

DOI: 10.32347/2786-7269.2025.13.525-542

УДК: 528.8:504.05:519.2

к.геол.н. **Клипа А.В.**,  
klypa.andrii@gmail.com, ORCID: 0009-0006-5565-5305,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
к.геол. наук **Стахів І.Р.**,  
stakhivira@gmail.com, ORCID ID: 0009-0007-3090-6988,  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ГІС-ОЦІНКИ ВПЛИВУ АНТРОПОГЕННИХ ФАКТОРІВ НА ПРИРОДНІ КОМПОНЕНТИ ДОВКІЛЛЯ: ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ

*Розглянуто методологічні основи ГІС-оцінки впливу антропогенних факторів на природні компоненти довкілля. Запропоновано комплексний підхід, що поєднує геоінформаційні системи, статистичні методи, машинне навчання та математичне моделювання. Проаналізовано проблеми збору, обробки та аналізу екологічних даних, запропоновано шляхи їх вирішення. Особливу увагу приділено методам просторового аналізу забруднень, валідації моделей та оцінці екологічних ризиків. Представлено підходи до використання екологічних індексів та багатофакторного аналізу для оцінки стану природних компонентів довкілля.*

*Ключові слова: ГІС-аналіз; екологічний моніторинг; антропогенне навантаження; статистичне моделювання; машинне навчання; просторовий аналіз; екологічні ризики; індекси забруднення; геоінформаційні технології*

**Постановка проблеми.** Сучасні наукові та технологічні досягнення дозволяють детально досліджувати вплив антропогенних факторів, зокрема воєнних дій, на природне середовище, включно з ґрунтами, водними ресурсами та атмосферним повітрям. Проте ефективна оцінка масштабів забруднення та його наслідків вимагає застосування комплексного підходу, що поєднує методи екологічного моніторингу, статистичного аналізу, геоінформаційних систем (ГІС) та сучасних аналітичних інструментів.

Антропогенне навантаження спричиняє значні екологічні зміни, що проявляються у вигляді забруднення водних ресурсів токсичними металами, деградації ґрунтового покриву та змін у складі атмосферного повітря. Відсутність системного підходу до екологічного моніторингу та єдиної методології, яка б дозволяла інтегровано оцінювати ці впливи, створює труднощі у визначенні довгострокових наслідків та розробці стратегій реабілітації забруднених територій. Крім того, недостатність репрезентативних

даних, нерівномірне покриття територій вимірюваннями та варіативність методик оцінювання ускладнюють отримання науково достовірних результатів [1–3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останніми роками значна кількість наукових праць присвячена дослідженням екологічних наслідків антропогенного впливу на довкілля. Особливу увагу дослідники приділяють аналізу змін у складі водних ресурсів, деградації ґрунтів та забрудненню атмосферного повітря, зокрема у зв'язку з інтенсифікацією промислового виробництва, техногенними аваріями та воєнними діями.

Наукові дослідження підтверджують, що екологічний стан територій, які зазнали збройних конфліктів, суттєво змінюється. Це спостерігається у випадках Сирії, Іраку, Афганістану, Боснії та Герцеговини, Кувейту, країн Балканського регіону [4, 5]. У досліджених регіонах зафіксовано комплексні зміни природного середовища, зокрема зростання концентрацій токсичних сполук у поверхневих водах і ґрунтах, порушення фізико-хімічної структури ґрунтового покриву внаслідок механічного та хімічного впливу, а також суттєве погіршення якості атмосферного повітря через підвищення вмісту пилу, аерозолів і продуктів згоряння.

В контексті сучасної ситуації в Україні особливої актуальності набуває досвід попередніх досліджень, адже країна стикається з безпрецедентними викликами внаслідок воєнної агресії з боку Російської Федерації. У роботах [6–9] проаналізовано вплив військових дій на різні компоненти довкілля, виявлено регіональні відмінності в екологічних наслідках, а також запропоновано перші підходи до оцінки таких змін. Деякі публікації [1–3] також підкреслюють необхідність інтегрованого моніторингу, використання геоінформаційних технологій та стандартизації методів збору даних для підвищення точності оцінок.

З методологічної точки зору, провідні сучасні дослідження спираються на інтеграцію геоінформаційних технологій з їх потужними аналітичними можливостями, методів ймовірно-статистичного моделювання [16, 17], а також алгоритмів машинного навчання [10, 11] і відновлення пропущених даних [13]. Така інтеграція дозволяє виявляти просторові закономірності поширення забруднень, прогнозувати ризики екологічної деградації та формувати картографічні моделі оцінки антропогенного навантаження. Поєднання цих підходів забезпечує високу гнучкість досліджень і підвищує їхню репрезентативність навіть у випадках обмеженості даних або відсутності регулярного моніторингу.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є розробка основи для комплексної методології оцінки впливу антропогенних факторів, включаючи

воєнні дії, на довкілля. Основна увага приділяється визначенню ключових етапів дослідження, аналізу супутніх проблем та оцінці ефективності сучасних методів, таких як геоінформаційні системи (ГІС), машинне навчання, математичне моделювання та інші аналітичні інструменти.

Результати дослідження спрямовані на вдосконалення методологічного інструментарію для оцінки екологічного стану, і можуть бути використані екологами, фахівцями з геоінформаційних технологій та аналітиками під час розробки стратегій моніторингу й відновлення постраждалих територій.

**Виклад основного матеріалу.** Для досягнення поставленої мети було сформовано поетапну структуру дослідження, яка охоплює ключові стадії екологічної оцінки впливу антропогенних факторів на природне середовище. Кожен із етапів відображає окремі методологічні завдання, пов'язані зі збором і обробкою даних, вибором відповідних моделей, просторовим аналізом, валідацією результатів і формуванням комплексної екологічної оцінки.

Розглянуті підходи спираються на використання геоінформаційних технологій, статистичних методів і алгоритмів машинного навчання для інтеграції та інтерпретації екологічних даних. У межах цього розділу представлено логічну послідовність дій, що дозволяє реалізувати узагальнену методологію оцінки та прогнозування екологічних змін у регіонах, які зазнали антропогенного, зокрема воєнного, впливу.

### **1. Постановка задачі та формування дослідницької концепції.**

Ефективна оцінка екологічного впливу на довкілля починається з чіткої постановки задачі та визначення ключових параметрів аналізу. На цьому етапі важливо встановити, які природні компоненти потребують оцінки (вода, ґрунти, повітря), які процеси необхідно дослідити та які джерела даних можуть бути використані. Постановка задачі передбачає не лише вибір параметрів, що характеризують стан довкілля, але й встановлення просторових і часових меж дослідження, визначення методологічного підходу та джерел інформації.

На рис. 1 представлено структурну схему постановки задачі дослідження. Вона включає основні етапи, які виконує дослідник: визначення об'єкта та регіону дослідження, встановлення просторово-часових меж, попередній аналіз літератури, формулювання гіпотези та вибір параметрів, а також визначення джерел даних.

Одним із ключових аспектів цього процесу є вибір релевантних параметрів, що відображають основні екологічні зміни. Антропогенне навантаження, особливо воєнні дії, спричиняє комплексні зміни у природних системах, і не завжди очевидно, які індикатори слід використовувати для найточнішої оцінки наслідків. Наприклад, забруднення вод може визначатися за вмістом важких металів, зміною хімічного складу або біологічними

показниками. Аналогічно, стан ґрунтів оцінюється через концентрацію забруднювачів, ерозійні процеси або зміну структури ґрунтового покриву.

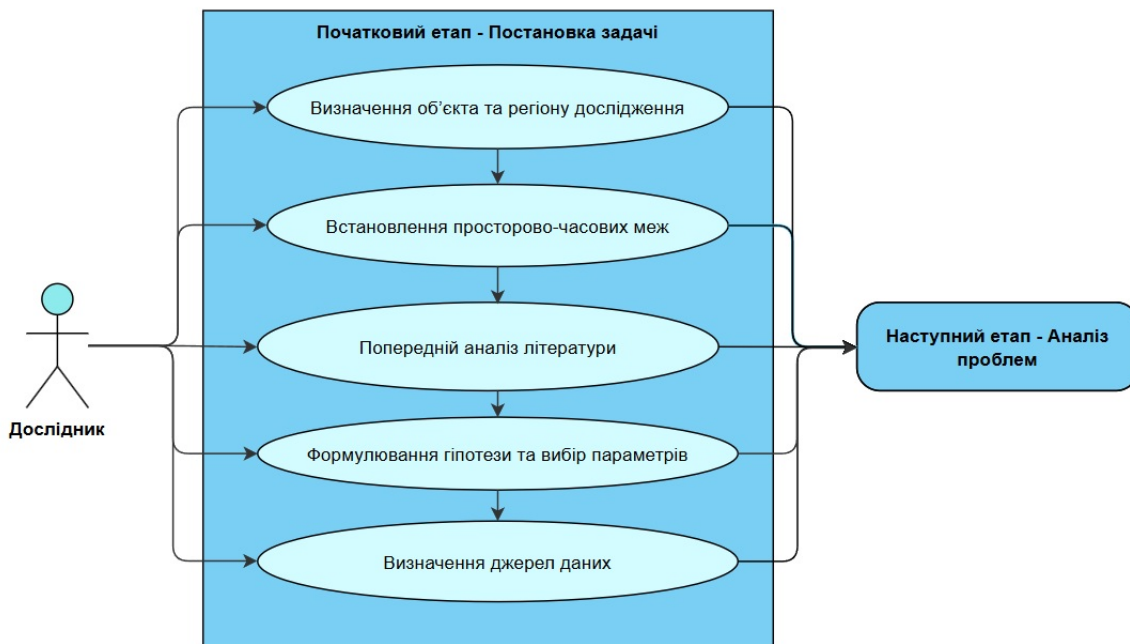


Рис. 1. Початковий етап дослідження: постановка задачі та визначення ключових параметрів.

Вибір методів аналізу визначається доступністю даних, характером забруднення та особливостями досліджуваної території. Наприклад, на урбанізованих територіях доцільно застосовувати ГІС-аналіз і супутникові дані, тоді як у лісистих районах важливими є біоіндикатори та оцінка змін рослинного покриву.

Для формування дослідницької концепції застосовуються сучасні інструменти та методи аналізу. Геоінформаційні системи (ГІС) дозволяють інтегрувати дані з різних джерел, здійснювати просторовий аналіз забруднень та будувати прогностичні моделі. Математичне моделювання та статистичний аналіз допомагають виявляти закономірності змін екологічних параметрів, а машинне навчання забезпечує можливість прогнозування подальших змін.

Окрім аналізу емпіричних даних, важливим є дослідження наукових трендів. Для цього використовується бібліометричний аналіз, що дозволяє ідентифікувати найбільш цитовані роботи, сучасні методологічні підходи та пріоритетні напрямки досліджень. Це дає змогу адаптувати дослідницьку методологію до сучасних наукових тенденцій та вибрати оптимальні методи аналізу.

**2. Збір даних: проблеми і методи їх вирішення.** Дослідження екологічних наслідків ґрунтується на аналізі даних про забруднення довкілля, проте їх якість і доступність значною мірою залежать від умов та методів

проведення моніторингу. Сама по собі відсутність постійних моніторингових мереж, що є актуальною проблемою не лише для України, уже створює певні проблеми на даному етапі. А у випадку бойових дій, процес збору інформації ускладнюється ще низкою чинників, що безпосередньо впливають на репрезентативність, достовірність та точність отриманих результатів. Відсутність єдиної моніторингової системи та уніфікованої методології збору даних, варіативність підходів до вимірювань, розрізненість та нерівномірність просторово-часового розподілу вихідної інформації, а також наявність похибок і неоднорідності у вхідних даних з різних джерел вимагають їх подальшої обробки, систематизації та уніфікації для забезпечення коректної інтеграції та проведення комплексного аналізу.

Однією з ключових проблем є фрагментованість даних та їх нерівномірний просторово-часовий розподіл. Польові вимірювання, як правило, мають точковий характер, що не дозволяє сформувати повноцінну картину поширення забруднювачів та оцінити динаміку екологічних змін. А обмежений доступ до територій, наприклад у зонах бойових дій, взагалі унеможливує проведення польових досліджень на значних ділянках, що призводить до дефіциту інформації або її нерепрезентативності, особливо в регіонах із високим рівнем забруднення.

Важливою перешкодою для комплексного аналізу є також неоднорідність даних, що надходять із різних джерел, зокрема польових спостережень, дистанційного зондування та автоматизованих станцій моніторингу. Відмінності у форматах, точності та методології збору інформації ускладнюють інтеграцію цих даних у єдину систему. Окрім цього, похибки та пропуски у даних можуть виникати внаслідок технічних несправностей обладнання, несприятливих природних умов або людського фактора, що негативно позначається на точності результатів та ускладнює їх подальше використання.

Додатково слід відзначити проблему відсутності або неточності координатної прив'язки пунктів відбору проб, що є критичною для досліджень, пов'язаних із просторовим аналізом. Відсутність координат унеможливує точне розташування точок відбору на карті та обмежує можливість проведення повторних вимірювань для моніторингу змін.

Таким чином, основними проблемами є фрагментованість та нерівномірний розподіл даних, обмежений доступ до територій дослідження, неоднорідність даних, наявність похибок і пропусків, а також відсутність або неточність координатної прив'язки. Подолання цих викликів є необхідною умовою для підвищення достовірності та репрезентативності результатів, що слугують основою для оцінки впливу антропогенних факторів на довкілля та розробки заходів щодо його відновлення.

На рис. 2 представлено основні проблеми збору та обробки даних, що виникають під час екологічного моніторингу, та підходи до їх вирішення.

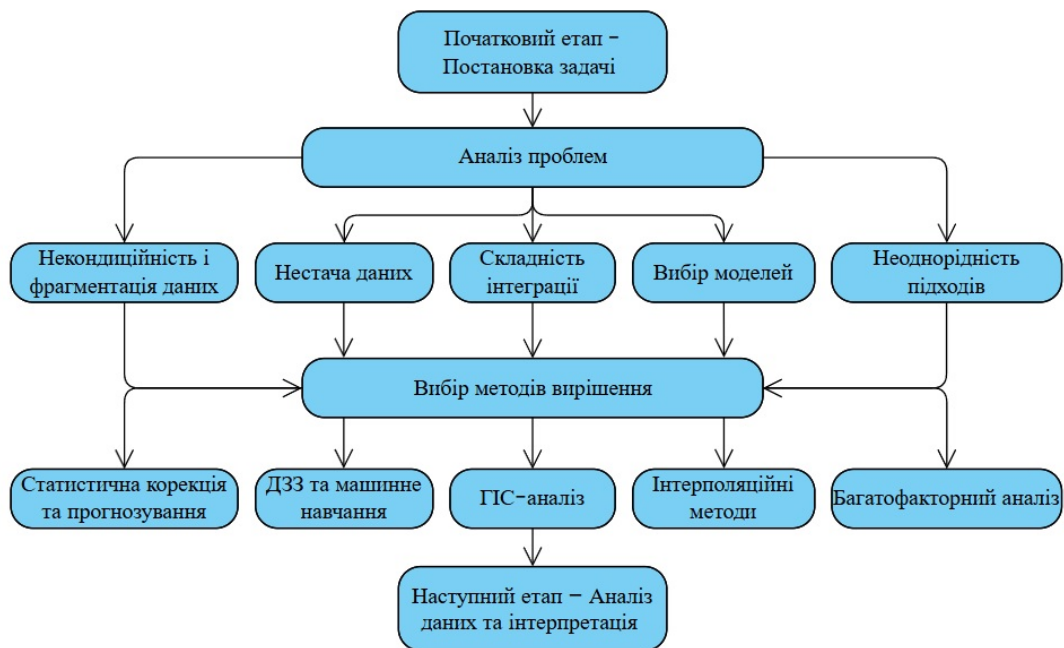


Рис. 2. Основні проблеми збору та обробки даних і методи їх вирішення

Для мінімізації впливу зазначених проблем застосовуються методи статистичної корекції, прогнозування втрачених значень, стандартизації даних та використання геоінформаційних систем (ГІС) для інтеграції та візуалізації даних.

У разі фрагментованості та нерівномірного просторово-часового розподілу даних ГІС (QGIS, ArcGIS, MapInfo) відіграють ключову роль як інструменти для збирання даних із різних джерел, їх систематизації та створення картографічних шарів, що відображають місця відбору проб та отримані результати. Використання ГІС дозволяє поєднати дані польових вимірювань, дистанційного зондування та автоматизованих станцій моніторингу, забезпечуючи їх географічну прив'язку та збереження у стандартизованих форматах (GeoPackage, OGC). Це дає змогу уникнути фрагментації даних та створює основу для подальшого аналізу [35].

Проблему обмеженого доступу до територій частково вирішує застосування дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), що дозволяє отримувати інформацію без фізичної присутності на об'єкті дослідження. Для підвищення точності результатів використовуються супутникові знімки високої роздільної здатності та мультиспектральні дані, хоча їх застосування обмежується погодними умовами та необхідністю складної інтерпретації.

Для усунення неоднорідності даних, отриманих із різних джерел, використовується стандартизація форматів та методів збору інформації. Інструменти інтероперабельності, такі як GeoPackage та стандарти Open Geospatial Consortium (OGC), забезпечують сумісність даних та полегшують їх інтеграцію в єдину систему для подальшої обробки [35].

Похибки та пропуски, що виникають у процесі збору даних, усуваються за допомогою методів статистичної корекції та прогнозування втрачених значень. У разі дефіциту даних ефективними є методи машинного навчання, зокрема Random Forest та XGBoost, які дозволяють виявити закономірності в даних та заповнити прогалини з високою точністю. Додатково використовується метод Multiple Imputation by Chained Equations (MICE), що дає змогу відновити пропущені значення з урахуванням залежностей між змінними та мінімізувати вплив нерепрезентативності вибірок. Для відновлення даних про хімічний склад компонентів довкілля застосовуються методи кореляційного аналізу та лінійної регресії логарифмів досліджуваних значень, що демонструють високу точність навіть за обмеженої кількості вихідної інформації [10–15].

Проблема відсутності або неточності координатної прив'язки пунктів відбору проб вирішується шляхом використання GPS-навігаторів під час польових вимірювань та інтеграції отриманих координат у ГІС. Якщо координати неможливо визначити безпосередньо, застосовується прив'язка на основі даних про розташування об'єктів на досліджуваній території (назви вулиць, номери будинків, орієнтири тощо) із подальшим визначенням координат за допомогою картографічних сервісів, таких як Google Maps, OpenStreetMap або державні геопортали.

Таким чином, використання ГІС для інтеграції та візуалізації даних, дистанційного зондування для збору інформації, а також застосування методів машинного навчання та статистичної корекції дозволяє усунути проблеми фрагментованості, похибок і пропусків у даних. Це забезпечує достовірність і репрезентативність результатів, необхідних для подальшого аналізу та оцінки впливу антропогенних факторів на довкілля.

**3. Аналіз даних, вибір моделей та інтерпретація результатів.** Аналіз даних та вибір моделей є ключовим етапом оцінки деградації природних компонентів під впливом антропогенних факторів. На цьому етапі здійснюється перевірка розподілу даних, вибір відповідних методів аналізу та моделювання, а також інтерпретація отриманих результатів для встановлення просторово-часових закономірностей поширення забруднювачів.

На початковому етапі здійснюється статистичний аналіз розподілу даних, що включає оцінку основних характеристик вибірки та перевірку нормальності

розподілу за допомогою тесту Шапіро-Вілка або Колмогорова-Смирнова. Для виявлення аномальних значень використовується метод I-квartilного діапазону (IQR), який дозволяє мінімізувати вплив викидів на результати аналізу. Аналіз взаємозв'язків між показниками здійснюється за допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона для лінійних залежностей та коефіцієнта Спірмена для нелінійних. Виявлення ключових закономірностей у наборі даних здійснюється за допомогою методу головних компонент (Principal Component Analysis, PCA), що дозволяє зменшити розмірність даних і визначити основні фактори впливу [16–17].

Для оцінки розподілів вмісту хімічних компонентів у воді, повітрі та ґрунтах використовується композиційно-логнормальна модель та логнормальний закон розподілу, які демонструють високу ефективність у прогнозуванні площ із перевищенням критичних границь та оцінці загального та питомого навантаження на довкілля. Композиційно-логнормальна модель дозволяє аналізувати часткові концентрації окремих компонентів, тоді як логнормальний закон описує розподіли з довгим «хвостом», характерні для концентрацій забруднювачів у природних середовищах [18–21].

Вибір моделей для просторового аналізу та прогнозування здійснюється залежно від характеру даних та поставлених завдань. Для оцінки розподілу забруднювачів використовуються методи просторової інтерполяції, такі як інверсно-зважене інтерполювання (IDW), кригінг (kriging) та триангуляція (TIN). Метод IDW дозволяє оцінювати значення в невимірних точках на основі зваженого впливу найближчих вимірювань, тоді як кригінг забезпечує більш точне прогнозування за рахунок врахування просторової структури варіацій досліджуваних показників. Метод триангуляції базується на побудові нерегулярної трикутної мережі (TIN), що дозволяє моделювати складний рельєф поверхонь та локальні аномалії в розподілі забруднень. Застосування цих методів у ГІС забезпечує можливість візуалізації результатів та створення картографічних моделей поширення забруднювачів [22–27]. Просторовий аналіз у ГІС також дозволяє ідентифікувати зони з критичним рівнем забруднення та оцінити масштаб поширення негативних впливів, що є важливим для визначення екологічних ризиків і планування заходів з реабілітації.

Методи просторового аналізу можуть бути доповнені алгоритмами машинного навчання для підвищення точності прогнозів. Методи машинного навчання, такі як Random Forest та XGBoost, використовуються для виявлення складних нелінійних залежностей та побудови прогностичних моделей. Random Forest забезпечує високу точність прогнозів завдяки використанню ансамблю рішень дерев, тоді як XGBoost дозволяє мінімізувати похибки завдяки

градієнтному підсиленню [11,28]. Поєднання цих методів із просторовим аналізом у ГІС дає змогу створювати багатofакторні моделі поширення забруднювачів, що враховують як фізико-хімічні характеристики забруднювачів, так і природно-географічні умови території.

Для уточнення взаємозв'язків між концентраціями хімічних компонентів та виявлення головних факторів впливу можуть застосовуватися методи багатовимірного аналізу, зокрема канонічний кореляційний аналіз (Canonical Correlation Analysis, CCA), а також аналіз головних компонент (Principal Component Analysis, PCA) та аналіз надмірності (Redundancy Analysis, RDA), що дозволяють виявити взаємозв'язки між групами змінних та оцінити їхній сумарний вплив на екологічний стан території [16,17,29].

Таким чином, інтеграція статистичних методів, моделей машинного навчання та геоінформаційних технологій забезпечує комплексний підхід до аналізу та інтерпретації даних, що дозволяє не лише оцінити поточний стан природних компонентів, але й прогнозувати можливі сценарії їхньої деградації внаслідок антропогенних факторів, у тому числі і воєнних дій.

**4. Валідація та перевірка достовірності результатів.** Оцінка антропогенного впливу на довкілля базується на багаторівневому аналізі даних із використанням різних методів моделювання та статистичних підходів. Проте отримані результати потребують перевірки, оскільки похибки у вхідних даних, обмеження моделей та особливості методології можуть впливати на точність оцінок. Валідація є ключовим етапом дослідження, адже від її якості залежить надійність прогнозів та можливість їх практичного використання.

Однією з основних проблем є неоднорідність вхідних даних та їхня відповідність реальним умовам. Польові вимірювання, супутникові знімки та результати моделювання можуть демонструвати розбіжності через специфіку методів збору інформації, вплив кліматичних факторів або технічні особливості аналітичних інструментів. Для усунення цих невідповідностей застосовується поєднання статистичних, емпіричних та ймовірнісних методів, що дозволяє оцінити стабільність моделей, точність прогнозів та рівень невизначеності [16,17,29].

Одним із підходів, що використовується для оцінки надійності моделей, є крос-валідація, яка дає змогу перевірити стабільність алгоритмів шляхом навчання на різних підмножинах даних. Такий підхід дозволяє зменшити ризик переналаштування моделі на особливості навчальної вибірки та забезпечити її вищу здатність до узагальнення результатів, що є особливо важливим у разі обмеженого обсягу вхідної інформації.

Окрім цього, для перевірки точності моделей застосовується порівняння прогнозованих концентрацій забруднювачів із реальними польовими

вимірюваннями. Такий підхід дає змогу виявити систематичні похибки та скоригувати моделі, що підвищує їхню достовірність і дозволяє краще враховувати регіональні особливості досліджуваних територій.

Ще одним важливим елементом перевірки є оцінка невизначеності прогнозів за допомогою методу Монте-Карло. Його застосування передбачає створення численних сценаріїв, заснованих на варіації вхідних параметрів, що дає змогу визначити довірчі інтервали та оцінити ймовірність перевищення критичних рівнів забруднення.

Для узгодження результатів моделювання з іншими джерелами даних застосовується кореляційний аналіз, що дає змогу порівняти прогнози із супутниковими знімками та польовими вимірюваннями. Це дозволяє виявити системні відхилення та забезпечити підвищену узгодженість отриманих результатів.

Окрім того, важливу роль відіграє чутливісний аналіз, який дозволяє оцінити, як зміна вхідних параметрів впливає на кінцеві результати. Цей підхід дає змогу визначити ключові фактори, що найбільше впливають на прогнози, та підвищити точність моделювання шляхом відповідного коригування алгоритмів.

Валідація є критично важливим етапом дослідження, оскільки від її якості залежить достовірність прогнозів та можливість їх застосування для моніторингу й відновлення територій, що зазнали негативного впливу. Поєднання емпіричних даних, статистичних методів та ймовірнісного аналізу дозволяє суттєво підвищити надійність оцінок і забезпечує науково обґрунтовану основу для оцінки та управління екологічними ризиками.

**5. Екологічна оцінка.** Екологічна оцінка є завершальним етапом дослідження, що спрямований на кількісне визначення рівня забруднення природних компонентів та оцінку ступеня екологічної небезпеки. Цей процес базується на застосуванні індексних методів та багатофакторного аналізу, що дозволяють інтегрувати результати моделювання та отримати об'єктивне уявлення про стан довкілля.

Одним із ключових підходів є використання стандартизованих екологічних індексів, які забезпечують можливість порівняння територій між собою та визначення зон із підвищеним рівнем забруднення. Для оцінки якості водних ресурсів застосовується індекс якості води (Water Quality Index, WQI), що дозволяє класифікувати ступінь забруднення на основі концентрацій основних хімічних елементів та порівнювати отримані результати із нормативними показниками. Аналогічно, для визначення рівня забруднення ґрунтів використовується індекс забруднення ґрунтів (Soil Pollution Index, SPI), що допомагає ідентифікувати ділянки з небезпечним накопиченням токсичних

елементів, зокрема важких металів, та оцінити ризики для агроєкосистем. Для аналізу якості атмосферного повітря застосовується індекс якості повітря (Air Quality Index, AQI), який дозволяє визначити рівень забруднення та його потенційний вплив на здоров'я населення [30-34].

Хоча екологічні індекси є ефективним інструментом оцінки, вони не завжди повною мірою відображають реальну картину екологічного стану, оскільки враховують лише обмежений набір параметрів. Тому для отримання комплекснішої оцінки використовується багатофакторний підхід, що поєднує різні показники та враховує сукупний вплив забруднювачів на природні компоненти. Багатофакторний аналіз дозволяє інтегрувати концентрації різних хімічних елементів, визначати пріоритетні фактори впливу та виявляти території з максимальним антропогенним навантаженням.

Важливу роль у цьому процесі відіграє просторовий аналіз за допомогою геоінформаційних систем (ГІС). Він дозволяє не лише оцінити поточний стан довкілля, а й інтегрувати дані екологічних індексів у вигляді картографічних шарів, що забезпечує наочне відображення територіальних закономірностей поширення забруднень. Накладання просторових даних дає змогу виявити зони з критичним рівнем забруднення та оцінити їхній вплив на навколишнє середовище.

Таким чином, екологічна оцінка, що базується на індексних методах, багатофакторному аналізі та просторовому моделюванні, забезпечує всебічне розуміння рівня деградації довкілля. Отримані результати можуть використовуватися для оцінки ризиків, планування заходів із відновлення постраждалих територій та розробки ефективних стратегій екологічного моніторингу з урахуванням регіональних особливостей.

**Висновки.** У межах дослідження обґрунтовано комплексний підхід до оцінки впливу антропогенних факторів, включаючи воєнні дії, на природне середовище. Запропонована методологія базується на поетапному аналізі, що охоплює формулювання дослідницької задачі, збір та обробку даних, вибір аналітичних моделей, просторову інтерпретацію, валідацію результатів і комплексну екологічну оцінку. Застосування геоінформаційних технологій, статистичних підходів і алгоритмів машинного навчання забезпечує високу точність та гнучкість аналізу, навіть за умов обмеженої або фрагментованої інформації.

Особливу увагу приділено подоланню проблем, пов'язаних із якістю вхідних даних, неоднорідністю джерел, відсутністю координатної прив'язки та обмеженим доступом до територій дослідження. На кожному з етапів запропоновано конкретні рішення — від використання методів прогнозування

пропущених значень до побудови просторових моделей розподілу забруднювачів та розрахунку інтегральних екологічних індексів.

Сформована методологічна схема демонструє універсальність і придатність до застосування для різних типів природних компонентів – водних об’єктів, ґрунтів і повітряного середовища – і може бути адаптована до різних масштабів моніторингу. Загальна логіка, етапи та взаємозв’язки методології узагальнені на рис. 3, що ілюструє структурну послідовність процесу екологічної оцінки та формування висновків щодо стану довкілля. Кольорове групування блоків на схемі відображає три узагальнені логічні етапи дослідження: підготовчий (синій), аналітичний (зелений) та прикладний (помаранчевий), що сприяє візуалізації структурної послідовності процесу оцінки.

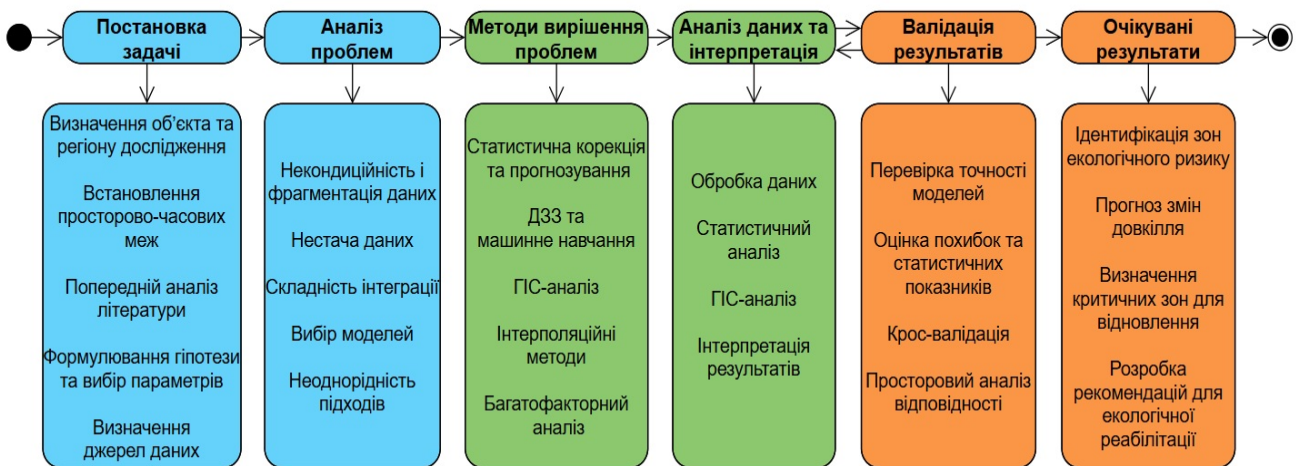


Рис. 3. Методологічний підхід до оцінки екологічних наслідків антропогенного впливу на довкілля

Отримані результати можуть бути використані для планування заходів із відновлення екосистем, управління екологічними ризиками та розробки довгострокових стратегій моніторингу територій, що зазнали впливу техногенних або воєнних чинників. Запропонований підхід має потенціал до масштабування та адаптації, що робить його перспективним для впровадження в систему інтегрованого екологічного управління.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Васенко О.Г., Карлюк А.А., Черба О.В. Сучасний стан системи моніторингу довкілля в Україні // Екологічні науки. – 2023. – № 6 (51). – С. 73–77.
2. Рибалова О.В., Коваленко О.В. Напрями застосування системного підходу в екологічному моніторингу під час бойових дій // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: Безпека. – 2023. – № 3 (63). – С. 45–56.
3. Ємець М.А. Сучасні системи екологічного моніторингу та ефективність їх функціонування // Екологія і природокористування. – 2008. – Вип. 11. – С. 159–169.

4. Клипа А.В. Вплив військових дій на природні екосистеми: наслідки, реабілітація та інтегрований підхід // *Просторовий розвиток*. – 2024. – № 10. – С. 471–481.
- Війна у Косово: екологічні аспекти й наслідки для довкілля. Звіт Комітету з питань екології, регіонального планування та місцевого самоврядування. – 2023. – 32 с. – URL: <https://rm.coe.int/the-environmental-consequences-of-the-kosovo-conflict/16807188c5>.
5. Луценко А.О. Екологічна криза в Україні: Масштаби економічних збитків, вплив воєнних дій на довкілля та шляхи відновлення // *Вісник Харківського національного педагогічного університету*. 2024. Вип. 11. С. 22–30.
6. Кратко О.В., Головатюк Л.М., Бондаренко Т.С. Екологічні наслідки воєнних дій в Україні // *Екологічний журнал*. 2023. № 2. С. 39–45.
7. Bondar O., Gandziura V., Matviienko M. The impact of military actions and its consequences on the environment of Ukraine // *Ecological Sciences*. 2024. Vol. 1. P. 7–15.
8. Stelmakh V., Melniichuk M., Melnyk O., Tokarchuk I. Hydro-ecological state of Ukrainian water bodies under the influence of military actions // *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023. Vol. 25. P. 174–187.
9. Міщук О.С. Нейроподібні методи та засоби прогнозування параметрів забруднення атмосферного повітря: дис. канд. техн. наук: 05.13.23 / Національний університет "Львівська політехніка". – Львів, 2021. – 200 с. – URL: <https://uacademic.info/ua/document/0421U101008>.
10. PM2.5 Prediction Based on Random Forest, XGBoost, and Deep Learning Using Multisource Remote Sensing Data // *Atmosphere*. – 2019. – Vol. 10(7). – Art. 373. DOI: 10.3390/atmos10070373
11. How to out-perform default random forest regression: choosing hyperparameters for applications in large-sample hydrology // *arXiv preprint*. – 2023. – arXiv:2305.07136. URL: <https://arxiv.org/abs/2305.07136>
12. Royston, P., & White, I. R. (2011). Multiple Imputation by Chained Equations (MICE): Implementation in Stata. *Journal of Statistical Software*, 45(4), 1–20.
13. Жуков М.М., Клипа А.В. Метод відновлення бази даних вмісту мікроелементів у природних водах // *Науковий вісник НГУ*. – 2014. – № 6. – С. 126–131.
14. Жуков М.М., Клипа А.В. Відновлення кондиційності баз даних для корекції моделей розподілів вмістів мікроелементів у природних водах // *Геоінформатика*. – 2014. – № 4 (52). – С. 54–60.
15. Жуков М.Н. Математична статистика та обробка геологічних даних: підруч. для студ. геол. ф-тів вищ. навч. закл. / Київський національний ун-т ім. Тараса Шевченка. – Київ: Київський ун-т, 2008. – 487 с. – ISBN 966-439-008-9.
16. Жуков М.Н. Статистичний аналіз геологічних даних. – К.: Київськ. ун-т, 1995. – 551 с.
17. Жуков М.Н. Імовірнісна оцінка забруднення природного середовища на основі моделювання розподілів вмісту хімічних елементів (на прикладі поверхневих вод Полтавської області) / М. Н. Жуков [та ін.] // *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. – 2012. – № 58. – С. 52–57.
18. Жуков М.Н., Стахів І.Р., Клипа А.В. Моделювання розподілів вмісту забруднюючих речовин в атмосфері мегаполісів (на прикладі м. Києва) // *Геоінформатика*. – 2013. – № 2(46). – С. 61–69.
19. Жуков М.Н., Клипа А.В., Стахів І.Р. Оцінка ефективності моделей розподілу вмісту важких металів у поверхневих водах (на прикладі Полтавської області) // *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. – 2012. – № 58. – С. 51–54.
20. Клипа А.В. Оцінка навантаження поверхневих вод важкими металами (на прикладі Полтавської області) на основі моделей композиційного розподілу їх вмісту // *Тези доповідей Всеукраїнської конференції-школи «Сучасні проблеми геологічних наук»*, 15–19 квітня 2013 р. – Київ, 2013. – С. 12–15.
21. Liu J., Wu X., Zhang Y. Assessment of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighting Methods for Estimating Soil Heavy Metal Concentrations in E-Waste Recycling Area //

Environmental Health Perspectives. – 2015. – Vol. 123, No. 7. – P. 721–728. – URL: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.5696/2156-9614-10.26.200605>.

22. Singh S.K., Gupta A.K. Air Quality Index Prediction Using IDW Geostatistical Technique and Spatiotemporal Variations Analysis // Geocarto International. – 2019. – Vol. 34, No. 8. – P. 878–891. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2019.1683084>.

23. Liao M. H., Chen C. H. Geostatistical Analysis Methods for Estimation of Environmental Pollution: A Review // Journal of Chemistry. – 2018. – Article ID 7424818. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2018/7424818>.

24. Шипулін В.Д. Основні принципи геоінформаційних систем: навч. посібник. – Харків: ХНАМГ, 2010. – 313 с. – ISBN 978-966-695-144-4.

25. Павленко Л.А. Геоінформаційні системи: навчальний посібник. – Харків: ХНЕУ, 2013. – 260 с.

26. Євдокімов А.А., Манакова Н.О., Сенчук Т.С. Інфраструктура просторових даних: навч. посібник. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2023. – 159 с.

27. Fatima S., Hussain A., Amir S. B., Ahmed S. H., Aslam S. M. H. XGBoost and Random Forest Algorithms: An In-Depth Analysis // Pakistan Journal of Scientific Research. – 2023. – Vol. 3, No. 1. – P. 26–31. DOI: 10.57041/pjosr.v3i1.946.

28. Бахрушин В.Є. Методи аналізу даних: навч. посібн.. – Запоріжжя: КПУ, 2011. – 354 с.

29. Шестопапов О.В., Сакун А.О., Лізантан П.С., Кануннікова Н.О., Гайдучек О.Г., Томашевський Р. С., Воробйов Б. В. Аналіз показників якості води: сучасні аспекти і виклики // Екологічні науки. – 2024. – № 3(54). – С. 76–82.

30. Бойчук Б.Я., Кузик А.Д., Сиса Л.В. Екологічна оцінка якості води у верхній течії річки Прут // Техногенна та екологічна безпека. Вісник ЛДУБЖД. – 2019. – № 19. – С. 108–114. DOI: 10.32447/20784643.19.2019.12.

31. Романенко В.Д., Жулинський В.М., Оксіюк О.П. та ін. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними критеріями: затв. наказом Мінекобезпеки України від 31.01.98 р. № 44. – К.: Символ-Т, 1998. – 48 с.

32. Гололобова О.О. Оцінка поліелементного забруднення ґрунтів територій різного рівня антропогенного навантаження // Людина та довкілля. Проблеми неоекології. – 2011. – № 1-2. – С. 118–124.

33. Яковишина Т.Ф. Індекс антропогенного навантаження на ґрунт урбоєкосистем внаслідок забруднення важкими металами // Геоекологічні дослідження. – 2023. – Т. 15. – № 1. – С. 224–229.

34. Основи створення інтегрованих геопросторових даних / Ю.О. Карпінський, А.А. Лященко, Н.Ю. Лазаренко, Д.О. Кінь. – К.: КНУБА, 2023. – 302 с. – ISBN 978-966-627-248-8.

**PhD Andrii Klypa,**  
Kyiv National University of Construction and Architecture,  
**PhD Iryna Stakhiv,**  
Taras Shevchenko National University of Kyiv

## **METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF GIS-BASED ASSESSMENT OF ANTHROPOGENIC IMPACTS ON NATURAL ENVIRONMENTAL COMPONENTS: CHALLENGES AND SOLUTIONS**

The article presents the methodological foundations of GIS-based assessment of anthropogenic impacts on natural environmental components. A comprehensive

approach is proposed that integrates geographic information systems (GIS), statistical methods, machine learning, and mathematical modeling. The study outlines key challenges related to the collection, processing, and interpretation of environmental data and offers practical solutions to address them. Particular attention is given to spatial analysis techniques for detecting pollution patterns, model validation strategies, and ecological risk assessment. The research also examines the use of environmental indices and multifactor analysis to assess the state and dynamics of soil, water, and air quality under anthropogenic pressure. The developed methodological framework enables spatial identification of environmentally vulnerable areas and quantitative analysis of changes over time. The results demonstrate the potential of this approach for environmental monitoring, planning of ecosystem restoration, and the development of an integrated methodology for assessing and forecasting the environmental consequences of anthropogenic activities. The proposed method can be adapted to various spatial scales and types of environmental stressors, providing decision-makers with effective tools for sustainable environmental management.

Keywords: GIS analysis; environmental monitoring; anthropogenic pressure; statistical modeling; machine learning; spatial analysis; ecological risks; pollution indices; geoinformation technologies.

## REFERENCES

1. Vasenko, O.H., Karliuk, A.A., & Cherba, O.V. (2023). Suchasnyi stan systemy monitorinhu dovkillia v Ukraini. *Ekologichni nauky*, (6)51, 73–77. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.11> {in Ukrainian}.
2. Rybalova, O.V. & Kovalenko, O.V. (2023). Napriamy zastosuvannya systemnoho pidkhodu v ekolohichnomu monitorynhu pid chas boiovykh dii. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Serii: Bezpeka*, (3)63, 45–56. <https://security.bulletin.knu.ua/article/view/3182> {in Ukrainian}.
3. Yemets, M.A. (2008). Suchasni systemy ekolohichnoho monitorynhu ta efektyvnist yikh funktsionuvannia. *Ekolohiia i pryrodokorystuvannia*, 11, 159–169. {in Ukrainian}.
4. Klypa, A.V. (2024). Vplyv viiskovykh dii na pryrodni ekosystemy: naslidky, rehabilitatsiia ta intehrovanyi pidkhid. *Prostorovi rozvytok*, (10), 471–481. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.471-481> {in Ukrainian}.
5. Komitet z pytan ekolohii, rehionalnoho planuvannia ta mistsevoho samovriaduvannia (2023). Viina u Kosovo: ekolohichni aspekty y naslidky dlia dovkillia. *Zvit.* 32 p. <https://rm.coe.int/the-environmental-consequences-of-the-kosovo-conflict/16807188c5> {in Ukrainian}.

6. Lutsenko, A.O. (2024). Ekolohichna kryza v Ukraini: masshtaby ekonomichnykh zbytkiv, vplyv voiennykh dii na dovkillia ta shliakhy vidnovlennia. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu*, (11), 22–30. {in Ukrainian}.
7. Kratko, O.V., Holovatiuk, L.M. & Bondarenko, T.Ye. (2023). Ekolohichni naslidky voiennykh dii v Ukraini. *Ekologichniy zhurnal*, (2), 39–45. {in Ukrainian}.
8. Bondar, O., Gandziura, V. & Matviienko, M. (2024). The impact of military actions and its consequences on the environment of Ukraine. *Ecological Sciences*, 1, 7–15. {in English}.
9. Stelmakh, V., Melniichuk, M., Melnyk, O. & Tokarchuk, I. (2023). Hydro-ecological state of Ukrainian water bodies under the influence of military actions. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 25, 174–187. {in English}.
10. Mishchuk, O.S. (2021). Neiropodobni metody ta zasoby prohozuvannia parametriv zabrudnennia atmosferneho povitria: dysertatsiia kand. tekhn. nauk: 05.13.23. Natsionalnyi universytet “Lvivska politekhnika”. 200 p. <https://uacademic.info/ua/document/0421U101008> {in Ukrainian}.
11. PM2.5 Prediction Based on Random Forest, XGBoost, and Deep Learning Using Multisource Remote Sensing Data. (2019). *Atmosphere*, 10(7), 373. <https://doi.org/10.3390/atmos10070373> {in English}.
12. How to out-perform default random forest regression: choosing hyperparameters for applications in large-sample hydrology. (2023). arXiv preprint, arXiv:2305.07136. <https://arxiv.org/abs/2305.07136> {in English}.
13. Royston, P. & White, I.R. (2011). Multiple Imputation by Chained Equations (MICE): Implementation in Stata. *Journal of Statistical Software*, 45(4), 1–20. {in English}.
14. Zhukov, M.M. & Klypa, A.V. (2014). Metod vidnovlennia bazy danykh vmistu mikroelementiv u pryrodnykh vodakh. *Naukovyi visnyk NGU*, (6), 126–131. {in Ukrainian}.
15. Zhukov, M.M. & Klypa, A.V. (2014). Vidnovlennia kondytsiinosti baz danykh dlia korektsii modelei rozpodiliv vmistiv mikroelementiv u pryrodnykh vodakh. *Heoinformatyka*, 4(52), 54–60. {in Ukrainian}.
16. Zhukov, M.M. (2008). *Matematychna statystyka ta obrobka heolohichnykh danykh: pidruchnyk dlia studentiv heolohichnykh fakultetiv VNZ*. Kyiv: Kyivskiy natsionalnyi universytet. 487 p. ISBN 966-439-008-9 {in Ukrainian}.
17. Zhukov, M.M. (1995). *Statystychnyi analiz heolohichnykh danykh*. Kyiv: Kyivskiy universytet. 551 p. {in Ukrainian}.
18. Zhukov, M.M., Stakhiv, I.R. & Klypa, A.V. (2012). Imovirnisna otsinka zabrudnennia pryrodnoho seredovyscha na osnovi modeliuвання rozpodiliv vmistu

khimichnykh elementiv (na prykladi poverkhnevnykh vod Poltavskoi oblasti). Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiia, (58), 52–57. {in Ukrainian}.

19. Zhukov, M.M., Stakhiv, I.R. & Klypa, A.V. (2013). Modeliuvannia rozpodiliv vmistu zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferi mehapolisiv (na prykladi m. Kyieva). Heoinformatyka, 2(46), 61–69. {in Ukrainian}.

20. Zhukov, M.M., Klypa, A.V. & Stakhiv, I.R. (2012). Otsinka efektyvnosti modelei rozpodilu vmistu vazhkykh metaliv u poverkhnevnykh vodakh (na prykladi Poltavskoi oblasti). Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiia, (58), 51–54. {in Ukrainian}.

21. Klypa, A.V. (2013). Otsinka navantazhennia poverkhnevnykh vod vazhkymy metalamy (na prykladi Poltavskoi oblasti) na osnovi modelei kompozytsiinoho rozpodilu yikh vmistu. In: Tezy dopovidei Vseukrainskoi konferentsii-shkoly “Suchasni problemy heolohichnykh nauk”, 15–19 kvitnia 2013 r., Kyiv, pp. 12–15. {in Ukrainian}.

22. Liu, J., Wu, X. & Zhang, Y. (2015). Assessment of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighting Methods for Estimating Soil Heavy Metal Concentrations in E-Waste Recycling Area. Environmental Health Perspectives, 123(7), 721–728. <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.5696/2156-9614-10.26.200605> {in English}.

23. Singh, S.K. & Gupta, A.K. (2019). Air Quality Index Prediction Using IDW Geostatistical Technique and Spatiotemporal Variations Analysis. Geocarto International, 34(8), 878–891. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2019.1683084> {in English}.

24. Liao, M.H. & Chen, C.H. (2018). Geostatistical Analysis Methods for Estimation of Environmental Pollution: A Review. Journal of Chemistry, Article ID 7424818. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2018/7424818> {in English}.

25. Shypulin, V.D. (2010). Osnovni pryntsyipy heoinformatsiinykh system: navchalnyi posibnyk. Kharkiv: KHNAMH. 313 p. ISBN 978-966-695-144-4 {in Ukrainian}.

26. Pavlenko, L.A. (2013). Heoinformatsiini systemy: navchalnyi posibnyk. Kharkiv: KhNEU. 260 p. {in Ukrainian}.

27. Yevdokymov, A.A., Manakova, N.O. & Senchuk, T.S. (2023). Infrastruktura prostorovykh danykh: navchalnyi posibnyk. Kharkiv: KhNUMH im. O.M. Beketova. 159 p. {in Ukrainian}.

28. Fatima, S., Hussain, A., Amir, S.B., Ahmed, S.H. & Aslam, S.M.H. (2023). XGBoost and Random Forest Algorithms: An In-Depth Analysis. Pakistan Journal of Scientific Research, 3(1), 26–31. <https://doi.org/10.57041/pjosr.v3i1.946> {in English}.

29. Bakhrushyn, V.Ye. (2011). *Metody analizu danykh: navchalnyi posibnyk*. Zaporizhzhia: KPU. 354 p. {in Ukrainian}.
30. Shestopalov, O.V., Sakun, A.O., Lyzantan, P.S., Kanunnikova, N.O., Haidutsekh, O.H., Tomashevskiy, R.S. & Vorobiov, B.V. (2024). Analiz pokaznykiv yakosti vody: suchasni aspekty i vyklyky. *Ekologichni nauky*, 3(54), 76–82. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.3-54.10> {in Ukrainian}.
31. Boichuk, B.Ya., Kuzyk, A.D. & Sysa, L.V. (2019). Ekolohichna otsinka yakosti vody u verkhonii techii richky Prut. *Teknohennia ta ekolohichna bezpeka. Visnyk LDUBZhD*, (19), 108–114. <https://doi.org/10.32447/20784643.19.2019.12> {in Ukrainian}.
32. Romanko, V.D., Zhulynskiy, V.M., Oksiuk, O.P. et al. (1998). *Metodyka ekolohichnoi otsinky yakosti poverkhnevyykh vod za vidpovidnymy kryteriiamy: zatv. nakazom Minekobezpeky Ukrainy vid 31.01.98 r. № 44*. Kyiv: Symbol-T. 48 p. {in Ukrainian}.
33. Hololobova, O.O. (2011). Otsinka polielementnoho zabrudnennia rruntyv terytorii riznoho rivnia antropohennoho navantazhennia. *Liudyna ta dovkillia. Problemy neoekolohii*, (1–2), 118–124. {in Ukrainian}.
34. Yakovyshyna, T.F. (2023). Indeks antropohennoho navantazhennia na rrunty urboekosystem vnaslidok zabrudnennia vazhkymy metalamy. *Heoekolohichni doslidzhennia*, 15(1), 224–229. {in Ukrainian}.
35. Karpinskyi, Yu.O., Liashchenko, A.A., Lazarenko, N.Yu. & Kin, D.O. (2023). *Osnovy stvorennia interoperabelnykh heoprosorovykh danykh*. Kyiv: KNUBA. 302 p. ISBN 978-966-627-248-8 {in Ukrainian}.