніторингу відсутні, але зберігається висока ймовірність того, що негативні тенденції тривають і посилюються на тлі змін клімату, посилення рекреаційного навантаження та інших форм антропогенного тиску.

Водозбір оз. Кримне загалом зберігав природності, ступінь його антропогенної трансформації – не високий. Причина полягає в тому, що більша частина території належить до Шацького НПП, де оберігаються природні ландшафти та обмежена господарська діяльність. У структурі земельного покриття (land cover) водозбору переважають лісові масиви, розташовані на захід і схід від водойми, а також заболочені луки на півночі та північному сході. На південному заході та південному сході зустрічаються орні землі, однак їх частка в загальній структурі земель водозбору невелика. Від найближчого населеного пункту (с. Мельники) озеро відокремлене смугою природних угідь шириною до 1,5 км.

Незважаючи на відносно добре збережене довкілля водозбору, найвразливішою його частиною є прибережно-захисна смуга. Згідно ст. 60-61 Водного кодексу України [21] навколо озер має бути передбачена 100-метрова зона з обмеженою господарською діяльністю. На окремих ділянках, насамперед, на південному, південно-східному та західному узбережжях землі в межах цієї смуги розпайовані й використовуються під рілля. Це суперечить чинним законодавчим обмеженням і створює ризики для екосистеми озера. Разом із поверхневим стоком мінеральні добрива, пестициди та завислі часточки ґрунту можуть потрапляти у водойму, посилюючи евтрофікаційні процеси. Капітальна незаконна забудова чи інші грубі порушення у межах прибережно-захисної смуги відсутні, але розорювання й сільськогосподарське використання прибережних земель є суттєвим екологічним чинником та потребує регулювання.

Додатковим потенційним ризиком є об'єкти за межами прибережної території. Наприклад, сміттєзвалища. Забруднюючі речовини з відходів і вигрібних ям можуть мігрувати в ґрунті та поверхневі води, а далі потрапляти в озеро. Крім того, останніми роками

у с. Мельники збільшується кількість приватних садиб, орієнтованих на прийом відпочивальників. Вони користуються рекреаційними можливостями Шацького поозер'я, насамперед, оз. Пісочне. Зростання антропогенного навантаження може мати відкладений негативний ефект, особливо за умови відсутності належної інженерної інфраструктури.

Евтрофікація озер – актуальна екологічна проблема, що потребує ефективних методів оцінки та моніторингу. Для озера Кримне евтрофікація оцінена методами дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). На супутникових знімках зафіксовані зміни кольору води, зумовлені зростанням концентрації хлорофілу та завислих речовин, які є візуальними індикаторами надмірного розвитку водоростей, а також поширення поясу гідрофітів. Мультиспектральні сенсори супутників дозволяють кількісно визначати концентрацію хлорофілу, картографувати поширення водоростей, моніторити динаміку цих процесів у часі [22].

У рамках дослідження для оцінки стану евтрофікації озера Кримне застосований нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI). Цей індекс використовується як індикативний, а не абсолютний показник евтрофікації. Він набуває все більшого поширення для аналізу гідроекологічного стану водойм завдяки своїй простоті і доступності [22]. Базується на вимірюванні відбиття світла у червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах спектра. Хлорофіл, що міститься у рослинах (включно з водоростями), активно поглинає червоне світло і значно відбиває інфрачервоне. Чим вища концентрація хлорофілу, тим більша різниця між цими показниками, що і відображається значенням NDVI. Шкала значень індексу коливається від -1 до 1. Для водних об'єктів інтерпретація дещо відрізняється від традиційної для наземної рослинності. Від'ємні значення (до -1) свідчать про чисту воду з мінімальною кількістю водоростей та завислих речовин, значення в інтервалі (0; 0,2) вказують на помірну евтрофікацію, (0,3; 0,4) – високий ступінь евтрофікації, характерний для водойм з великою кількістю водоростей та завислих частинок у воді, вищі значення – критичний рівень евтрофікаційних процесів у озері. Тобто, чим вищі значення NDVI у водоймі, тим більший ступінь її евтрофікації. Порівняння значень NDVI у різні часові періоди дозволяє ефективно відстежувати тенден-

ції евтрофікації. На значення NDVI можуть впливати також глибина та прозорість водойми, тому для повноцінної оцінки евтрофікації рекомендується поєднувати його з іншими методами моніторингу якості води (гідробіологічне картування, біоіндикація, гідрохімічний аналіз).

Аналіз серії супутникових знімків з візуалізованим шаром NDVI, отриманих у сервісі *Copernicus Browser* за 2025 р. (рис. 2), дозволив оцінити сезонну динаміку рослинного покриву в межах водозбору озера та просторові особливості зміни індексу водної поверхні. Візуальна інтерпретація фрагментів знімків продемонструвала чітко виражені річні коливання інтенсивності вегетації як на прилеглих до озера територіях, так і на окремих ділянках водойми. Зокрема, у зимовий період (січень-березень) для поверхні озера властиві від'ємні значення NDVI. Це зумовлено наявністю льодового покриву, чистою водою та

фазою спокою, у якій перебуває рослинність. Прибережні ділянки водозбору також демонструють низькі значення NDVI, що відповідає особливостям природних умов холодного сезону.

Перехід до весняного періоду (квітень) супроводжується очищенням озера від льодового покриву та відновленням спектральної активності рослинності. На весняних знімках чітко фіксується виразне збільшення NDVI на берегах озера, властиве для початку інтенсивної весняної вегетації. Водна гладь набуває однорідної структури зі стабільно низькими значеннями індексу, що дає змогу чітко відмежувати її від оточуючих зелених масивів прилеглих до озера ділянок водозбору. Протягом літнього періоду (травень-липень) індекс NDVI досягає максимальних значень. Лісові та лучні екосистеми водозбору характеризуються максимальним рівнем вегетаційної активності. У цей час на поверхні озера локально фіксують-

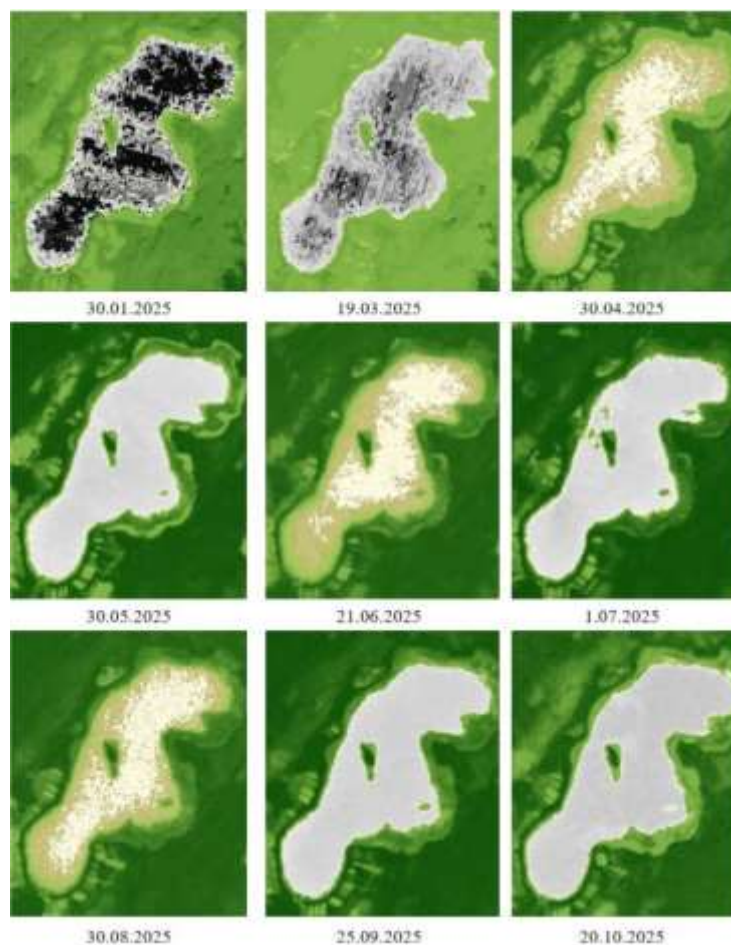


Рис. 2 – Фрагменти супутникових знімків озера з візуалізованим шаром NDVI за 2025 р. (отримано в Copernicus Browser)

Fig. 2 – Fragments of satellite images of the lake with a visualized NDVI layer for 2025 (obtained in Copernicus Browser)

ся ділянки з підвищеними значеннями NDVI, що може свідчити про розвиток макрофітів, підводних заростей або сезонне розповсюдження фітопланктону. Такі прояви підвищення значень індексу є типовими для евтрофних та мезотрофних водойм у період літньої біологічної продуктивності.

Наприкінці літа та на початку осені (серпень-жовтень) спостерігається поступове зниження значень індексу в межах водозбору, що відображає природне згасання вегетаційних процесів. Водночас водна поверхня залишається більш-менш стабільною за спектральними характеристиками. Хоча окремим невеликим ділянкам водного дзеркала водойми властиві неоднорідні значення індексу, що свідчать про біогенні процеси, вплив вітрового перемішування, зміни прозорості води. Останній знімок (жовтень) чітко фіксує зменшення значень індексу NDVI, що відповідає сезонному переходу до холодного періоду.

Отже, динаміка індексу NDVI чітко відображає сезонність – від мінімальних зна-

чень узимку до максимальних у літній період. Значення індексу для водної поверхні озера стабільно нижчі, ніж для суші. Улітку розвиток водоростей локально підвищує NDVI на деяких частинах озера. Стан навколишньої території свідчить про переважання природної рослинності, яка активно реагує на сезонну зміну кліматичних умов.

Лівий графік (рис. 3) відображає сезонні коливання індексу NDVI в межах акваторії озера протягом року. Від'ємні значення взимку та на початку весни спричинені льодовим покривом і відсутністю вегетації. У літній період відмічаються локальні підвищення NDVI, що пов'язані з розвитком водної рослинності та зміною оптичних властивостей води (помутнінням). Восени індекс стабілізується на рівні, характерному для відкритої водної поверхні з низькою біологічною активністю.

Графік динаміки NDVI озера Кримне за п'ятирічний період демонструє міжрічну та сезонну варіабельність значень, що дозво-

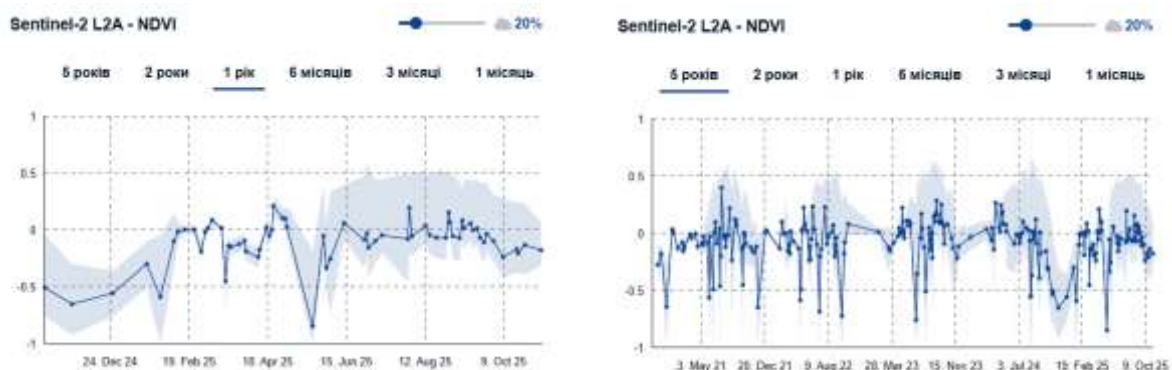


Рис. 3 – Динаміка індексу NDVI для озера Кримне протягом 2025 р. та за 5 років

Fig. 3 – Dynamics of the NDVI index for Lake Krymne during 2025 and over 5 years

ляє оцінити довготривалі коливання спектральних характеристик водної поверхні та прилеглих ділянок водозбору. Протягом кожного із років простежуються повторювані цикли:

- зимового зниження значень NDVI до $-0,6 \dots -0,9$, спричиненого льодовим покривом та мінімальним відбиттям у червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах;
- помірного підвищення значень індексу навесні у зв'язку зі сходженням льоду та появою відкритої водної поверхні;
- літньої варіабельності значень, що проявляється додатними значеннями індексу (до $+0,2 \dots +0,3$) внаслідок підвищення біологічної продуктивності, каламутності, цвітіння

води чи інших умов;

- осінньої стабілізації, коли NDVI повертається до слабо негативних значень, властивих холодному періоду.

Хоча структура сезонних змін значень індексу загалом схожа, амплітуда коливань різниться між роками. Наприклад, протягом 2021-23 рр. спостерігаються більш контрастні піки та спади значень NDVI, що пов'язане з різною прозорістю води, локальними змінами рівня трофності, відмінностями розподілу хмарності, коливаннями площі озера та рівнів води. Загалом дані за 5 років підтверджують стабільність динаміки значень NDVI для оз. Кримне, щя характерної для водойм

помірного поясу. А саме – мінімум взимку, зростання навесні, динамічна зміна значень протягом літньої біологічної активності та поступове зниження восени. Міжрічні відмінності пов'язані з гідрологічними особливостями конкретних років та змінами екологічного стану водойми.

Цікаво порівняти динаміку евтрофікаційних процесів в різних озерах Шацької групи за даними ДЗЗ. Порівняльний аналіз динаміки індексу NDVI для озер Кримне, Світязь та Пісочне у 2023 р. виявив суттєві відмінності в характері евтрофікації Кримного

порівняно з іншими водоймами (рис. 4). Зокрема, графік річного ходу NDVI для оз. Кримне менш гладкий і варіабельніший, пікові значення (максимальні і мінімальні) для цього озера Кримне вищі та частіші, ніж для оз. Світязь. Це свідчить про вищу амплітуду коливань показників евтрофікації та частіші спалахи розвитку водоростей в Кримному. Низький коефіцієнт кореляції ($r = -0,18$) між річним ходом значень NDVI для озер Кримне та Світязь підтверджує значні відмінності у динаміці їх евтрофікації, різні чинники впливу та стійкість їх гідроекосистем.

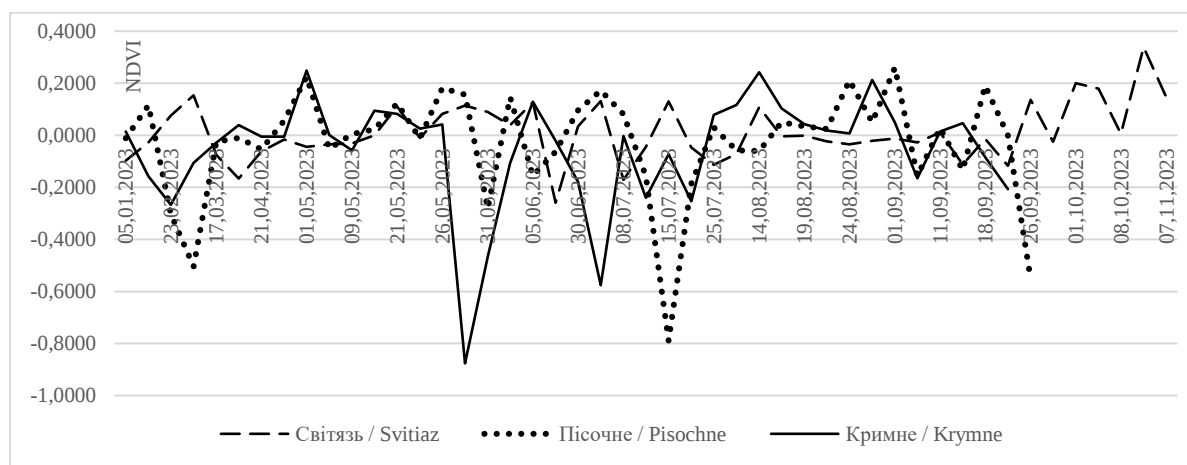


Рис. 4 – Порівняння динаміки індексу NDVI для окремих Шацьких озер протягом 2023 р.

Fig. 4 – Comparison of NDVI index dynamics for individual Shatsk Lakes during 2023.

Динаміка NDVI для оз. Кримне більш схожа на аналогічну для оз. Пісочне, особливо у теплий період року. Більшість піків значень індексу збігаються за максимальними та мінімальними значеннями та частотою. Ця схожість пояснюється співставними розмірами (площа оз. Пісочне – 139 га, оз. Кримне – 145 га), розташуванням в однакових фізико-географічних умовах і територіа-

льною близькістю. Вищий коефіцієнт кореляції ($r = 0,33$) між річним ходом NDVI цих двох озер свідчить про тісніший зв'язок процесів евтрофікації, схожі антропогенні навантаження та природні умови. При цьому, хоча озеро Пісочне гіпсометрично дещо вище і має піщані береги, воно є більш рекреаційно освоєним, а отже, відчуває інтенсивніший антропогенний тиск.

Висновки

На основі проведеної комплексної оцінки гідроекологічного стану оз. Кримне можна зробити низку проміжних висновків. По-перше, рівень антропогенного навантаження на озеро відносно невисокий, що зумовлено значною залісненістю та заболоченістю водозбірною басейну, низькою часткою орних земель у структурі землекористування та щільністю сільських поселень. По-друге, хімічний склад води визначається, переважно, природними чинниками (літологією, особливостями

грунтового покриття та гідрологічними умовами водозбору), антропогенний чинник теж впливає, проте його рівень невисокий. В той же ж час фіксується тенденція до збільшення вмісту органічних речовин і біогенних елементів, насамперед, сполук азоту та фосфору, у воді озера. Це свідчить про прогресуючу евтрофікацію водойми. Джерелами надходження біогенів є стоки з селитебних ділянок, сільськогосподарських угідь, локальних стихійних сміттєзвалищ. Аналіз динаміки NDVI

показує сезонність евтрофікаційних процесів і нерівномірність розподілу водної рослинності, що найбільш інтенсивно розвивається у відносно мілководних північній та східній частині озера. Сучасний гідроекологічний стан озера можна визначити як задовільний з наявністю виразних ознак прогресуючого евтрофікування. Така ситуація вимагає реалізації природоохоронних заходів.

Ключовим серед них є дотримання режиму прибережних захисних смуг шириною 100 м. Рослинний покрив таких смуг ефективно фільтрує поверхневий стік, що зменшує надходження біогенів. Важливим заходом є оптимізація землекористування у межах водозбору. Зменшення застосування агрохімікатів, перехід до контурно-меліоративних технологій землеробства та впровадження ґрунтозахисних практик (мульчування, безпліцевий обробіток, сівоzmіни, полезахисні смуги, протиерозійні споруди) сприятимуть зниженню інтенсивності поверхневого стоку та винесенню біогенних речовин в озеро.

Суттєвий ефект забезпечить модернізація системи водовідведення у с. Мельники, зокрема, охоплення усіх домогосподарств каналізаційною мережею та будівництво очисних споруд. Частково це вже реалізується у Шацькій територіальній громаді в межах транскордонних екологічних проєктів [23]. Важливо ліквідувати несанкціоновані сміттєзвалища і впорядкувати системи збору побутових відходів. Це забезпечить зменшення надходження органічних і біогенних сполук у водойму з прибережних територій.

Досягнення доброго гідроекологічного

стану озера неможливе без створення повноцінної системи гідроекологічного моніторингу, що проводитиметься Шацьким НПП. Моніторинг повинен включати регулярний відбір проб води, дослідження гідробіологічних показників, картування рослинності за допомогою ДЗЗ з використанням вегетаційних індексів, аналіз донних відкладів та контроль за змінами землекористування. На основі отриманих даних прогнозуватимуться темпи евтрофікації озера з урахуванням зміни клімату.

Також серед природоохоронних заходів важливими є запровадження режиму лімітованого природокористування, охорона прибережних і болотних екосистем, обмеження меліоративних робіт та вирубок, регулювання рекреаційного навантаження. Реалізація комплексу заходів сприятиме підтримці екологічної рівноваги та підвищенню стійкості гідроекосистеми озера.

Додатковим інструментом, який наразі використовувати не доцільно, хоча на найближчу перспективу можливо й буде варто, є біоремедіація, тобто використання рослин і гідробіонтів, здатних поглинати біогени та поліпшувати кисневий режим. Цей метод є екологічно безпечним та створює довготривалий позитивний екологічний ефект. Також дуже важливими напрямками охорони та збереження озера є екологічна освіта та просвітництво. залучення громади до очистки берегів, різноманітних волонтерських ініціатив і популяризація раціонального природокористування забезпечить екологічну відповідальність та природоохоронний потенціал території.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
В роботі не використано ресурс штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. Boros, E. Vörös, L. (2023). Hydroecological State Of Lake Neusiedl as the Largest European Representative of the Threatened Alkaline Soda Waters. SSRN. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4631993>
2. Heino J., Alahuhta J., Bini L. M., Cai Y., Heiskanen A.-S., Hellsten S., Kortelainen P., Kotamäki N., Tolonen K.T., Vihervaara P., Vilmi A., Angeler D. G. Lakes in the era of global change: moving beyond single-lake thinking in maintaining biodiversity and ecosystem services. *Biological reviews*. 2020. Vol. 96, No 1. <https://doi.org/10.1111/brv.12647>
3. Diwen Liang, Qing Wang, Nan Wei, Changkuan Tang, Xian Sun, Yufeng Yang. Biological indicators of ecological quality in typical urban river-lake ecosystems: The planktonic rotifer community and its response to environmental factors, *Ecological Indicators*, 2020. Vol. 112, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106127>

4. Oleksy I. A., Baron J. S., Leavitt P. R., Spaulding S. A. Nutrients and warming interact to force mountain lakes into unprecedented ecological states. *Proc. R. Soc.* 2020. B.28720200304. <http://doi.org/10.1098/rspb.2020.0304>
5. Fergus, C. E., Brooks, J. R., Kaufmann, P. R., Herlihy, A. T., Pollard, A. I., Weber, M. H., Paulsen, S. G. Lake water levels and associated hydrologic characteristics in the conterminous U.S. *Journal of the American Water Resources Association*, 2020. Vol. 56. N 2, P. 1–20. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12817>
6. Ibrahim, A., Capo, E., Wessels, M., Martin, I., Meyer, A., Schleheck, D., Epp, L. S. Anthropogenic impact on the historical phytoplankton community of Lake Constance reconstructed by multimarker analysis of sediment-core environmental DNA. *Molecular Ecology*, 2020. Vol.29. P. 28–42. <https://doi.org/10.1111/mec.15696>
7. Tammeorg, O., Chorus, I., Spears, B., Nöges, P., Nürnberg, G. K., Tammeorg, P., Søndergaard, M., Jeppesen, E., Paerl, H., Huser, B., Horppila, J. Sustainable lake restoration: From challenges to solutions. *WIREs Water*, 2023. Vol. 10. N 6. e1689. <https://doi.org/10.1002/wat2.1689>
8. Арсан О. М., Ситник Ю. М., Горбатюк Л. О., Кукля І. Г. Еколого-токсикологічні дослідження озерних екосистем Шацького національного природного парку: органічні токсичні речовини у воді. *Природа Західного АрсанПолісся та прилеглих територій*. 2012. №9. С. 325-328.
9. Корлятович Т.Ю., Тартачинська З.Р., Покотило І.Я. Дослідження аномальності стану рівня води Шацьких озер у 2019 році. *Екологічні науки*. 2020. № 1(28). С. 221-227. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.35>
10. Хільчевський В.К., Забокрицька М.Р. Основні аспекти морфометрії та гідрохімії Шацьких озер. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2020. № 3 (58). С. 92-100. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2020.3.9>
11. Pyin L. V., Pyina O. V. Dynamics of hydromorphological parameters of lakes of Shatsk National Nature Park (1933–2021). XVI International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”. 2022. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580079>
12. Ситник Ю.М., Шищенко П.Г., Ільїна О.В., Хомік Н.В. Гідрохімічні дослідження озерних екосистем Шацького національного природного парку: озеро Кримне. *Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки*. 2014. №11. С. 29-35.
13. Ковальчук С.В. Трансформація водних об'єктів Шацького поозер'я за результатами оцінки антропогенного навантаження на поверхневі води. *The 6th International scientific and practical conference “Multidisciplinary scientific notes. Theory, history and practice”* (November 01–04, 2022) Edmonton, Canada. International Science Group. 2022. С. 42-45.
14. Ковальчук С. В. Аналіз рівня антропогенного навантаження на природні комплекси стаціонарними джерелами забруднення Шацького національного природного парку (ШНПП). *Вісник НУВГП*. 2008. Вип. 2(42), ч. 1. С. 35-42.
15. Конішук В.В., Христецька М.В. Екологічна оцінка евтрофікації озер біосферного резервату «Шацький». *Агроекологічний журнал*. 2023. №3. С. 62-70. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2023.287764>
16. Романенко В. Д., Щербак В. І., Якушин В. М., Майстрова Н. В., Семенюк Н.Є. Загрози антропогенного впливу на ландшафтне і біологічне різноманіття озер Шацького національного природного парку. *Природа Західного Полісся та прилеглих територій*. 2012. №9. С.319-324.
17. Ромашенко М.І., Яцюк М.В., Сидоренко О.О., Нечай О.М., Воропай Г.В., Наседкін І.Ю., Цветова О.В., Сайдак Р.В. Причини обміління Шацьких озер і шляхи регулювання їх водного балансу. *Вісник аграрної науки*. 2020. №8 (809). С. 5-13. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202008-01>
18. Фесюк В. О., Полянський С. В., Копитюк Т. В. Методика та практична імплементація застосування даних ДЗЗ для моніторингу евтрофікації водойм (на прикладі Турського озера). *Наукові записки ТНПУ імені Володимира Гнатюка. Серія: географія*. № 1. 2022. С. 159-166. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.22.1.20>
19. Фесюк В. О., Нетробчук І. М., Полянський С. В., Довган Д. Я. Особливості сучасного стану евтрофікації Шацьких озер. *Український журнал природничих наук*. 2024. №8. С. 279-288. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.29>
20. Ільїн Л.В., Мольчак Я.О. Озера Волині: Лімно-географічна характеристика. Луцьк: Надстир'я, 2000. 140 с.
21. Водний кодекс України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>
22. Федоровський О. Д., Хижняк А. В., Томченко О. В. Оцінка якості водного середовища міських водойм з використанням методів системного аналізу на основі комплексування даних ДЗЗ. *Космічна наука і технологія*. 2021. Т. 27. № 5. С. 11-18. <https://doi.org/10.15407/knit2021.05.011>
23. Комплексний план просторового розвитку Шацької громади. URL: <https://shsrada.gov.ua/kompleksnij-plan-teritorii-shackoi-selischnoi-teritorialnoi-gromadi-09-42-08-13-12-2021/>

Стаття надійшла до редакції 29.10.2025
Стаття рекомендована до друку 08.12.2025

Переглянуто 30.11.2025
Опубліковано 30.12.2025

V. O. FESYUK, DrS (Geography), Prof.,
Professor of the Department of Physical Geography
e-mail: fesyuk@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3954-9917>
Lesya Ukrainka Volyn National University,
13 Voli Ave., Lutsk, 43025, Ukraine

I. A. MOROZ, PhD (Chemistry),
Associate Professor of the Department of Food Technologies and Chemistry
e-mail: i.moroz@lntu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-4876>
Lutsk National Technical University,
75 Lvivska St., Lutsk, 43018, Ukraine

METHODOLOGY AND THE HYDROECOLOGICAL STATE ASSESSMENT OF LAKE KRYMNE

Purpose. To develop and test a methodology for the indicative and spatial-temporal quantitative assessment of the ecological status of Lake Krymne in order to determine its current ecological stability, identify hydroecological problems, and outline priority directions for its further use and monitoring.

Methods. Field hydrological studies, cartographic methods, remote sensing, mathematical modeling and forecasting.

Results. The morphometric characteristics of the lake have changed compared to 1933: the area and the volume decreased due to mid-to-late 20th century land reclamation. The lake's catchment retains features of natural landscapes. However, the lake undergoes significant transformation: part of the riparian zone is plowed, local waste dumps are recorded, and recreational pressure is increasing. Anthropogenic impacts contribute to the inflow of biogenic substances. Water quality deterioration is observed, with increased organic matter, phosphates, and ammonium, periodic oxygen deficits and signs of eutrophication. Remote sensing analysis (synthetic NDVI index) confirms seasonal fluctuations and summer productivity increases, with local growth of algae and macrophytes. The lake is sensitive to pressure and requires continuous monitoring. Main sources of anthropogenic impact are runoff from settlements, agricultural fields, and waste dumps.

Conclusions. Lake Krymne has a satisfactory hydroecological status, but a tendency toward deterioration is evident. This process is driven by increased biogen content in the water, eutrophication, and seasonal vegetation development. Priority conservation measures include maintaining protective riparian buffer zones, optimizing land use, modernizing wastewater systems in nearby settlements, eliminating illegal dumps, and establishing a systematic hydroecological monitoring program for the lake.

KEYWORDS: *morphometric changes, anthropogenic pressure, eutrophication, water hydrochemical composition, hydroecological status, Lake Krymne monitoring*

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the author has fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors contribution: All authors contributed equally to this work

The work does not use artificial intelligence resources.

References

1. Boros, E., & Vörös, L. (2023). Hydroecological state of Lake Neusiedl as the largest European representative of the threatened alkaline soda waters. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4631993>
2. Heino, J., Alahuhta, J., Bini, L. M., Cai, Y., Heiskanen, A.-S., Hellsten, S., Kortelainen, P., Kotamäki, N., Tolonen, K. T., Vihervaara, P., Vilmi, A., & Angeler, D. G. (2020). Lakes in the era of global change: Moving beyond single-lake thinking in maintaining biodiversity and ecosystem services. *Biological Reviews*, 96(1). <https://doi.org/10.1111/brv.12647>
3. Liang, D., Wang, Q., Wei, N., Tang, C., Sun, X., & Yang, Y. (2020). Biological indicators of ecological quality in typical urban river-lake ecosystems: The planktonic rotifer community and its response to environmental factors. *Ecological Indicators*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106127>
4. Oleksy, I. A., Baron, J. S., Leavitt, P. R., & Spaulding, S. A. (2020). Nutrients and warming interact to force mountain lakes into unprecedented ecological states. *Proceedings of the Royal Society B*, 287, 20200304. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.0304>

5. Fergus, C. E., Brooks, J. R., Kaufmann, P. R., Herlihy, A. T., Pollard, A. I., Weber, M. H., & Paulsen, S. G. (2020). Lake water levels and associated hydrologic characteristics in the conterminous U.S. *Journal of the American Water Resources Association*, 56(2), 1–20. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12817>
6. Ibrahim, A., Capo, E., Wessels, M., Martin, I., Meyer, A., Schleheck, D., & Epp, L. S. (2020). Anthropogenic impact on the historical phytoplankton community of Lake Constance reconstructed by multimarker analysis of sediment-core environmental DNA. *Molecular Ecology*, 29, 28–42. <https://doi.org/10.1111/mec.15696>
7. Tammeorg, O., Chorus, I., Spears, B., Nöges, P., Nürnberg, G. K., Tammeorg, P., Søndergaard, M., Jeppesen, E., Paerl, H., Huser, B., & Horppila, J. (2023). Sustainable lake restoration: From challenges to solutions. *WIREs Water*, 10(6), e1689. <https://doi.org/10.1002/wat2.1689>
8. Arsan O. M., Sitnik, O. M., Horbatiuk, L. O., & Kuklia, I. H. (2012). Ecotoxicological research of lake ecosystems of Shatsk National Nature Park: Organic toxic substances in water. *Nature of Western Polissya and Adjacent Territories*, 9, 325–328. (in Ukrainian)
9. Korlyatovych, T. Yu., Tartachynska, Z. R., & Pokotylo, I. Ya. (2020). Study of anomalous water level conditions of the Shatsk lakes in 2019. *Ecological Sciences*, 1(28), 221–227. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.35> (in Ukrainian)
10. Khilchevskiy, V. K., & Zabokrytska, M. R. (2020). Key aspects of morphometry and hydrochemistry of the Shatsk lakes. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 3(58), 92–100. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2020.3.9> (in Ukrainian)
11. Ilyin, L. V., & Ilyina, O. V. (2022). Dynamics of hydromorphological parameters of lakes of Shatsk National Nature Park (1933–2021). *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580079>
12. Sitnik, Yu. M., Shyshchenko, P. H., Iliina, O. V., & Khomik, N. V. (2014). Hydrochemical studies of lake ecosystems of Shatsk National Nature Park: Lake Krymne. *Scientific Bulletin of Lesya Ukrainka Eastern European National University*, 11, 29–35. (in Ukrainian)
13. Kovalchuk, S. V. (2022). Transformation of water bodies of the Shatsk lakes region based on the assessment of anthropogenic load on surface waters. In *Multidisciplinary Scientific Notes. Theory, History and Practice* (pp. 42–45). International Science Group.
14. Kovalchuk, S. V. (2008). Analysis of anthropogenic load on natural complexes from stationary pollution sources in Shatsk National Nature Park. *Bulletin of NUVGP*, 2(42), 35–42. (in Ukrainian)
15. Konishchuk, V. V., & Khrystetska, M. V. (2023). Ecological assessment of eutrophication of lakes of the Shatsk Biosphere Reserve. *Agroecological Journal*, 3, 62–70. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2023.287764> (in Ukrainian)
16. Romanenko, V. D., Shcherbak, V. I., Yakushyn, V. M., Maistrova, N. V., & Semeniuk, N. Ye. (2012). Threats of anthropogenic impact on landscape and biological diversity of the lakes of Shatsk National Nature Park. *Nature of Western Polissya and Adjacent Territories*, 9, 319–324. (in Ukrainian)
17. Romashchenko, M. I., Yatsiuk, M. V., Sydorenko, O. O., Nechai, O. M., Voropai, H. V., Nasiedkin, I. Yu., Tsvetova, O. V., & Saidak, R. V. (2020). Causes of shallowing of the Shatsk lakes and ways to regulate their water balance. *Bulletin of Agrarian Science*, 8(809), 5–13. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202008-01> (in Ukrainian)
18. Fesiuk, V. O., Polianskyi, S. V., & Kopytiuk, T. V. (2022). Methodology and practical implementation of remote sensing data for monitoring eutrophication of water bodies (a case of Turske Lake). *Scientific Notes of TNPU Named after Volodymyr Hnatiuk. Series: Geography*, 1, 159–166. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.22.1.20> (in Ukrainian)
19. Fesiuk, V. O., Netrobchuk, I. M., Polianskyi, S. V., & Dovhan, D. Ya. (2024). Features of the current state of eutrophication of the Shatsk lakes. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 8, 279–288. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.29> (in Ukrainian)
20. Ilyin, L. V., & Molchak, Ya. O. (2000). *Lakes of Volyn: Limnographic characteristics*. Nadstyria.
21. Water Code of Ukraine. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (in Ukrainian)
22. Fedorovskiy, O. D., Khyzhniak, A. V., & Tomchenko, O. V. (2021). Assessment of the quality of the aquatic environment of urban water bodies using system analysis methods based on the integration of remote sensing data. *Space Science and Technology*, 27(5), 11–18. <https://doi.org/10.15407/knit2021.05.011> (in Ukrainian)
23. Comprehensive Spatial Development Plan of the Shatsk Community. (2021). <https://shsrada.gov.ua/kompleksnij-plan-teritorii-shackoi-selischnoi-teritorialnoi-gromadi-09-42-08-13-12-2021/> (in Ukrainian)

The article was received by the editors 29.10.2025
The article is recommended for printing 08.12.2025

The article was revised 30.11.2025
This article published 30.12.2025