

УДК 556.552

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-1-10>

Василь ФЕСЮК

доктор географічних наук, професор, завідувач кафедри фізичної географії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0003-3954-9917

Ірина НЕТРОБЧУК

кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної географії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0002-8633-7426

Микола АЛЕКСІЙЧУК

здобувач другого рівня вищої освіти, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Бібліографічний опис статті: Фесюк, В., Нетробчук, І., Алексійчук, М. (2023). Оцінка евтрофікованості озера Велике методами дистанційного зондування Землі. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 83–88, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-1-10>

ОЦІНКА ЕВТРОФІКОВАНОСТІ ОЗЕРА ВЕЛИКЕ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Метою статті є визначення рівня евтрофікованості озера Велике для його раціонального використання та охорони. Для досягнення мети потрібно оцінити рівень евтрофікації озера, його динаміку, причини виникнення цього явища, запропонувати шляхи зменшення рівня евтрофікованості.

Методологічною основою роботи є напрацювання українських та зарубіжних вчених у галузі лімнології, гідроекології, дистанційного зондування Землі. Застосовані методи: аналіз гідрометричних характеристик та гідрологічного режиму озера, геоекологічна оцінка стану водозбору озера, оцінка евтрофікації озера методами дистанційного зондування Землі.

Наукова новизна роботи полягає у практичній імплементації методики оцінки рівня евтрофікації одного з типових озер Волинського Полісся, а саме, озера Велике.

Висновки і перспективи досліджень. Гідроекологічний стан озера погіршується внаслідок антропогенного впливу. Особливо негативно впливає нераціональна структура використання земель водозбору (перевищення площ екологічно не стабільних ландшафтів над стабільними) і порушення санітарно-екологічних норм під час забудови прибережних зон. Тому поверхневий стік з водозбору забруднює озеро. Особливо небезпечним є забруднення біогенними речовинами. Збільшення їх концентрації у воді зумовлює евтрофікацію водойми. Рівень евтрофікації озера оцінено як не високий. Але навіть за такого рівня евтрофікації знижується якість води, погіршуються екологічні умови для живих організмів. Для поліпшення гідроекологічного стану необхідно зменшити надходження до озера біогенних речовин, поліпшити гідрологічний режим озера, збільшити аерацію води та реалізувати заходи протидії потеплінню клімату.

Ключові слова: озеро, лімносистема, гідроекологічний стан озера, евтрофікація озера, рівень евтрофікації, методи дистанційного зондування Землі.

Vasyl FESYUK

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of Department of Physical Geography, Lesia Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0003-3954-9917

Iryna NETROBCHUK

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Physical Geography, Lesia Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0003-3954-9917

Mykola ALEKSIYCHUK

Second-level graduate of higher education, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voly ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

To cite this article: Fesyuk, V., Netrobchuk, I., Aleksiychuk, M. (2023). Ocinka eutrofikovanosti озера Velyke metodamy dystancijnogo zonduvannya Zemli. [Assessment of lake Velyke eutrophication by remote sensing methods]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 83–88, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-1-10>

ASSESSMENT OF LAKE VELYKE EUTROPHICATION BY REMOTE SENSING METHODS

The purpose of the article is to determine the level of eutrophication of Lake Velyke for its rational use and protection. To achieve this goal, it is necessary to assess the level of eutrophication of the lake, its dynamics, causes, and to propose ways to reduce the level of eutrophication.

The methodological basis of the work is the achievements of Ukrainian and foreign scientists in the field of limnology, hydroecology, and remote sensing. Methods used: analysis of the hydrometric characteristics and hydrological regime of the lake, geoecological assessment of the lake catchment, assessment of lake eutrophication by remote sensing methods.

The scientific novelty of the work is that the article provides a practical implementation of the methodology for assessing the level of eutrophication of one the typical Volyn's lake.

Conclusions and prospects of research. The hydroecological state of the lake is deteriorating due to anthropogenic impact. The irrational structure of land use in the catchment area (excess of areas of ecologically unstable landscapes over stable ones) and violation of sanitary and environmental standards during the development of coastal zones have a particularly negative impact. As a result, surface runoff from the catchment pollutes the lake. Pollution by nutrients is particularly dangerous. An increase in their concentration in water causes eutrophication of the reservoir. The level of eutrophication of the lake is assessed as not high. But even at this level of eutrophication, water quality is decreasing and environmental conditions for living organisms are deteriorating. In order to improve the hydroecological state of the lake, it is necessary to reduce the flow of nutrients into the lake, improve its hydrological regime and implement measures to counteract climate warming.

Key words: lake, limnosystem, hydroecological state of the lake, lake eutrophication, eutrophication level, remote sensing methods.

Актуальність проблеми. Озера України, як і інші водні об'єкти, зазнають інтенсивного антропогенного впливу. Перш за все він полягає у надходженні до озер різноманітних забруднюючих речовин. Для озер Волинського Полісся скиди промислових стічних вод не характерні. Основними джерелами забруднення є стік з сільськогосподарських полів, ферм, селитебних територій, не обладнаних централізованою каналізацією. Такий стік містить багато біогенних речовин, насамперед сполук нітрогену і фосфору. Також погіршення екологічного стану зумовлюють зміни клімату, через які знижується надходження поверхневого і підземного стоку до озер, вони міліють, можуть пересихати. В результаті дії цих чинників проявляється несприятливий процес – евтрофікація озер. Оцінці евтрофікованості одного з озер Волинського Полісся, а саме оз. Велике, присвячена ця стаття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Озера Волинської області вивчалися в роботах

Ільїна & Мольчака, 2000, Ільїна, 2008. Екологічний стан озер Волинської області розглянуто в статті Шевчук, Юрчука & Горуна, 2009, колективній монографії за ред. Мольчака, 2019. Природні умови території дослідження детально описані в статті Шульгача, 2015. Гео-екологічна оцінка оз. Велике проведена в статті Мартинюка, Зубковича & Андрійчука, 2018. Можливості застосування методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для оцінки евтрофікації водойм обґрунтована в роботах Федоровського, Хижняк & Томченко, 2021, Фесюка, Полянського & Копитюк, 2022. Проте лімнологічна вивченість озер басейну р. Турії, зокрема, й озера Велике поки що недостатня. Необхідно й надалі проводити лімнологічні, гідроекологічні, гео-екологічні дослідження цієї території з метою раціонального використання та охорони озер.

Мета дослідження: визначення рівня евтрофікованості озера Велике для його раціонального використання та охорони.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Озеро Велике знаходиться в Ковельському районі Волинської області за 0,5 км на північ від с. Облапи в межах басейну р. Турія. Згідно схеми фізико-географічного районування за С.І. Кукурудзою (1991), озеро розміщене у Любомльсько-Ковельському фізико-географічному районі Волинського Полісся. В межах водозбору поширені місцевості зандрових рівнин із зеленомоховими і чорничниковими сосняками з домішкою дрібнолистяних порід на дерново-слабо- і середньопідзолистих ґрунтах, частково розораних.

Береги озера досить високі, 2,0-2,5 м над рівнем води, зарослі лісом-самосівом із дрібнолистяних порід (вільха, береза, верболіз, зрідка сосна). За різночасовими супутниковими знімками вставлено, що північна частина озерної тераси на початку 2000-х р.р. активно розорювалась, нині – це перелоги, локально вкриті дрібноліссям. Північно-західна частина тераси розорювалась ще до 2015 р., а з 2019 р. теж частково заростає дрібноліссям. Південно-східна прибережна частина покрита сосновим лісом, висота окремих дерев становить 18-22 м, діаметр стовбура 0,15-0,25 см (Мартинюк, Зубкович & Андрійчук, 2018). Західна частина озерної тераси заболочена, по ній прокопаний дренажний канал шириною 2 м, глибиною 1,5 м, що впадає в озеро. Літоральна зона озера на 10-15 м від берега, а в окремих місцях до 70 м, вкрита поясом макрофітів (очерет, рогіз, аїр болотний). Ця рослинність виконує важливу екологічну функцію, запобігаючи проникненню біогенних елементів до субліторальної зони озера.

Саме озеро за формою овальне. Площа – 0,124 км², довжина – 0,43 км, ширина максимальна – 0,4 км, середня – 0,29 км (Мольчак, 2019). При незначній площі озеро досить глибоке – максимальна глибина становить 11,8 м, а середня – 5,18 м. Глибина біля берегів незначна – до 2,5 м, різко зростає у центральній осьовій частині улоговини до 8-11 м. Об'єм води в озері становить 559 тис. м³.

Для оцінки еврифікованості оз. Велике методом дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) використано супутникові знімки місій Sentinel-2, Landsat-8 за 2022 р. Для них розрахований нормований різницевий індекс рослинності (NDVI), що є простим, але ефективним

індексом для кількісної оцінки динаміки вегетаційних процесів. Індекс базується на ефекті різного відбивання світла рослинами на певних довжинах хвилі і залежно від стану зелених рослин. Його діапазон значень знаходиться в межах (-1; 1). Значення NDVI близькі до -1 відповідають воді, в інтервалі (-0,1; 0,1), як правило, відповідають безплідним ділянкам (скелі, пісок або сніг), в інтервалі (0,2; 0,4) свідчать про низьку інтенсивність вегетації, а високі значення (близькі до 1) показують хороший стан рослинності і високий вегетаційний потенціал (NDVI, 2023).

В роботах (Федоровський, Хижняк & Томченко, 2021; Фесюк, Полянський & Копитюк, 2022) обґрунтовано можливість використання індексу NDVI для оцінки ступеня евтрофікації водойм. Це реалізується завдяки можливості диференціації значень NDVI по супутниковому знімку. Можна виділяти окремі ділянки води та узбережжя, вкритих рослинністю. Також в межах самого водного об'єкта можна виокремити ареали із відмінними значеннями інтенсивності вегетації, а значить і NDVI. Їх площа та локалізація змінюються упродовж року і залежать від поєднання багатьох чинників: температури води, віддаленості від берегу, вмісту біогенних сполук тощо. Визначення NDVI проводилось за допомогою інтернет-ресурсу sentinel-hub.com Європейського космічного агенства (ESA). Робота з згаданим ресурсом відбувалась через веб-додаток EO Browser. Дати знімків залежать від періодичності проходження супутника над певною територією (часова розрізненість), ступеня покриття неба хмарами (для аналізу відбирались знімки із хмарністю <10%).

За результатами аналізу супутникових знімків озера за багаторічний період встановлено, що для евтрофікації водойми характерна внутрішньорічна динаміка, яка найбільш чітко проявляється в теплий період року (рис. 1-2). Причому спостерігається така закономірність: в травні евтрофікація дуже низька, фактично відсутня, значення NDVI для поверхні озера -0,1-0,2, для деяких ділянок навіть менше, що відповідає безплідним ділянкам із відсутньою вегетацією. В червні значення NDVI зростають, з'являються окремі ділянки поверхні озера із додатними значеннями NDVI, що свідчить про початок активної вегетації поки

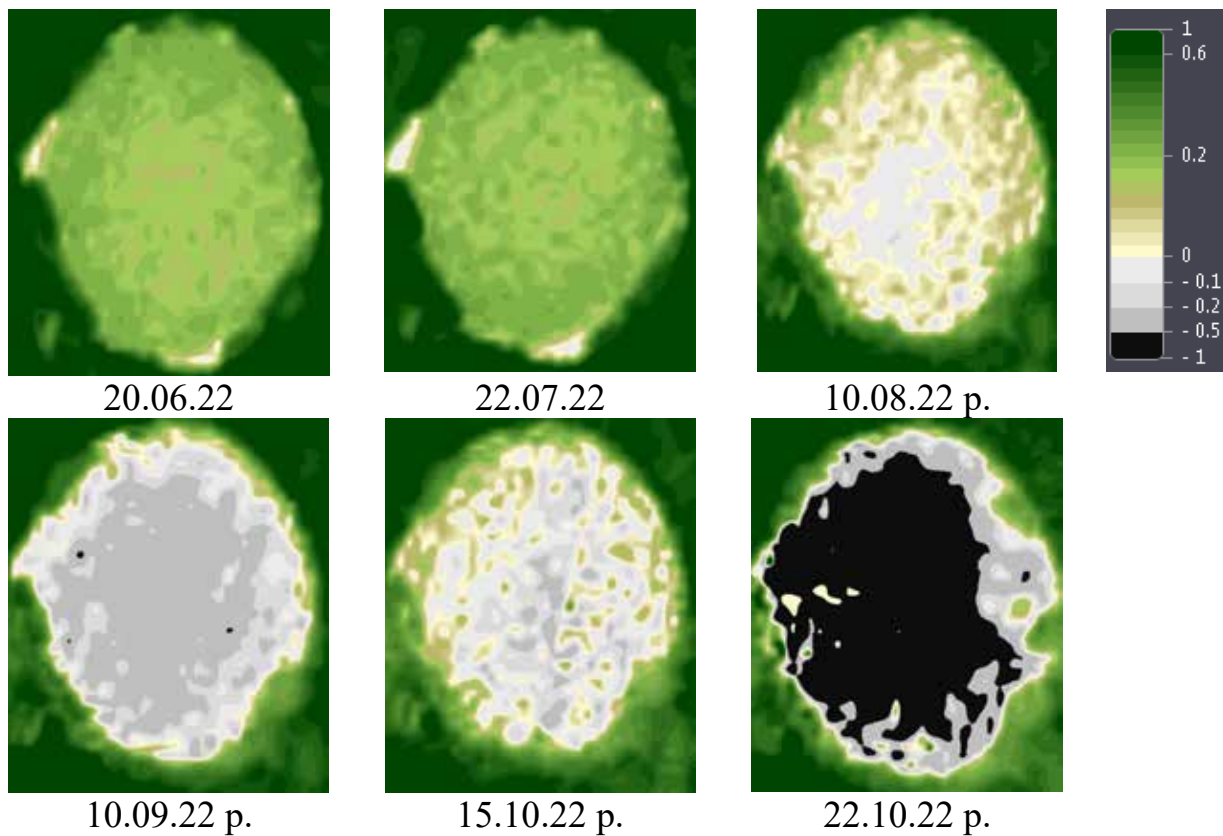
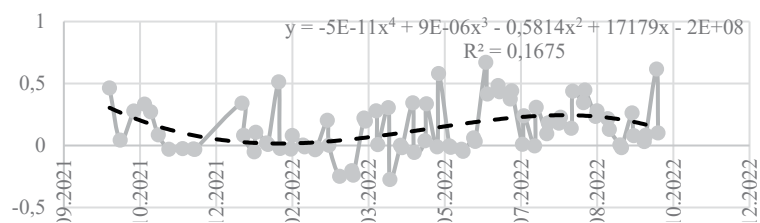


Рис. 1. Динаміка індексу NDVI оз. Велике за теплий період 2022 р. за даними місії Sentinel-2 ресурсу sentinel-hub.com (під рисунками – дати)



Динаміка NDVI за 1 рік



Апроксимація емпіричних даних поліномом 4 ступеня

Рис. 2. Внутрішньорічна динаміка індексу NDVI для оз. Велике за 2021–2022 рр. за даними місії Sentinel-2 ресурсу sentinel-hub.com

що далекої від небезпечних масштабів. Найменша етрофікованість (0,05-0,1) характерна для центральної найглибшої частини озера; ближче до берегів вегетація набагато активніша (0,2 і більше), в поясі макрофітів біля берегів значення NDVI максимальні (0,3 і більше). В липні значення NDVI продовжують зростати, зона із значеннями індексу 0,3-0,4 поширюється майже на всю поверхню озера. Ближче до середини серпня евтрофікація зменшується, озеро потрохи звільняється

від цвітіння води. Вищі значення індексу поступово відступають до берегів (рис. 1), в центральній глибшій частині озера вже фіксуються від'ємні значення NDVI (-0,1). В вересні значення індексу в центрі водойми знижуються до -0,5, що відповідає майже чистій воді. Біля берегів вони вищі, але все одно від'ємні (-0,2-0,3). З'являються окремі, поки що незначні за площею осередки чистої води (NDVI = -1). До останньої декади жовтня вони охоплюють вже всю водойму.

З року в рік динаміка евтрофікації повторюється. Звісно ж з певними відмінностями, що пов'язані з кліматичними особливостями конкретного року.

Отже, максимальні значення NDVI ($> 0,3$) характерні в липні-серпні, близькі до нуля – в листопаді-лютому, від'ємні (< 0) – в березні-квітні. Звідси можна зробити висновок, що інтенсивність евтрофікації корелює з температурою поверхні водойми (рис. 2-4). На рис. 2 наведена апроксимація емпіричних значень NDVI за 2021–2022 рр. поліномом 4-го порядку із коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,1675$. Невисоке значення R^2 свідчить про те, що:

- фактично лінія тренду лише відтворює загальну тенденцію;
- окрім температури води на інтенсивність евтрофікації впливають й інші чинники (вміст біогенних речовин, віддаль від берегу тощо);
- озеро не дуже значне за площею аби можна було виділяти окремі ареали суттєво відмінних і більш-менш сталих в часі значень NDVI;
- при невеликих розмірах озеро досить глибоке, а тому цей чинник також впливає на

швидкість і масштаби евтрофікаційних процесів.

Взаємозв'язок евтрофікації з температурою води підтверджує і рис. 4. На ньому зображені графіки річної динаміки індексу NDVI та температури поверхні води озера Велике за 2021–2022 рр. На перший погляд чітка кореляція відсутня. Для співставлення використано не абсолютні значення температури та NDVI, а їх зважені значення, отримані шляхом ділення на середнє арифметичне значення відповідних показників. Як видно з рис. 4, характерна середня часова кореляція між досліджуваними показниками. Розрахований коефіцієнт кореляції становить 0,33. Це не висока тіснота зв'язку. Але потрібно врахувати ряд чинників, які впливають на взаємозв'язок: інерційність показника NDVI, який змінюється значно повільніше від температури; в порівнянні не враховано час доби, в який здійснювалась супутникова зйомка, а від цього залежить температура; до порівняння включені не всі знімки, а лише ті, відповідали критерію «рівень хмарності $< 10\%$ ». В літературних джерелах описано, що аналогічний показник може досягати набагато

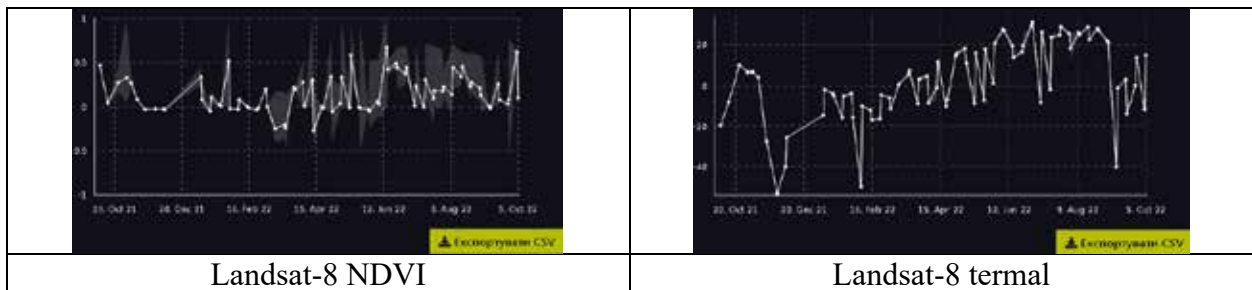


Рис. 3. Порівняння динаміки індексу NDVI та температури води озера Велике за даними місії Landsat-8 ресурсу sentinel-hub.com за 2021–2022 рр.

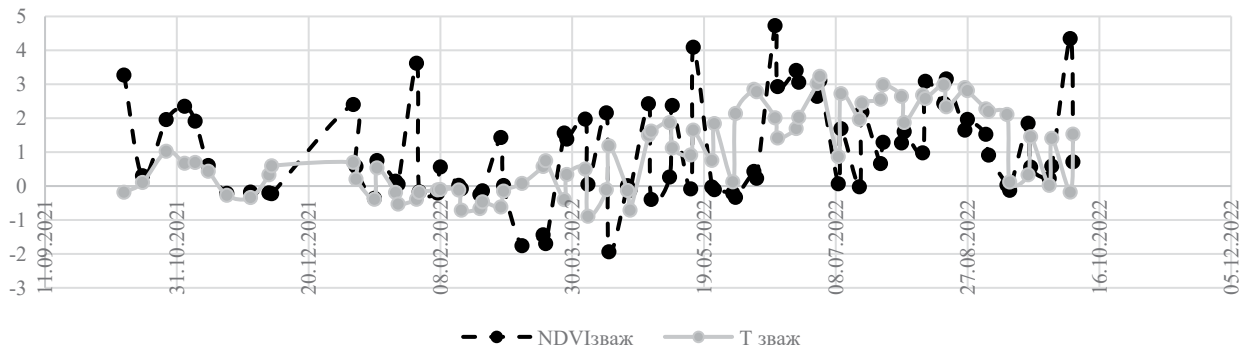


Рис. 4. Порівняння динаміки зважених значень NDVI і температури поверхні води оз. Великого за 2021–2022 рр. за даними місії Landsat-8

вищих значень. Наприклад, в статті (Фесюк, Полянський & Копитюк, 2022) розрахований аналогічний коефіцієнт для оз. Турське (Волинське Полісся) становить 0,88.

Висновки. Антропогенний вплив на лімно-систему озера зумовлює погіршення її гідроекологічного стану. Внаслідок нераціональної структури використання земель, зокрема, перевищення площ екологічно не стабільних ландшафтів над стабільними (КЕСЛ = 1,56) і порушення санітарно-екологічних норм під час забудови прибережних зон, поверхневий стік з водозбору не очищується належним чином, а потрапляє в озеро, забруднюючи його. Кон-

центрація забрудників, а особливо біогенних речовин, у воді озера зростає, що зумовлює евтрофікацію водойми. Рівень евтрофікації озера порівняно з багатьма іншими озерами Волинської області не високий. Але він зумовлює подальше зниження якості води і погіршення умов існування гідробіонтів. Тому для вирішення екологічних проблем в межах водозбору та поліпшення гідроекологічного стану озера необхідна реалізація комплексу оптимізаційних заходів, які передбачають обмеження надходження до озера біогенних речовин, поліпшення гідрологічного режиму озера та протидію потеплінню клімату.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ільїн Л.В. Лімнокомплекси Українського Полісся. У 2 т. Т. 2. Регіональні особливості та оптимізація: монографія. Луцьк: РВВ "Вежа" ВНУ ім. Лесі Українки, 2008. 340 с.
2. Ільїн Л.В., Мольчак Я.О. Озера Волині: лімно-географічна характеристика. Луцьк: Надстир'я, 2000. 140 с.
3. Лахай Ю.О. Екологічна оцінка природних умов басейну річки Турія. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2012. 2. С. 216-222.
4. Мартинюк В.О., Зубкович І.В., Андрійчук С.В. Регіональна геоекологічна оцінка озер Українського Полісся. *Регіональні геоекологічні проблеми в умовах сталого розвитку. Збірник наукових праць III Міжнар. наук.-практ. конференції* (Рівне, 18-20.10.2018). 2018. С. 78-86.
5. Поверхневі води Волині: колективна монографія / за ред. Я.О. Мольчака. Луцьк: Терен, 2019. 344 с.
6. 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.
7. 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 Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія*. 2022. № 1. С. 159-166
8. Шевчук М.Й., Юрчук П.В., Горун А.А. Екологічний стан озерних екосистем Волині та основні напрями його покращення. *Науковий вісник Волинського національного університету ім. Лесі Українки*. 2009. № 1. С. 188-191.
9. Шульгач А.С. Ландшафтне різноманіття перспективного національного природного парку, „Лісова пісня”. *Фізична географія та геоморфологія*. 2015. № 6. С. 165-168.
10. NDVI. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=16&lat=51.06328&lng=24.8132&themeId=DEF AULT-24T23%3A59%3A59.999Z>

REFERENCES:

1. Ilin, L.V. (2008). *Limnokompleksy Ukrainiskoho Polissya. U 2 t. T. 2. Rehionalni osoblyvosti ta optymizacija: monohrafija* [Limnocomplexes of Ukrainian Polissya. In 2 vols. Vol. 2. Regional features and optimization: monograph]. Lutsk: RVV "Veza" VNU im. Lesi Ukrainky [in Ukrainian].
2. Ilin, L.V., Molchak, Ya.O. (2000). *Ozera Volyni: limno-heohrafichna kharakterystyka* [Lakes of Volyn: limno-geographic characteristics]. Lutsk: Nadstyria [in Ukrainian].
3. Lakhay, Yu.O. (2012). *Ekolohichna otsinka pryrodnykh umov baseynu richky Turiya* [Environmental assessment of the natural conditions of the Turia River basin]. *Hidrolohiya, hidrokhiimiya i hidroekolohiya*. 2, 216-222. [in Ukrainian].
4. Martyniuk, V.O., Zubkovych, I.V., Andriyuchuk, S.V. (2018). *Rehionalna heoekolohichna otsinka ozer Ukrayinskoho Polissya* [Regional geoecological assessment of lakes in Ukrainian Polissya]. *Rehionalni heoekolohichni problemy v umovakh staloho rozvytku. Zbirnyk naukovykh prats' III Mizhnar. nauk.-prakt. konferentsiyi*. S. 78-86 [in Ukrainian].
5. Molchak, Ya.O. (Eds.) (2019). *Poverkhnevi vody Volyni: kolektyvna monohrafiya* [Surface waters of Volyn: a collective monograph]. Lutsk: Teren. [in Ukrainian].
6. Fedorovsky, O.D., Khyzhnyak, A.V, Tomchenko, O.V. (2021). *Otsinka yakosti vodnoho seredovishcha mis'kykh vodoym z vykorystannyam metodiv systemnoho analizu na osnovi kompleksuvannya danykh DZZ* [Assessment of the water quality of urban water bodies using system analysis methods based on remote sensing data integration]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiya*. 27, 5, 11-18. [in Ukrainian].

7. Fesyuk, V.O., Polyansky, S.V., Kopytyuk, T.V. (2022). *Metodyka ta praktychna implementatsiya zastosuvannya danykh DZZ dlya monitorynhu evtrofikatsiyi vodoym (na prykladi Turskoho ozera)* [Methodology and practical implementation of the use of remote sensing data for monitoring eutrophication of water bodies (on the example of Lake Turske)]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatyuka. Seriya: heohrafiya*, 1. 159-166 [in Ukrainian].

8. Shevchuk, M.Y., Yurchuk, P.V., Horun, A.A. (2009). *Ekolohichnyy stan ozernykh ekosystem Volyni ta osnovni napryamy yoho pokrashchennya* [Ecological state of Volyn lake ecosystems and main directions of its improvement]. *Naukovyy visnyk Volynskoho natsionalnoho universytetu im. Lesi Ukrayinky*, 1, 188-191. [in Ukrainian].

9. Shulhach, A.S. (2015). *Landschaftne riznomanittya perspektyvnoho natsionalnoho pryrodnoho parku „Lisova pisnya”* [Landscape diversity of the promising national nature park "Lisova Pisnya"]. *Fizychna heohrafiya ta heomorfolohiya*. 6, 165-168. [in Ukrainian].

10. NDVI. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=16&lat=51.06328&lng=24.8132&themeId=DEFAULT-24T23%3A59%3A59.999Z>