

ГІС-оцінка екологічного стану природних вод на основі просторового розподілу мікроелементів методом TIN з автоматизованим аналізом у Python

<https://doi.org/10.17721/2786-4561.2026.7.1-2/14>

Клипа А.В.

<https://orcid.org/0009-0006-5565-5305>

Надійшла до редакційної колегії 20.12.2025

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, klypa.andrii@gmail.com

Прийнята: 10.03.2026

Анотація. У статті представлено підхід до ГІС-оцінки екологічного стану природних вод на основі аналізу просторового розподілу мікроелементів із використанням методу триангуляційної нерегулярної сітки (TIN) та автоматизованих інструментів Python. На основі даних гідролітохімічних зйомок Полтавської області виконано просторове моделювання концентрацій барію у два часові періоди (1985–1988 та 1991–1993 рр.), що дало змогу виявити динаміку змін екологічного стану водних об'єктів. Реалізована методика включає підготовку та геокодування даних, побудову TIN-моделей, класифікацію за критичними нормативами, векторизацію бінарних шарів та автоматизований розрахунок площ перевищення гранично допустимих концентрацій за допомогою Python-скриптів у QGIS. Результати дослідження засвідчили суттєве збільшення площ зон із перевищенням вмісту барію: з 4,24% у 1985–1988 рр. до 37,55% у 1991–1993 рр. Запропонований підхід продемонстрував ефективність TIN-інтерполяції для екологічної оцінки та може бути адаптований для моніторингу якості поверхневих вод у різних регіонах, включаючи аналіз антропогенного впливу та наслідків воєнних дій.

Ключові слова: ГІС, природні води, мікроелементи, TIN, Python, просторовий аналіз, екологічна оцінка.

GIS-Based Environmental Assessment of Natural Waters Using TIN Interpolation and Automated Python Analysis of the Spatial Distribution of Trace Elements

Klypa A.V.

<https://orcid.org/0009-0006-5565-5305>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine
klypa.andrii@gmail.com

Abstract. This study presents a GIS-based methodology for assessing the environmental state of natural waters using the spatial distribution of trace elements derived through Triangulated Irregular Network (TIN) interpolation and automated Python analysis. Hydrolithochemical survey data from Poltava Region were used to model spatial concentrations of barium for two periods (1985–1988 and 1991–1993), enabling a comparative assessment of temporal changes in water quality. The methodological framework includes data preprocessing and geocoding, construction of TIN models, classification of interpolated values according to regulatory thresholds, raster binarization, vectorisation of exceedance zones, and automated calculation of their areas using Python scripts in the QGIS environment.

The results demonstrate a significant deterioration of the ecological state of natural waters within the study area. The proportion of territories with concentrations above the critical threshold increased from 4.24% in 1985–1988 to 37.55% in 1991–1993. TIN interpolation proved effective for modelling spatial heterogeneity under irregular sampling conditions, while the automated Python-based workflow ensured reproducibility, reduced human error, and enabled efficient processing of large datasets.

The proposed approach is versatile and can be applied to ecological monitoring systems in other regions, provided that adequate analytical data are available. Its structure allows adaptation to different chemical components and environmental conditions, making it suitable for long-term monitoring, detection of high-risk

zones, and evaluation of anthropogenic impacts, including those linked to industrial activities or military actions. The methodology contributes to improving the spatial reliability of environmental assessments and supports informed decision-making in water resource management.

Keywords. GIS, TIN interpolation, Python automation, natural waters, trace elements, spatial analysis, environmental assessment.

Вступ. Екологічний стан природних вод є одним із ключових чинників стійкого функціонування екосистем та безпеки населення. Накопичення у водному середовищі мікроелементів техногенного походження призводить до деградації водних об'єктів, погіршення якості ресурсів та зростання екологічних ризиків, пов'язаних із біоаккумуляцією токсичних речовин у живих організмах (Briffa et al., 2020; Chojnacka, 2010; Linnik, 2000; Tchounwou et al., 2012; Tsyhanenko-Dziubenko et al., 2025). Своєчасна оцінка рівня забруднення є критично важливою для прийняття управлінських рішень, однак традиційні методи моніторингу, що ґрунтуються переважно на локальних польових вимірюваннях, мають обмежені можливості щодо просторової інтерпретації та не забезпечують повного охоплення території (Gao, 2009; Khilchevskyi, 2021; Li et al., 2016; Lototska & Bitsiura, 2021; Varol & Şen, 2012).

Геоінформаційні системи (ГІС) відкривають можливість інтеграції, аналізу та візуалізації просторових даних про якість природних вод, забезпечуючи поглиблене вивчення закономірностей поширення забруднень (Parra, 2022; Khilchevskyi, 2021; Lototska & Bitsiura, 2021). Сучасні дослідження демонструють ефективність різних інтерполяційних підходів - кригінгу, зваженого зворотного дистанціювання (IDW), машинного навчання та триангуляційної нерегулярної сітки (TIN) - для моделювання просторового розподілу хімічних компонентів у водних екосистемах, (Belkhir et al., 2020; Sokolchuk & Sokáč, 2022, Thakur & Singh, 2019). Проте вибір оптимального методу залишається складним завданням, оскільки результати суттєво залежать від густоти спостережень, статистичних властивостей даних та морфології території (Ababakr et al., 2024; Li et al., 2016). Особливої уваги потребують методики, здатні поєднувати просторову деталізацію, відтворюваність результатів і можливість автоматизації аналітичних процедур.

У таких умовах актуальним є розроблення ГІС-орієнтованих підходів до оцінювання екологічного стану природних вод на основі просторового аналізу мікроелементів із використанням гнучких інтерполяційних методів та інструментів автоматизації. Інтерполяція методом TIN є одним із перспективних рішень у випадках нерівномірного просторового розташування даних, оскільки дозволяє зберігати локальні просторові особливості та формувати деталізовані моделі розподілу (Ababakr et al., 2024, Sokolchuk & Sokáč, 2022; Li & Neap, 2011). Додаткове застосування Python-скриптів забезпечує автоматизацію розрахунків, відтворюваність процедур і підвищення точності оцінки екологічного навантаження.

Об'єкт дослідження - природні води регіону в аспекті просторового розподілу мікроелементів.

Предмет дослідження - методи ГІС-оцінки екологічного стану водних об'єктів на основі інтерполяції TIN та автоматизованого просторового аналізу.

Мета статті - розробити та апробувати методику ГІС-оцінки екологічного стану природних вод на основі просторового розподілу мікроелементів, сформованого методом TIN, із подальшою автоматизацією аналітичних операцій у Python.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. Систематизувати дані гідролітохімічних зйомок та підготувати їх до просторового аналізу.
2. Побудувати TIN-моделі розподілу концентрацій мікроелементів для різних періодів спостережень.

3. Виконати класифікацію значень за критичними нормативами та визначити зони перевищення.

4. Реалізувати автоматизований розрахунок площ забруднених територій у середовищі QGIS за допомогою Python-скриптів.

5. Оцінити динаміку екологічного стану природних вод на основі отриманих картографічних моделей.

Матеріали та методи. У дослідженні використано дані гідролітохімічних зйомок Полтавської області, виконаних у два етапи: 1985–1988 та 1991–1993 рр. (таблиця 1). Бази даних містять інформацію про концентрації мікроелементів у поверхневих водах, отриманих методом напівкількісного спектрального аналізу. Загальний обсяг вибірки становить 264 проби для першого періоду та 560 проб для другого, що забезпечує можливість просторового порівняння та аналізу динаміки хімічного складу водних об'єктів.

Таблиця 1. Обсяги вимірювань в ході проведених гідролітохімічних зйомок по Полтавській області

№ п/п	Роки	Кількість відібраних проб	Вид аналізу	Хімічні компоненти	Одиниці виміру
1	1985–1988	264	Напівкількісний спектральний аналіз	Ba, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni,	мг/дм ³
2	1991–1993	560		Pb, Sr, Ti, V, Zn	мг/дм ³

Попередня підготовка даних включала геокодування точок відбору проб, уніфікацію значень концентрацій до єдиних одиниць вимірювання (мг/дм³), перевірку на пропуски та описову статистику. Аналіз показав, що розподіл концентрацій барію, вибраного як індикатор техногенного навантаження, має близький до логнормального характер, що узгоджується з типовими закономірностями геохімічних даних у природних середовищах.

Для моделювання просторової структури мікроелементів застосовано інтерполяцію методом TIN (Triangulated Irregular Network). TIN було обрано з огляду на його здатність точно відображати локальні особливості при нерівномірному розташуванні точок та мінімізувати спотворення просторових меж. Інші методи – IDW та кригінг – не були використані через тенденцію до надмірного згладжування або необхідність забезпечення нормальності розподілу та побудови варіограм, що не відповідало задачам дослідження.

Побудова TIN-моделей здійснювалася окремо для кожного періоду спостережень у середовищі QGIS. Подальше картографування включало:

- обрізку TIN-моделей за адміністративною межею Полтавської області;
- класифікацію значень за критичними нормативами відповідно до гігієнічних вимог ДСанПіН 2.2.4-171-10 (ДСанПіН 2.2.4-171-10, 2010);
- створення бінарних растрових шарів (1 – перевищення, 0 – норма);
- векторизацію бінарних шарів для формування полігонів зон перевищення.

Площі зон перевищення обчислювалися автоматизовано за допомогою Python-скриптів у QGIS. Для кожного полігона зі значенням «1» визначалась площа S_i у проєкції WGS84, після чого площа всіх перевищень S_{exceed} визначалась як:

$$S_{exceed} = \sum_{i=1}^n S_i$$

де S_i – площа i -го полігона, n – кількість полігонів, що відповідають перевищенню.

Відносна частка територій, на яких вміст елементу перевищував критичну границю P_{exceed} , в межах області S_{total} обчислювалася за формулою:

$$P_{exceed} = \frac{S_{exceed}}{S_{total}}$$

Створені сценарії Python забезпечили відтворюваність та прискорення розрахунків, що дозволило виконати зіставлення двох періодів на єдиній методичній основі.

Результати та їх аналіз. На першому етапі виконано просторову візуалізацію та аналіз густоти точок відбору проб гідролітохімічних зйомок (рис. 1). Порівняння двох періодів показало значне збільшення кількості спостережень у 1991–1993 рр., що позитивно вплинуло на детальність просторової моделі та точність подальших обчислень.

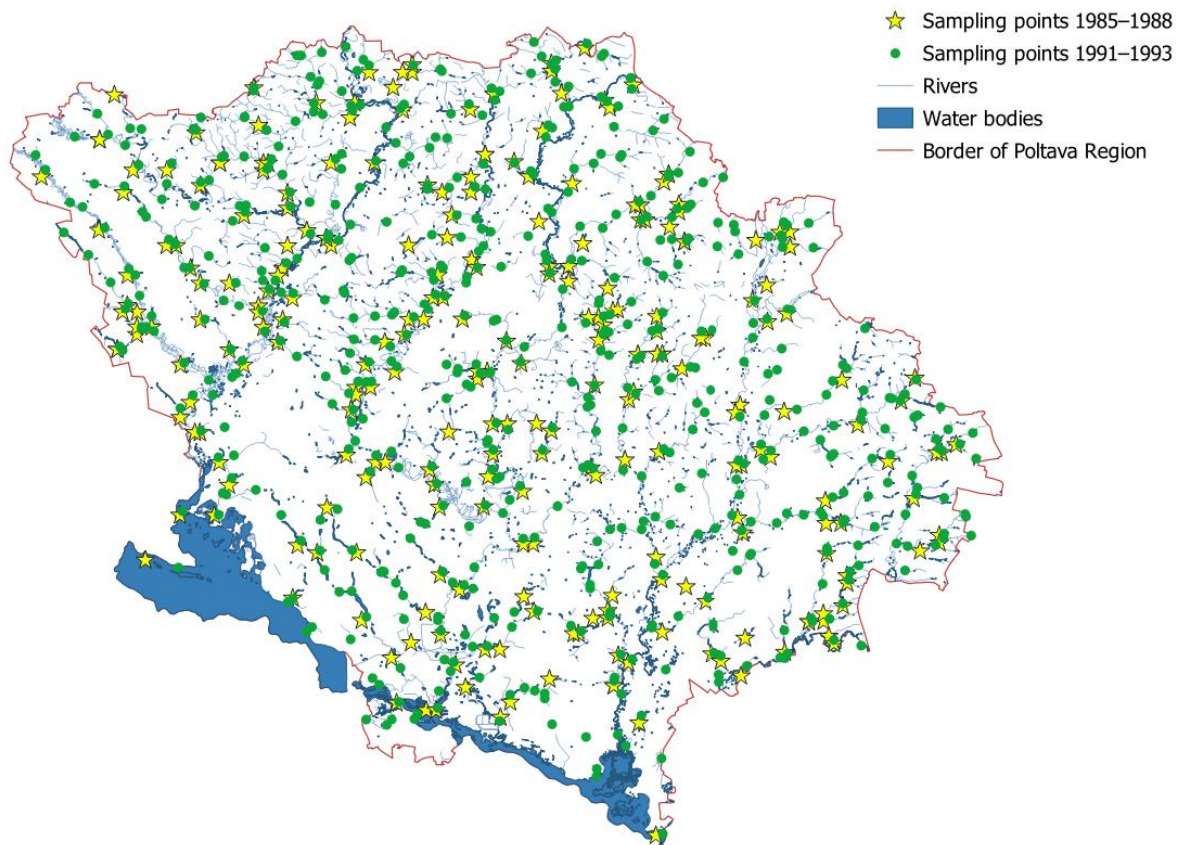


Рис.1. Відображення точок відбору проб гідролітохімічних зйомок на карті Полтавської області

TIN-інтерполяція дозволила сформувати неперервні поверхні концентрацій барію для кожного періоду (рис. 2). У першому часовому зрізі (1985–1988 рр.) підвищені концентрації мали локальний характер і були зосереджені переважно в центральній частині області. У другому періоді (1991–1993 рр.) спостерігається формування розширених зон із перевищенням критичної межі 0,02 мг/л, що займають більшу частину території та демонструють значне погіршення екологічного стану водних об'єктів.

На основі побудованих карт концентрацій створено бінарні растрові шари та виконано площинний аналіз. За результатами векторизації та автоматизованого обчислення площ визначено, що:

- у 1985–1988 рр. площа зон перевищення концентрації барію становила 2408,62 км², що відповідає 4,24% території області;
- у 1991–1993 рр. площа перевищень зросла до 21 354,60 км², або 37,55% території.

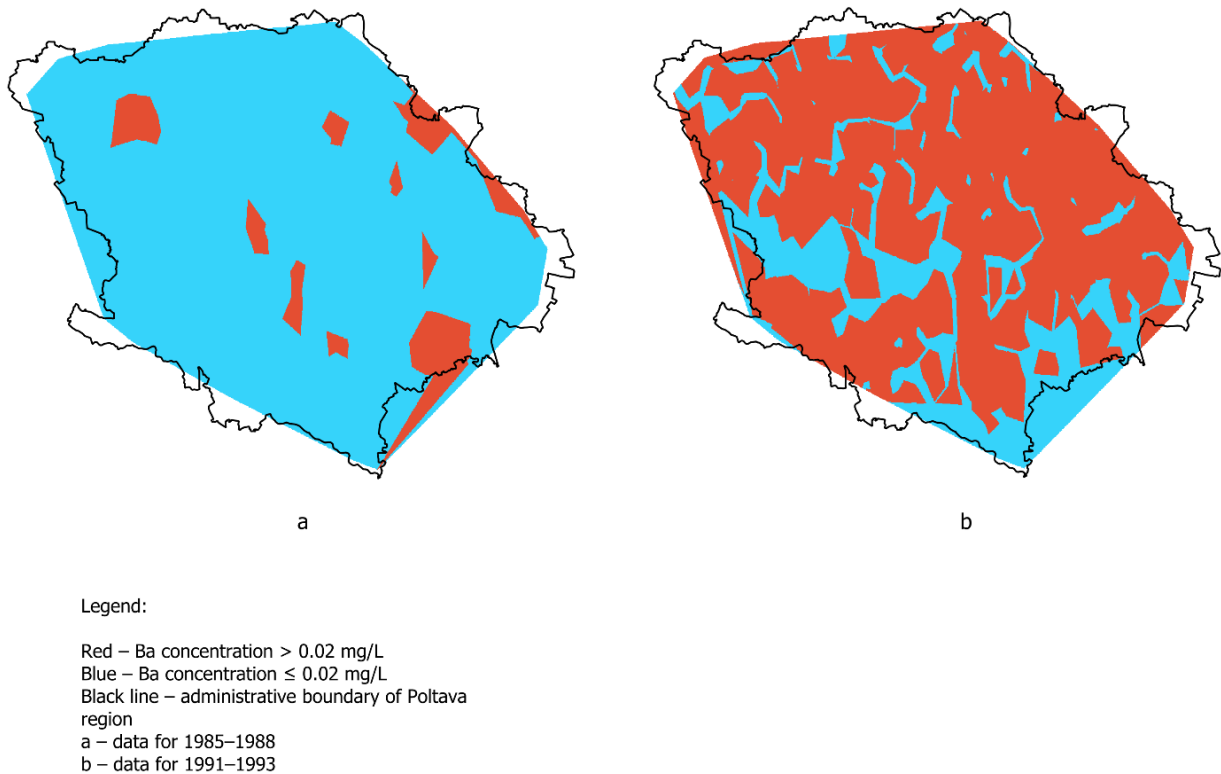


Рис. 2. Просторовий розподіл концентрації барію (Ba) у поверхневих водах Полтавської області.

Динаміка просторового розширення зон перевищення представлена на рис. 3. Зростання площ майже в дев'ять разів свідчить про суттєве погіршення екологічного стану поверхневих вод та можливе підсилення техногенного навантаження у зазначений період.

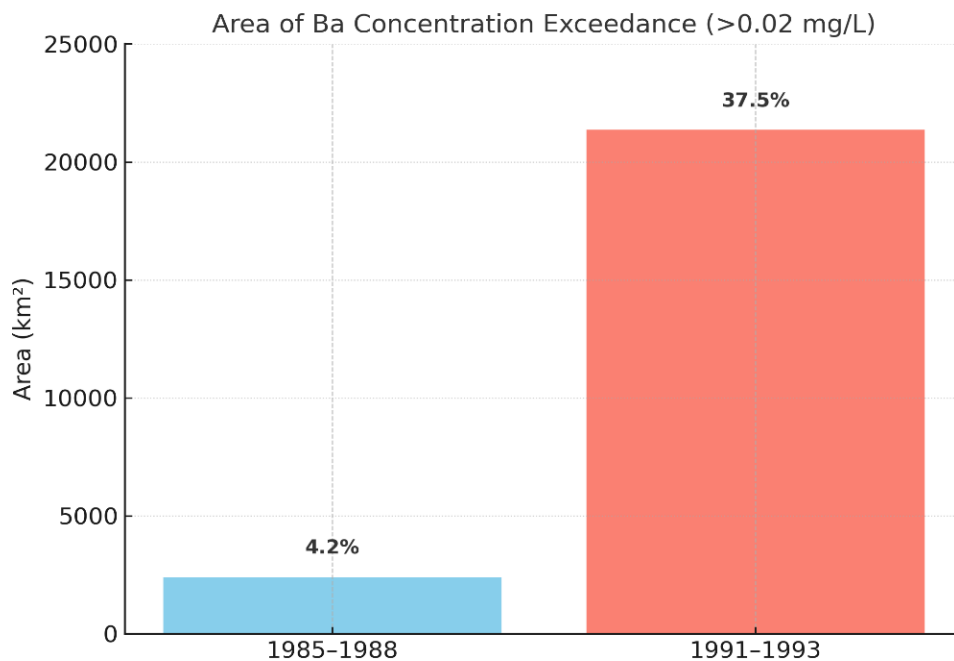


Рис. 3. Динаміка зміни площ перевищення концентрації барію (Ba > 0,02 мг/л) у поверхневих водах Полтавської області у 1985–1988 та 1991–1993 роках.

Отримані результати засвідчують, що інтерполяція методом TIN є ефективним інструментом для відтворення просторової структури мікроелементів у природних водах, особливо за умов нерівномірного розміщення точкових спостережень. Застосування Python для автоматизованого обчислення площ перевищення забезпечило високу відтворюваність методики, зменшило вплив людського фактору та дозволило масштабувати алгоритм на великі території й інші набори вхідних даних. Таким чином, методика може бути використана як універсальна технологічна основа для оперативної та комплексної оцінки екологічного стану водних об'єктів.

Запропонований підхід забезпечив двосторонню оцінку забруднення:

- географічну – через картографічне моделювання та просторову інтерпретацію зон із перевищенням допустимих концентрацій;
- кількісну – завдяки автоматизованому розрахунку площ забруднених ділянок та визначенню їх частки у межах досліджуваної території.

Хоча дані гідролітохімічних зйомок належать до минулих років, вони залишаються цінним інформаційним ресурсом для апробації та вдосконалення ГІС-методів екологічного моніторингу. Їхня достатня просторово-часова деталізація дала можливість не лише відтворити закономірності розподілу мікроелементів у поверхневих водах, а й об'єктивно оцінити ефективність використаних алгоритмів інтерполяції та просторового аналізу.

Розроблена методика може бути успішно застосована для оцінювання якості водних ресурсів у сучасних умовах, оскільки дає змогу своєчасно виявляти ділянки з підвищеним екологічним ризиком та окреслювати тенденції їх просторового поширення. Крім того, вона має практичну цінність для проєктування систем довгострокового моніторингу, орієнтованих на прогнозування змін якості вод під впливом природних і антропогенних процесів, включно з техногенним навантаженням і військовими діями.

Використання ретроспективних даних дозволило наочно продемонструвати потенціал ГІС-орієнтованої методики та підтвердило її ефективність у контексті просторово-часового аналізу стану водного середовища. Незважаючи на те, що у цьому дослідженні основну увагу зосереджено на концентраціях барію, структура методичного підходу є універсальною та може бути адаптована до аналізу інших хімічних компонентів за наявності відповідних вимірювань.

Узагальнюючи, результати дослідження підтверджують, що інтеграція ГІС-технологій, інтерполяції TIN і автоматизованого просторового аналізу є ефективним інструментом екологічної оцінки, який забезпечує високу інформативність, системність і можливість прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері моніторингу водних ресурсів.

Висновки. Запропонована ГІС-методика оцінювання екологічного стану природних вод, що поєднує інтерполяцію методом TIN та автоматизований просторовий аналіз у Python, продемонструвала високу ефективність для відтворення просторової структури мікроелементів у водних об'єктах. Застосування TIN-моделювання забезпечило точне картографічне відображення концентрацій навіть за умов нерівномірного розташування точкових спостережень, дозволяючи зберегти локальні аномалії та відтворити різкі градієнти екологічних показників.

Апробація методики на прикладі барію показала суттєве погіршення екологічного стану поверхневих вод регіону протягом періоду між двома циклами гідролітохімічних зйомок: частка територій із перевищенням критичних нормативів зросла з 4,24% до 37,55%. Це вказує на інтенсивне поширення зон потенційного екологічного ризику та підкреслює важливість інтеграції просторових методів у систему екологічного моніторингу.

Автоматизація обчислень у Python забезпечила високу відтворюваність, масштабованість і точність площинних розрахунків. Такий підхід дозволив сформулювати комплексну оцінку забруднення, що поєднує географічний аналіз картографічних моделей та кількісне визначення площ перевищення гранично допустимих концентрацій. Методика може

бути легко адаптована до різних регіонів і наборів даних, оскільки потребує зміни лише вхідних значень і параметрів класифікації.

Незважаючи на ретроспективний характер вихідних даних, їхня деталізація та просторова повнота дали змогу повноцінно протестувати запропонований підхід. Він може бути безпосередньо застосований у сучасних моніторингових системах за наявності актуальних спостережень. ГІС-модель створює основу для прогностичного аналізу, що може бути реалізований із врахуванням гідрологічних, кліматичних та антропогенних чинників, а також сценаріїв розвитку техногенного навантаження чи впливу воєнних дій.

Отримані результати мають практичну важливість для органів управління водними ресурсами, екологічних служб, аграрного сектору та промисловості. Методика дає змогу виявляти ділянки з підвищеним екологічним ризиком, оптимізувати програму спостережень і формувати обґрунтовані заходи зі зниження впливу забруднювачів на довкілля.

Універсальність структури методичного підходу дозволяє адаптувати його до інших компонентів навколишнього середовища – ґрунтів, підземних вод чи атмосферного повітря – що робить його перспективним інструментом для вирішення широкого спектра задач просторово-часового екологічного аналізу.

Заява про конфлікт інтересів. Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

Список використаних джерел.

- Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Shomko, O., Gandziura, V., & Khamdosh, I. (2025). Analytical assessment of heavy metals polyelement distribution in urbanized hydroecosystem components: Spatial differentiation and migration patterns. *Environmental Problems*, 10(2), 135–144. <https://doi.org/10.23939/ep2025.02.135>
- Linnik, P. (2000). Heavy metals in surface waters of Ukraine: Their content and forms of migration. *Hydrobiological Journal*, 36(3), 24–35. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v36.i3.20>
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution and its environmental and health effects. *Heliyon*, 6(9), e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Chojnacka, K. (2010). Biosorption and bioaccumulation: The prospects for practical applications. *Environment International*, 36(3), 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.12.001>
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. In *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology* (pp. 133–164). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Khilchevskiy, V. (2021). Water monitoring in Ukraine: Methods for assessing water quality for various purposes in connection with changes in the regulatory framework (2014–2021). *Environmental Safety and Natural Resources*, 36(1), 52–61. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.3.1>
- Lototska, O. V., & Bitsiura, L. O. (2021). Monitoring of surface water resources in Ukraine and its legislative basis. *Bulletin of Social Hygiene and Health Protection Organization of Ukraine*, 2(88), 45–52. <https://ojs.tdmu.edu.ua/index.php/visnyk-gigieny/article/download/12386/11662>
- Gao, B. C. (2009). Satellite-based remote sensing of atmospheric and surface parameters. *Applied Optics*, 48(15), 3071–3083. <https://doi.org/10.1364/AO.48.003071>
- Li, S., Guo, Y., Li, M., & Shan, J. (2016). Spatio-temporal analysis of water quality using geospatial techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5181-3>
- Varol, M., & Şen, B. (2012). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Tigris River. *Environmental Monitoring and Assessment*, 181, 439–450. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1834-5>
- Parra, L. (2022). Remote sensing and GIS in environmental monitoring. *Applied Sciences*, 12(16), 8045. <https://doi.org/10.3390/app12168045>
- Belkhiri, L., Tiri, A., & Mouni, L. (2020). Spatial distribution of groundwater quality using kriging. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100421. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100421>
- Thakur, J., & Singh, S. K. (2019). A comparative study of spatial interpolation technique (IDW and Kriging) for determining the groundwater quality. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(03), 388–397. https://www.researchgate.net/publication/332652670_A_Comparative_Study_of_Spatial_Interpolation_Technique_IDW_and_Kriging_for_Determining_the_Ground_Water_Quality
- Sokolchuk, K., & Sokáč, M. (2022). Comparison of spatial interpolation methods of hydrological data on example of the Pripjat river basin (within Ukraine). *Acta Hydrologica Slovaca*, 23(2), 226–233. <https://doi.org/10.31577/ahs-2022-0023.02.0025>

<https://doi.org/10.17721/2786-4561.2026.7.1><http://constructgeo.knu.ua>

Ababakr, S. A., Hassan, M. M., & Jalal, M. J. (2024). Interpolation approaches to groundwater quality mapping: Trends and techniques in Erbil City. *Advances in Civil and Environmental Engineering*, 4(1), 19–29.

https://www.acesjr.com/article_205384_43958a40f8221102234c7c117b6414d4.pdf

Li, S., Guo, Y., Li, M., & Shan, J. (2016). Spatio-temporal analysis of water quality using geospatial techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5181-3>

Li, J., & Heap, A. D. (2011). A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics*, 6(3–4), 228–241. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.12.003>

Derzhavni sanitarni normy ta pravyla “Hihiiienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoi dlia spozhyvannia liudynoiu” (DSanPiN 2.2.4-171-10). (2010). Ministerstvo okhorony zdorovia Ukrainy. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>