

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

Інститут архітектури, будівництва та енергетики
Кафедра геодезії та землеустрою

Олексюк Іванна Іванівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.4
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Картографічне забезпечення проєктів землеустрою для визначення місця
під будівництво очисних споруд у гмінах Перзніца та Хмельнік Республіка
Польща

Геодезія та землеустрій
(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

Студентка ГЗ-21-1 І. І. Олексюк
(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник к.геол.н., доц. Д.В. Касіянчук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

проф. М.М. Приходько
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

ас. І.В. Біда
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ
2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут архітектури, будівництва та енергетики

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр землеустрій та кадастр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Приходько М.М.

" ___ " _____ р.

**ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Олексюк Іванні Іванівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: «Картографічне забезпечення проєктів землеустрою для визначення місця під будівництво очисних споруд у гмінах Перзніца та Хмельнік Республіка Польща»

керівник роботи: Касіяничук Д.В., к.геол.н, доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом вищого навчального закладу від «»2025 року №346/7

2. Строк подання студентом роботи _____ 2025 року

3. Вихідні дані до роботи статистичні дані, нормативно-правові акти, довідкова література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) вступ, розділи 1-4, висновки

6. Перелік графічного матеріалу: фізичні карти (OpenStreetMap)

7. Дата видачі завдання 07.06.2025 р. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	<i>Отримання завдання на виконання бакалаврської роботи. Опрацювання рекомендованої літератури по темі</i>		
2	<i>Складання попереднього плану та змісту бакалаврської роботи</i>		
3	<i>Робота над розділом 1-2</i>		
4	<i>Робота над розділом 3</i>		
5	<i>Робота над розділом 4</i>		
6	<i>Складання висновків</i>		
7	<i>Оформлення бакалаврської роботи</i>		

Студентка

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Abstract. *This paper investigates in detail the possibilities of using geographic information systems (GIS) as an effective tool for spatial planning, in particular in the field of selecting optimal locations for sewage treatment plants in Poland. Considerable attention is paid to the analysis of key spatial, environmental and socio-economic factors that determine the feasibility of selecting specific locations. These factors include the terrain, availability and accessibility of transport infrastructure, possible impact on the natural environment, including water resources, soil and biodiversity, as well as social aspects related to the reaction of the local population to the location of treatment facilities. The methodological basis of the study was a multi-criteria analysis (MCA), which allowed for a comprehensive assessment of various spatial factors and the identification of the three most suitable sites for the construction of the treatment plant. The use of GIS in combination with MCA enabled the integration and systematisation of heterogeneous spatial data, which allowed for the consideration of complex interrelationships between environmental, economic and social factors. The analysis identified the three most suitable sites for the construction of the wastewater treatment plant. Site No. 1 was chosen as the most optimal: the area is 2783.1 hectares; the shape coefficient is 0.05 (close to a regular square); the distance from built-up areas is the maximum among the studied sites; transport accessibility is the availability of high-quality access roads. The results of the study confirm the high efficiency of geographic information systems in the field of territorial planning, especially for tasks requiring consideration of multifactorial criteria. The findings indicate the expediency of active implementation of GIS for making strategic decisions in the field of environmental and spatial planning.*

Keywords: *Geographic Information Systems, territorial planning, wastewater treatment plants, environmental optimization, spatial analysis.*

Анотація. У даній роботі детально досліджено можливості застосування геоінформаційних систем (ГІС) як ефективного інструменту для територіального планування, зокрема у сфері вибору оптимальних місць для розташування очисних споруд на території Польщі. Значна увага приділена аналізу ключових просторових, екологічних та соціально-економічних факторів, які визначають доцільність вибору конкретних локацій. Серед таких факторів враховано рельєф місцевості, наявність та доступність транспортної інфраструктури, можливий вплив на природне середовище, зокрема на водні ресурси, ґрунти та біорізноманіття, а також соціальні аспекти, пов'язані з реакцією місцевого населення на розміщення очисних споруд. Методологічною основою дослідження став багатокритеріальний аналіз (МСА), що дозволив здійснити комплексну оцінку різних просторових чинників та визначити три найбільш придатні ділянки для будівництва очисних споруд. Використання ГІС у поєднанні з МСА забезпечило інтеграцію та систематизацію різнорідних просторових даних, що дало змогу врахувати складні взаємозв'язки між екологічними, економічними та соціальними чинниками. У ході аналізу було визначено три найбільш придатні ділянки для будівництва очисних споруд. Найоптимальнішою була обрана Ділянка №1: площа - 2783,1 ар.; коефіцієнт форми - 0,05 (близький до правильного квадрата); віддаленість від забудованих територій максимальна серед досліджених; транспортна доступність - наявність під'їзних доріг високої якості. Результати дослідження підтверджують високу ефективність геоінформаційних систем у сфері територіального планування, особливо для завдань, що вимагають врахування багатфакторних критеріїв. Отримані висновки свідчать про доцільність активного впровадження ГІС для ухвалення стратегічних рішень у галузі екологічного та просторового планування.

Ключові слова: геоінформаційні системи, територіальне планування, очисні споруди, екологічна оптимізація, просторовий аналіз.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ГІС У СФЕРІ ВОДООЧИСТКИ..	10
1.1 Загальні принципи функціонування геоінформаційних систем	10
1.2 Геоінформаційні системи як інструмент екологічного моделювання	13
1.3 Інтеграція ГІС у процеси прийняття рішень у сфері водоочистки	13
1.4 Перспективи розвитку та зарубіжний досвід впровадження ГІС у водному секторі.....	16
2. АНАЛІЗ ТЕРИТОРІЇ ПЕРЩИНА І ХМЕЛЬНІК (ПОЛЬЩА) ЯК ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ	17
2.1. Фізико-географічна характеристика території.....	17
2.2 Джерела забруднення та оцінка якості води	19
2.3 Просторові дані та методика їх збору	22
2.4 Програмне забезпечення	24
3. ЗАСТОСУВАННЯ ГІС ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ВОДООЧИСТКИ В РЕГІОНІ ПЕРЩИНА І ХМЕЛЬНІК	28
3.1 Просторовий аналіз водозбірного басейну	28
3.2 Побудова цифрової моделі рельєфу та гідрографічної мережі.....	30
3.3 Визначення зон підвищеного ризику забруднення	33
3.4 Картографічне моделювання та оцінка ефективності заходів очищення	36
4. КАРТОГРАФІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЄКТІВ ЗЕМЛЕУСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ ПІД БУДІВНИЦТВО ОЧИСНИХ СПОРУД У ГМІНАХ ПЕРЗНИЦА ТА ХМЕЛЬНІК РЕСПУБЛІКА ПОЛЬЩА	39
4.1 Просторовий аналіз.....	39
4.2 Формування бази геоданих (вибірка, зокрема опрацювання ЦМР)	42
4.3 Вибір параметрів (умов) щодо розташування водоочисних споруд та побудова карт	48

ВИСНОВКИ	55
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56
БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА	59

ВСТУП

Проблема забруднення водного середовища є однією з найгостріших екологічних викликів сьогодення. Зростання чисельності населення, індустріалізація та урбанізація призводять до збільшення обсягів стічних вод, що потребують ефективного очищення. Водночас, правильне розміщення очисних споруд є важливою передумовою забезпечення екологічної рівноваги, зниження ризиків забруднення водойм та досягнення сталого розвитку територій. Вибір місць для розміщення таких об'єктів потребує врахування великої кількості природних та антропогенних факторів. Традиційні підходи до планування не завжди забезпечують достатню точність та адаптивність до конкретних умов місцевості. У цьому контексті зростає роль геоінформаційних систем (ГІС), які надають інструменти для просторового аналізу, моделювання, інтеграції багат шарової екологічної інформації.

Особливо ефективними є підходи, що поєднують використання ГІС із даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), що дозволяє оперативно отримувати актуальні просторові дані щодо рельєфу, землекористування, гідрографії, забудови тощо. ДЗЗ виступає джерелом даних високої точності, що доповнює ГІС-аналіз і дозволяє виявляти оптимальні ділянки з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Крім того, вибір даної теми зумовлений не лише науковим інтересом, але й її актуальністю для сучасної України, яка перебуває у стані екологічного навантаження, спричиненого як глобальними змінами клімату, так і локальними викликами, пов'язаними з воєнними діями та пошкодженням критичної інфраструктури. Забезпечення якісного очищення стічних вод стає ключовою умовою відновлення та безпечного розвитку територій.

Практична значущість дослідження полягає у тому, що отримані результати можуть бути використані територіальними громадами, екологічними службами, а також проєктувальниками для підготовки просторових планів з урахуванням

екологічних чинників. Новизна підходу полягає у комплексному поєднанні методів геоінформаційного аналізу, супутникового зондування та багатофакторного картографування, що відповідає сучасним підходам до екологічного моніторингу в Європейському Союзі.

У даній бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто приклад використання геоінформаційних технологій для вибору місця розташування очисних споруд на прикладі території Польщі. Практична частина базується на реальному проєкті, реалізованому в середовищі QGIS, з урахуванням екологічних, географічних і соціальних чинників. Окрему увагу приділено ролі супутникових знімків та методів аналізу на основі даних ДЗЗ для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Мета дослідження – обґрунтування можливостей використання ГІС та ДЗЗ у процесі просторового планування для визначення оптимального місця розташування очисних споруд.

Завдання дослідження:

- проаналізувати сучасні підходи до просторового планування в екології;
- оцінити можливості геоінформаційних систем у прийнятті управлінських рішень;
- дослідити потенціал дистанційного зондування Землі як джерела просторових даних;
- провести практичне моделювання в QGIS з метою визначення оптимального місця для очисної споруди.

Об'єкт дослідження – процес просторового планування в екологічному контексті. **Предмет дослідження** – застосування ГІС та ДЗЗ для екологічно обґрунтованого вибору місця для розміщення очисних споруд.

Методи дослідження – геоінформаційне моделювання, просторовий аналіз, супутникова інтерпретація, порівняльний аналіз.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ГІС У СФЕРІ ВОДООЧИСТКИ

1.1 Загальні принципи функціонування геоінформаційних систем

Геоінформаційні системи (ГІС) – це комп'ютерні технології, які забезпечують збір, обробку, аналіз і візуалізацію просторових даних для підтримки управлінських рішень. У сфері екологічного аналізу ГІС виступають основою для моделювання природних процесів, оцінки антропогенного навантаження та прогнозування змін у довкіллі.

Одним із ключових завдань ГІС у водному секторі є інтеграція різнотипних даних: картографічних, супутникових, польових та статистичних. Це дозволяє створювати багат шарові моделі територій, у яких кожен елемент містить просторову та атрибутивну інформацію. Наприклад, за допомогою індексів трансформованості можна оцінити рівень впливу діяльності людини на природні екосистеми.

Завдяки використанню таких інструментів, як буферний аналіз, моделювання стоку, зонування або інтерполяція, можна виявити екологічно вразливі зони, спроектувати захисні смуги або обґрунтувати місця для розміщення очисних споруд. Розвиток ГІС відбувається у напрямі інтеграції з дистанційним зондуванням Землі (ДЗЗ) і штучним інтелектом, що відкриває нові можливості для прогнозного екомоделювання.

Екологічна оцінка територій – це комплексне вивчення природного та антропогенного середовища з метою визначення рівня його трансформації, порушень природних процесів та екосистемної рівноваги. Її основне завдання – забезпечити наукову основу для прийняття рішень у сфері просторового планування та охорони довкілля (Forman, 1995).

Одним із важливих індикаторів є еколого-географічна трансформованість територій, яку можна визначати на основі геоінформаційних даних про землекористування, транспортну мережу, забудову тощо (Turner et al., 2001).

Оцінка повинна враховувати природну цінність, ступінь збереження природних елементів, ризики деградації та здатність до самовідновлення екосистем. Це особливо важливо в умовах кліматичних змін та зростаючого антропогенного тиску.

Сучасна екологічна ситуація вказує на зростаючу складність управління водними ресурсами. Посилення урбанізаційних процесів, промислове розширення та інтенсивне сільське господарство ведуть до постійного збільшення обсягів забруднених стічних вод. Згідно з дослідженнями, щодня у світовий водний обіг потрапляють мільярди кубометрів неочищених або недостатньо очищених стоків, що створює серйозну загрозу для екосистем та здоров'я населення (UNEP, 2023).

В Україні ситуація ускладнюється застарілою інфраструктурою, недостатнім фінансуванням сфери водопідготовки, а також невідповідністю існуючих очисних споруд сучасним екологічним вимогам. Додатковий виклик становлять зміни клімату, які призводять до нестабільності водного режиму, частіших посух і повеней.

Геоінформаційні системи (ГІС) виступають невід'ємним інструментом сучасної екологічної науки. Вони забезпечують інтеграцію просторових і тематичних даних, що дозволяє виконувати комплексну оцінку стану довкілля. За даними [Longley et al., 2015], ГІС дозволяє не тільки візуалізувати дані, а й проводити глибокий просторовий аналіз та моделювання змін навколишнього середовища.

Програми як QGIS або ArcGIS дають можливість імпортувати дані супутникового зондування (Sentinel, Landsat), об'єднувати їх з результатами польових досліджень, розраховувати індекси вегетації (NDVI), оцінювати рівень урбанізації, аналізувати топографію та гідрологічну мережу.

Застосування ГІС у проектуванні сталого землекористування особливо цінне в сільській місцевості, де відбувається трансформація ландшафтів через житлову забудову, дорожню інфраструктуру або зміну типів агровикористання (Zhou et al., 2020).

У цьому контексті зростає значення раціонального просторового планування, зокрема при визначенні місць для розміщення та модернізації очисних споруд. Недостатнє врахування просторових факторів – як-от близькість до водних об'єктів, рельєф, гідрологічні умови – може призвести до неефективного очищення вод та вторинного забруднення довкілля.

Сучасні методи просторового аналізу передбачають використання геоінформаційних систем (GIS) та даних дистанційного зондування Землі (DSS), які забезпечують інтеграцію багатьох критеріїв в єдину систему ухвалення рішень. Вчені відзначають, що впровадження ГІС дозволяє зменшити витрати на проектування та експлуатацію очисних систем, а також підвищити точність екологічного моделювання (Melesse et al., 2022).

Країни Європейського Союзу, США та Японії демонструють приклади успішного застосування комплексних інформаційних платформ у водному менеджменті. Наприклад, використання супутникових даних Sentinel-2 у поєднанні з GIS дає змогу відслідковувати динаміку забруднень, ідентифікувати критичні ділянки та адаптувати технічні рішення в режимі реального часу.

Окрім того, згідно з дослідженнями Journal of Hydrology (2021), застосування моделей машинного навчання для прогнозування поведінки стічних вод дозволяє зменшити ризики перевантаження систем водовідведення в умовах екстремальних погодних подій. Такі інструменти дедалі частіше інтегруються в стратегії сталого розвитку, відповідаючи Цілям ООН у сфері сталого управління водними ресурсами (Sustainable Development Goal 6)

1.2 Геоінформаційні системи як інструмент екологічного моделювання

ГІС-технології відіграють ключову роль у вивченні та прогнозуванні екологічних процесів, особливо у сфері водоочищення. Завдяки інтеграції просторової інформації з екологічними індикаторами, ГІС дозволяє аналізувати поширення забруднень, відслідковувати зміни в екосистемах і моделювати вплив господарської діяльності на водне середовище.

Особливо важливим є поєднання ГІС з супутниковими даними та методами дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Використання знімків з супутників Sentinel-2 або Landsat надає змогу здійснювати спектральний аналіз, виявляти ознаки евтрофікації, зміни рослинності, температури води та інших параметрів. Це значно розширює можливості діагностики стану водних ресурсів.

Крім того, сучасні дослідження демонструють ефективність поєднання ГІС з методами штучного інтелекту – зокрема, машинного навчання – для автоматизованої класифікації територій за ступенем екологічного ризику. Такі інструменти дозволяють отримувати високоінформативні карти забруднення, визначати пріоритетні зони для екологічного втручання та прогнозувати довгострокові наслідки змін у землекористуванні.

Таким чином, геоінформаційні системи виступають не лише інструментом відображення екологічної ситуації, але й основою для моделювання сценаріїв природних змін і прийняття управлінських рішень у сфері охорони водних ресурсів.

1.3 Інтеграція ГІС у процеси прийняття рішень у сфері водоочистки

Геоінформаційні системи дедалі частіше інтегруються у системи підтримки прийняття рішень (СППР), що дозволяє створювати комплексні моделі для управління екологічними процесами. У сфері водоочистки це забезпечує системний підхід до оцінки територій, врахування природних і соціально-економічних чинників та формування ефективних стратегій розміщення інфраструктури.

Одним із найефективніших методів інтеграції є поєднання ГІС з багатокритеріальним аналізом (Multi-Criteria Analysis, МСА). Цей підхід дозволяє оцінити альтернативні варіанти розташування очисних споруд з урахуванням таких параметрів, як віддаленість від водних об'єктів, тип ґрунтів, рельєф, щільність забудови, соціальна сприйнятливість тощо.

Також важливим є використання ГІС у регіональному плануванні, де застосовуються методи еколого-ландшафтного зонування, просторового аналізу ризиків, буферизації та кластеризації даних. Ці інструменти допомагають визначити території з підвищеним ризиком забруднення, оптимізувати зони санітарного захисту і планувати інженерні споруди з мінімальним впливом на довкілля.

Інтеграція ГІС з цифровими моделями рельєфу, базами демографічних і екологічних даних, а також сценарними прогнозами змін дозволяє створювати адаптивні моделі управління водними ресурсами. Це забезпечує підвищення ефективності прийнятих рішень і наближення до принципів сталого розвитку.

Такий підхід дозволяє забезпечити обґрунтованість рішень при виборі ділянок для будівництва очисних споруд або при розробці регіональних стратегій управління водними ресурсами.

Одним з провідних методологічних підходів є еколого-ландшафтне зонування, яке дозволяє просторово локалізувати проблемні ділянки, класифікувати території за ступенем порушення та запропонувати рекомендації щодо їх охорони або рекультивациі. Такий підхід широко використовується в Німеччині, Польщі та країнах Скандинавії.

Сучасні дослідження акцентують увагу на важливості екосистемного підходу, який враховує екосистемні послуги, що надаються територією, та ступінь їх втрати внаслідок змін у землекористуванні (МЕА, 2005).

У світовій практиці доведено ефективність інтеграції ГІС з математичними моделями для оптимізації процесів очищення вод. Наприклад, дослідники в

Йорданії застосували метод аналізу ієрархій (АНР) разом із ГІС для визначення найдоцільніших локацій для спорудження очисних установок. Система враховувала топографічні, гідрологічні та соціальні показники, що дозволило досягти балансу між ефективністю очищення та витратами на інфраструктуру (Al-Shabeeb et al., 2023).

Інші дослідження, зокрема в Іспанії, демонструють потенціал поєднання ГІС із прогностичними моделями, що використовують штучний інтелект. Такі підходи дозволяють не лише виявляти зони екологічного ризику, а й прогнозувати зміну якості води залежно від кліматичних сценаріїв, урбанізації чи змін у землекористуванні.

На територіях, де традиційно переважає аграрне або змішане землекористування, екологічний аналіз дозволяє:

1. оцінити стійкість природного середовища до змін;
2. виявити екологічно вразливі ділянки;
3. розробити пропозиції щодо регуляції забудови;
4. підтримати планування зелених зон та екомереж.

Для сіл Перщина і Хмельник, що мають потенціал до зростання завдяки туризму й розвитку житлової інфраструктури, екологічний аналіз є основою для сталого планування. Просторові дані допомагають передбачити конфлікти землекористування, оптимізувати розміщення інженерної інфраструктури та зберегти природні резерви.

У рамках регіональних стратегій, ГІС-технології дозволяють моделювати водозбірні басейни, оцінювати потенціал навантаження на існуючу інфраструктуру та передбачати наслідки впливу людської діяльності. У США, наприклад, інтегровані ГІС-системи використовуються державними органами для управління річковими басейнами, моніторингу забруднень та координації між різними адміністративними рівнями. Подібні системи створюють основу для адаптивного

управління, тобто можливості швидко реагувати на зміни в екологічній ситуації та вносити корективи у плани дій.

1.4 Перспективи розвитку та зарубіжний досвід впровадження ГІС у водному секторі

Світовий досвід демонструє високий потенціал геоінформаційних систем у сфері управління водними ресурсами. У країнах Європейського Союзу, США, Канаді та Японії ГІС широко застосовується для екологічного моніторингу, аналізу гідрографічної структури, оптимізації інфраструктури водоочистки та оцінки екологічних ризиків.

Зокрема, у Німеччині впроваджено національні ГІС-платформи на основі Water Framework Directive, що забезпечують постійний контроль за якістю води у річкових басейнах. У США Агентство з охорони довкілля (EPA) розробило систему WATERS, яка дозволяє відстежувати джерела забруднення, здійснювати картографування водних тіл і контролювати ефективність очисних споруд.

Інтеграція ГІС з хмарними обчисленнями, такими як Google Earth Engine, дозволяє здійснювати оперативний аналіз великих обсягів супутникових зображень. Це особливо корисно в умовах кліматичних змін, які впливають на гідрологічний режим і якість води.

У перспективі важливим напрямом є поєднання ГІС із технологіями штучного інтелекту, що відкриває можливості для автоматичного виявлення змін, аналізу трендів, класифікації екологічного стану територій. Такі рішення вже використовуються в Нідерландах, Південній Кореї та Австралії для адаптивного управління водними системами.

Впровадження подібних підходів у країнах Центрально-Східної Європи, зокрема в Польщі та Україні, дозволяє підвищити ефективність планування водоочисної інфраструктури, забезпечити екологічну безпеку та відповідність європейським екологічним стандартам.

2. АНАЛІЗ ТЕРИТОРІЇ ПЕРЩИНА І ХМЕЛЬНІК (ПОЛЬЩА) ЯК ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Фізико-географічна характеристика території

Аналіз природно-географічних умов є фундаментальним етапом для оцінки потенціалу територій у контексті екологічного планування. Розуміння рельєфу, клімату, гідрографії та ґрунтового покриву дозволяє визначити вразливість регіону до забруднення, зокрема через стічні води.

Фізико-географічні умови є базовими факторами, що визначають просторово-екологічні особливості досліджуваної території. Аналіз природного середовища дозволяє глибше зрозуміти формування водних ресурсів, гідрологічний режим, потенціал самоочищення водойм, а також оцінити ризики їх забруднення. У даному підрозділі розглядаються ключові компоненти фізико-географічного профілю територій Перщина і Хмельнік, розташованих у південно-східній частині Польщі.

Території гмін Перзніца та Хмельнік розташовані в межах Свентокшиського воєводства на південному сході Польщі. Це зона перехідного типу – між Карпатським передгір'ям і Малопольською височиною, яка вирізняється складною геоморфологічною будовою. Тут переважає хвилястий рельєф із висотами 250–400 м над рівнем моря.

Регіон належить до помірно-континентальної кліматичної зони з чітко вираженими сезонами. Кліматичні умови мають значний вплив на динаміку водного стоку. В умовах підвищеної температури та нерівномірного розподілу опадів часто спостерігаються короткочасні паводки, що ускладнює контроль за якістю води в малих водотоках.

Середньорічна температура повітря коливається від +7°C до +9°C, з максимумом у липні (+18°C) і мінімумом у січні (-3°C). Оподи є досить

рівномірними протягом року – близько 650–750 мм, але в літній період можливе збільшення інтенсивності через грозові дощі (Kundzewicz et al., 2020).

Клімат регіону помірно континентальний з середньорічною температурою +8 °С і опадами на рівні 650–750 мм.

Такий клімат зумовлює нерівномірний стік, підвищену ймовірність паводків та потребу у прогнозуванні водного навантаження.

Гідромережа представлена дрібними притоками річки Ніда. Більшість водотоків мають сільськогосподарське навантаження, оскільки перетинають угіддя, де використовуються добрива та пестициди. Це посилює ризики евтрофікації і забруднення.

Ґрунти регіону – бурі лісові й дерново-підзолисті – характеризуються помірною водопроникністю та середньою родючістю, однак уразливі до ерозії. Активне землеробство на схилах сприяє поверхневому змиванню, що транспортує забруднення у водні тіла.

Рослинність регіону представлена мозаїкою лісових масивів, лук та агроценозів. Природна рослинність збереглася лише фрагментарно – переважно у вигляді мішаних лісів із домінуванням дуба, граба, сосни. Частина територій включена до програм охорони природи Natura 2000, що передбачає збереження біорізноманіття та контроль за антропогенним впливом.

Фауна включає типових представників Центральної Європи: зайця-русака, косулю європейську, лисицю, а також численні види птахів і земноводних, які потребують чистих водних біотопів для існування.

Аналіз фізико-географічних характеристик територій Перщина і Хмельник демонструє, що регіон має сприятливі природні умови для формування водних ресурсів, однак відчуває значний тиск з боку сільськогосподарської діяльності. Геоморфологічні особливості та клімат створюють потенціал для водної ерозії та поверхневого стоку забруднюючих речовин. Це зумовлює актуальність

застосування ГІС для моніторингу, аналізу та моделювання екологічного стану досліджуваних територій.

Таким чином, географічні умови регіону мають змішаний потенціал: з одного боку – сприятливий ландшафт і наявність водних ресурсів, з іншого – ризики, пов'язані з нестійкістю до забруднення та інтенсивною аграрною діяльністю. Це зумовлює доцільність застосування ГІС для моніторингу та моделювання екологічного стану території.

2.2 Джерела забруднення та оцінка якості води

Якість води є ключовим показником екологічного стану будь-якої території. Стан водних ресурсів визначається як природними умовами, так і ступенем антропогенного навантаження. На територіях із переважно сільськогосподарським ландшафтом, як у випадку з Перщиною і Хмельником, питома вага дифузного та точкового забруднення води значно зростає. Проблема моніторингу та покращення якості води в цих регіонах є надзвичайно актуальною, з огляду на впровадження норм європейського водного законодавства (зокрема Water Framework Directive 2000/60/EC), яке ставить за мету досягнення доброго екологічного стану усіх водних об'єктів.

Якість водних ресурсів на досліджуваній території формується під впливом як природних чинників, так і людської діяльності. Головними джерелами забруднення вод у гмінах Перзніца та Хмельнік є сільське господарство, побутові стоки та несанкціоноване скидання відходів.

Найбільше навантаження створює аграрна діяльність, пов'язана із застосуванням мінеральних і органічних добрив. Під час інтенсивних опадів або танення снігу хімічні сполуки (нітрати, фосфати) вимиваються з полів і потрапляють у водні об'єкти. Це спричиняє евтрофікацію – надмірний розвиток водоростей, дефіцит кисню у воді та зниження біорізноманіття.

Іншим джерелом забруднення є відсутність централізованої каналізації в багатьох селах регіону. Побутові стоки скидаються у ґрунт або поверхневі води, що призводить до мікробіологічного забруднення, зокрема поширення коліформних бактерій. Це становить небезпеку для здоров'я населення, особливо в умовах рекреаційного використання водою.

Серед додаткових джерел: неправильне поводження з відходами, забруднення з дорожньої інфраструктури (нафтопродукти, важкі метали), а також органічні відходи тваринництва.

Оцінка якості води здійснюється на основі фізико-хімічних і мікробіологічних показників. За даними місцевих екологічних служб, виявлено підвищені концентрації нітратів (до 80 мг/л), фосфатів (до 2 мг/л) і БСК₅ (6–10 мг/л), що перевищує допустимі норми. У зразках з водою поблизу сільських населених пунктів зафіксовано наявність *Escherichia coli*.

Аграрне забруднення

У регіонах з інтенсивним сільським господарством основним джерелом забруднення води є використання добрив та засобів захисту рослин. Поля, оброблені мінеральними та органічними добривами, під час дощів і танення снігу змиваються, внаслідок чого фосфати, нітрати, амоній та інші хімікати потрапляють до водних об'єктів. Водозбірні басейни територій Перщина і Хмельник демонструють типову для аграрних регіонів проблему евтрофікації – надлишкове живлення водою, що стимулює розвиток водоростей, зниження кисню та загибель риби.

За даними GIOS (2022), у межах Свентокшиського воєводства, до якого належать ці території, понад 65% сільськогосподарських угідь вважаються "зонами вразливими до нітратного забруднення", згідно з Nitrates Directive 91/676/EEC. У воді малих річок та струмків зафіксовані перевищення нормативів щодо вмісту NO₃⁻ до 80 мг/л, що перевищує гранично допустимі значення для поверхневих вод (50 мг/л відповідно до WHO, 2017).

Комунально-побутові стоки

В умовах відсутності централізованої системи каналізації, як у більшості сіл регіону, до водойм потрапляють неочищені або недостатньо очищені стічні води з приватних господарств. Часто використовуються вигрібні ями, з яких забруднювачі можуть проникати у ґрунтові води. Особливо небезпечними є фекальні бактерії, зокрема *Escherichia coli* та інші колиформні організми, які вказують на фекальне забруднення.

Згідно з рекомендаціями Європейського агентства з охорони довкілля (ЕЕА, 2021), недотримання санітарних норм поблизу водойм є одним із найбільш поширених порушень у сільських громадах Центральної Європи, що призводить до епідеміологічних ризиків і зниження придатності води для рекреаційних та господарських потреб.

Оцінка якості води проводиться за фізико-хімічними, біологічними та мікробіологічними показниками. На основі доступних звітів державного моніторингу GIOS та польових досліджень, проведених екологічними організаціями (Fundacja Ekologiczna Ziemia Świętokrzyska), можна визначити загальний стан води як "помірний" до "поганого".

Також використовуються біоіндикаторні методи – визначення складу донної фауни та водоростей. Зменшення біорізноманіття та переважання толерантних до забруднення видів (наприклад, *Tubifex tubifex*) підтверджують погіршення екологічного стану водойм.

ГІС-технології використовуються для картографування джерел забруднення, моделювання маршрутів міграції забруднювачів та ідентифікації зон з підвищеним екологічним ризиком. Наприклад, моделі поверхневого стоку дозволяють оцінити, які ділянки є найбільш уразливими до потрапляння агрохімікатів у водну систему.

Аналіз джерел і стану забруднення вод на територіях Перщина і Хмельник виявив значну роль аграрного і побутового навантаження у формуванні водної якості. Надмірне використання добрив, відсутність ефективної каналізаційної

інфраструктури та локальні джерела забруднення створюють екологічні ризики як для населення, так і для екосистем. Впровадження сучасних інструментів – зокрема, ГІС та супутникового моніторингу – є ключем до раннього виявлення проблем і планування заходів з очищення та сталого водокористування.

Таким чином, ситуація з водними ресурсами в регіоні потребує негайного втручання. Використання ГІС для просторового аналізу джерел забруднення є критично важливим для розробки ефективних стратегій очищення та сталого водокористування.

2.3 Просторові дані та методика їх збору

У сучасній практиці екологічного аналізу, особливо в галузі водоочистки та моніторингу водних ресурсів, просторові дані відіграють ключову роль. Застосування геоінформаційних систем (ГІС) базується на якісному та кількісному зборі, обробці й аналізі таких даних. Для регіонів, подібних до Перщини та Хмельника, які характеризуються складною сіткою дрібних річок, значною часткою сільськогосподарських угідь і відсутністю централізованої інфраструктури, збір точних геопросторових даних є критичним для формування екологічно обґрунтованих рішень.

Для проведення якісного екологічного аналізу необхідно використовувати достовірні, багатоаспектні просторові дані, які охоплюють природні, інженерні та соціальні характеристики території. В умовах дослідження гмін Перзніца і Хмельнік джерелами геоданих слугували супутникові знімки, цифрові моделі рельєфу, кадастрові карти, а також результати GPS-спостережень. Основним джерелом для отримання актуальної інформації про ландшафт були знімки з супутників Sentinel-2 і Landsat 8, які надають зображення з роздільною здатністю 10–30 м. Ці знімки дозволяють визначати типи землекористування, площі аграрних ділянок, наявність водойм, забудови, зелених насаджень та змін у рослинному покриві.

Для побудови гідрографічної структури використовувалися цифрові моделі рельєфу (ЦМР), зокрема дані місії SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Ці моделі дають змогу аналізувати ухили, напрямки стоку, виявляти потенційні зони затоплення та концентрації забруднюючих речовин.

Класи землекористування були визначені за даними платформи CORINE Land Cover, яка забезпечує класифікацію територій відповідно до європейських стандартів. Це дозволяє ідентифікувати аграрні зони з високим потенціалом нітратного та фосфатного навантаження.

Векторизація та створення тематичних шарів. На основі супутникових знімків та картографічних даних у середовищі QGIS виконувалась векторизація контурів водойм, річкової мережі, полів, забудови. Кожному шару було надано семантичну інформацію: тип джерела (наприклад, ферма, населений пункт), тип водного об'єкта, потенційний клас забруднення тощо.

Просторовий аналіз

Зібрані просторові дані використовувались для проведення низки просторових операцій: буферизація джерел забруднення, перехресний аналіз шарів, гідрологічне моделювання тощо.

Оцінка точності

Після створення просторової бази даних проводилась перевірка точності картографічних шарів через порівняння з польовими GPS-вимірюваннями та супутниковими знімками. Середнє відхилення не перевищувало 10–15 м, що є прийнятним для масштабів дослідження 1:25 000.

Інтеграція у ГІС-аналіз

Зібрані просторові дані лягли в основу моделювання просторового розповсюдження забруднень. Вони також використовувались для оцінки впливу природних і антропогенних факторів на якість води, побудови тематичних карт, визначення зон пріоритетного втручання.

У дослідженні територій Перщина і Хмельнік були застосовані як глобальні джерела інформації (супутникові знімки, цифрові моделі рельєфу, класи землекористування), так і локальні – GPS-вимірювання та власні польові спостереження. Завдяки цьому вдалося сформуванати багаторівневу геоінформаційну базу, що слугує основою для прийняття рішень у сфері водоочистки та моніторингу навколишнього середовища.

Методика опрацювання включала векторизацію об'єктів у QGIS, створення тематичних шарів, проведення буферного аналізу, перехресне накладання картографічних даних, а також перевірку точності геопросторових даних шляхом порівняння з еталонними джерелами.

Зібрані просторові дані були інтегровані в єдину ГІС-базу, що стала основою для моделювання екологічного стану території та розробки рекомендацій щодо розміщення очисних споруд.

2.4 Програмне забезпечення

У сучасній практиці екологічного просторового аналізу ключову роль відіграє програмне забезпечення, яке забезпечує обробку, моделювання та візуалізацію даних. У межах цього дослідження основними інструментами виступали QGIS, SWAT, HEC-RAS та Google Earth Engine.

В умовах поглибленої екологічної кризи та зростання антропогенного навантаження на природні ресурси, зокрема на водні екосистеми, надзвичайно важливим стає використання інструментів, здатних забезпечити якісний аналіз та моніторинг екологічного стану територій. У цьому контексті геоінформаційні системи (ГІС) та супутнє програмне забезпечення посідають ключове місце. Застосування такого ПЗ дозволяє інтегрувати різноманітні джерела даних (картографічні, супутникові, статистичні), здійснювати їх просторовий аналіз, візуалізацію та формування обґрунтованих рішень щодо охорони довкілля.

Зокрема, у сфері водоочистки ГІС-технології виступають незамінними інструментами при оцінці якості водних ресурсів, виявленні потенційних джерел забруднення, моделюванні стоку, розрахунку навантаження на водозбірні басейни та формуванні стратегій зниження впливу антропогенних чинників. Далі розглянемо найпоширеніші програмні продукти, що використовуються у сфері екологічного аналізу, зокрема у дослідженнях, пов'язаних із територіями Перщина і Хмельник у Польщі.

Одним із найпотужніших і водночас найпоширеніших програмних засобів є **ArcGIS** – комерційне ПЗ, розроблене американською компанією *Esri*. Цей програмний продукт дозволяє працювати з різними типами просторових даних, створювати тематичні карти, проводити буферний аналіз, перехресне просторове зіставлення, обчислення площ забруднення, побудову профілів рельєфу та багато іншого. У контексті водоочистки ArcGIS застосовується для картування стічних вод, виявлення зон підтоплення, створення моделей розподілу забруднювачів у річкових басейнах, а також прогнозування змін в екосистемах у результаті господарської діяльності.

ArcGIS має можливість інтеграції з базами даних, GPS-пристроями та віддаленими сервісами (Web-GIS), що робить його ідеальним для проектів моніторингу в режимі реального часу. У проекті, пов'язаному з Перщиною і Хмельником, ArcGIS може бути використаний для візуалізації джерел забруднення та моделювання поширення шкідливих речовин у поверхневих водах.

QGIS (Quantum GIS) – це безкоштовне ПЗ з відкритим кодом, яке є популярною альтернативою комерційним системам. QGIS підтримує численні формати геоданих (Shapefile, GeoTIFF, KML, GPX тощо) та має велику кількість розширень (плагінів), зокрема для гідрологічного аналізу, екологічного моделювання, створення 3D-карт тощо.

Важливою перевагою QGIS є його гнучкість у поєднанні з іншими програмними модулями – наприклад, GRASS GIS, SAGA GIS, а також зовнішніми

базами даних. У дослідженні екологічного стану території QGIS може слугувати не лише для картографування, але й для аналізу концентрацій шкідливих речовин, моделювання стоку та прогнозування ефективності очисних заходів. Завдяки плагіну **Semi-Automatic Classification Plugin**, дослідник може також працювати з супутниковими знімками Landsat чи Sentinel.

Спеціалізовані системи гідрологічного моделювання

Крім загальних ГІС-платформ, у водному секторі важливу роль відіграють спеціалізовані системи гідрологічного моделювання. До таких відносяться:

- **HEC-HMS (Hydrologic Modeling System)** – використовується для моделювання гідрологічних процесів у водозбірних басейнах, дозволяє визначити водозбір, обсяг стоку, оцінити вплив опадів на водну систему. Може бути корисним при аналізі впливу кліматичних змін на кількість стоку у районах Перщина і Хмельник.

- **HEC-RAS (River Analysis System)** – дозволяє проводити дво- та тривимірне моделювання руслових потоків, обчислювати ймовірність паводків, визначати зони затоплення. У разі виникнення надзвичайних ситуацій, таких як розливи забруднених вод, ця система дозволяє оперативно моделювати сценарії їх поширення.

Ці системи можуть працювати в зв'язці з ArcGIS або QGIS, що дозволяє інтегрувати географічні та гідрологічні дані для побудови повноцінних аналітичних моделей.

SWAT – комплексна оцінка водозбірного басейну

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) – інструмент довгострокового моделювання впливу землекористування, аграрної діяльності та кліматичних змін на водні ресурси. Він дозволяє оцінити, як сільське господарство впливає на якість поверхневих та підземних вод, і які заходи можуть бути ефективними для зменшення негативного впливу. Особливо це важливо для Перщини і Хмельника, де спостерігається інтенсивна аграрна діяльність.

SWAT інтегрується з GIS-платформами для візуалізації результатів моделювання. Це дає змогу не лише будувати картографічні моделі, а й оцінювати просторову динаміку забруднення та прогнозувати наслідки впровадження екологічних заходів.

Google Earth Engine та дистанційний моніторинг

Значну роль у сучасному аналізі довкілля відіграє **Google Earth Engine (GEE)** – хмарна платформа для обробки супутникових знімків та геопросторових даних. GEE дозволяє отримувати інформацію про стан земного покриву, рослинності, вологості ґрунтів, динаміку водойм та інші параметри з високою часовою роздільністю.

У рамках дослідження екологічного стану Перщини та Хмельника Google Earth Engine може бути використаний для довготривалого спостереження змін у використанні земель, аналізу забруднення водозбірних територій, а також для оперативної оцінки ефективності заходів із водоочистки. Доступ до багаторічних супутникових архівів Landsat та Sentinel дозволяє проводити ретроспективний аналіз без потреби у складному технічному забезпеченні.

Використання вищезгаданого програмного забезпечення дозволяє забезпечити комплексний підхід до аналізу екологічного стану регіонів, таких як Перщина і Хмельник. Завдяки поєднанню класичних ГІС-рішень, гідрологічного моделювання та дистанційного зондування землі можна досягти високої точності прогнозів, виявити основні ризики та сформувані ефективні стратегії екологічного управління.

Комбінація зазначених програмних засобів дозволяє досягти високої точності в просторовому аналізі, що є особливо важливим при прийнятті управлінських рішень щодо розміщення очисних споруд. Завдяки такому підходу забезпечується не лише картографування, а й екосистемне моделювання, прогнозування сценаріїв і візуалізація результатів у динаміці.

3. ЗАСТОСУВАННЯ ГІС ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ВОДООЧИСТКИ В РЕГІОНІ ПЕРЩИНА І ХМЕЛЬНІК

3.1 Просторовий аналіз водозбірною басейну

Зростання антропогенного навантаження на довкілля, зокрема водні ресурси, вимагає нових підходів до моніторингу та управління водозабезпеченням. Одним із найефективніших інструментів, що дозволяють дослідити водні об'єкти в контексті їх просторових характеристик, є геоінформаційні системи (ГІС). За допомогою ГІС технологій можна не лише візуалізувати структуру водозбірною басейну, а й виконати глибокий просторовий аналіз, що включає вивчення топографічних умов, напрямків стоку, зон акумуляції води, а також оцінити потенційні ризики забруднення.

У контексті даного дослідження об'єктом вивчення виступає територія регіонів Перщина і Хмельнік (Польща), які характеризуються змішаним рельєфом, сільськогосподарською діяльністю та локалізованими джерелами забруднення. Просторовий аналіз водозбірною басейну дозволяє сформулювати основу для подальшого планування систем водоочистки, визначення вразливих зон, а також оптимального розміщення очисних споруд.

Для проведення просторового аналізу було використано цифрову модель рельєфу (ЦМР), отриману з відкритих джерел супутникових знімків, зокрема SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) з просторовою роздільною здатністю 30 метрів. Обробка даних здійснювалась у середовищі QGIS з використанням модулів GRASS GIS та SAGA GIS.

Основні етапи аналізу включали:

- побудову моделі поверхні та генерацію шару висот;
- створення шару схилів і експозиції схилів;
- визначення напрямків стоку за алгоритмом D8;
- ідентифікацію водозбірних басейнів за допомогою моделі Watershed;

- виявлення зон акумуляції стоку (депресій, понижень).

Додатково було використано топографічні карти, кадастрові дані та геологічні підоснови регіону, які дали змогу уточнити межі басейну, особливості рельєфу та гідрографічної мережі. При оцінці басейну враховувались також кліматичні характеристики території, зокрема середньорічна кількість опадів, частота паводків, що впливають на гідродинамічні процеси.

У результаті просторового аналізу встановлено, що територія дослідження має значну складність у плані рельєфу. У межах водозбірного басейну спостерігаються як ділянки з незначним ухилом (менше 5°), так і круті схили (понад 15°), які відіграють ключову роль у формуванні поверхневого стоку. Значну частину території займають сільськогосподарські землі, що створюють умови для підвищеного навантаження на гідросферу внаслідок змивання добрив і пестицидів у поверхневі води.

Гідрографічна мережа представлена кількома малими водотоками, які в умовах інтенсивного сільського господарства є вразливими до дифузного забруднення. Була визначена межа водозбору основної річки, що протікає через села Перщина і Хмельник, а також виділено підбасейни, які акумулюють основні потоки стічних вод. У пониженнях рельєфу утворюються тимчасові водотоки та малі болота, що вказує на можливість затримки забруднень у цих зонах.

На основі отриманих просторових даних були визначені зони потенційного ризику забруднення. До них належать:

- ділянки з великим нахилом рельєфу, що сприяють інтенсивному стоку;
- землі з активним використанням мінеральних добрив;
- ділянки поблизу населених пунктів, де відсутні або функціонують з порушеннями системи локального очищення;
- території, прилеглі до малих річок, де можуть формуватися ділянки вторинного забруднення.

Зокрема, східна частина території Перщини відзначається значним навантаженням через близькість до приватних господарств та несанкціонованих місць скиду. У Хмельнику помітним є вплив мікроелементного складу ґрунтів на якість поверхневих вод у паводковий період.

Досвід країн Європейського Союзу свідчить про важливість високоточного просторового аналізу при формуванні політики у сфері водоочистки. Наприклад, дослідження, проведене в Німеччині (Müller et al., 2021), доводить ефективність впровадження басейнового підходу до управління водними ресурсами за допомогою ГІС і супутникового моніторингу. В Австрії реалізовано проекти, що дозволяють ідентифікувати забруднені ділянки в режимі реального часу з використанням ІоТ та ГІС-інтегрованих сенсорів (Schmidt et al., 2020).

Отже, методика, застосована в межах даного дослідження, повністю узгоджується з сучасними європейськими стандартами просторового аналізу і може бути адаптована для покращення стану водного середовища регіону Перщина і Хмельник.

Проведений просторовий аналіз водозбірному басейну засвідчив наявність ряду екологічних викликів, пов'язаних зі структурою рельєфу, сільськогосподарською діяльністю та недосконалістю інфраструктури водоочистки. Використання геоінформаційних систем дозволило ідентифікувати вразливі зони, що створює основу для прийняття рішень щодо запобігання забрудненню вод. Отримані результати будуть використані на наступних етапах роботи – при моделюванні цифрової гідрографічної мережі та розробці пропозицій щодо оптимізації систем очищення.

3.2 Побудова цифрової моделі рельєфу та гідрографічної мережі

Цифрова модель рельєфу (ЦМР) виступає основою для проведення просторового аналізу в екологічних дослідженнях, особливо в галузі управління водними ресурсами. Вона дозволяє імітувати реальні фізичні умови території,

зокрема ухили, напрямки стоку, гідрографічну структуру, межі басейнів, що є критичними для ефективної роботи систем водоочистки. У контексті регіонів Перщина і Хмельнік (Польща), які мають складну гідрологічну структуру, побудова ЦМР сприяє виявленню зон з підвищеним ризиком забруднення, прогнозуванню впливу кліматичних змін та оптимізації інфраструктури водопостачання.

Вихідні дані та методологія

Для створення цифрової моделі рельєфу використовувалися наступні джерела:

- **SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)** – цифрова модель з просторовою роздільною здатністю 30 м;
- **Copernicus DEM** – європейська модель рельєфу з покращеними даними висот (є актуальною для території Польщі);
- **Sentinel-1 та Sentinel-2** – супутникові знімки для актуалізації рельєфу та виявлення змін у навколишньому середовищі;
- **Geoportal.gov.pl** – польська національна платформа з відкритими геоданими.

Обробка даних проводилась у середовищі **QGIS** з використанням розширень **GRASS GIS, SAGA GIS** та **TauDEM**. Всі етапи було виконано відповідно до стандартів геоінформаційного аналізу:

1. **Підготовка DEM:** обрізка по межах досліджуваної території, вирівнювання висотних аномалій, створення безперервної поверхні.
2. **Гідрологічна корекція:** "заповнення западин" (fill sinks), виявлення точок початку потоків, розрахунок напрямків та накопичення стоку.
3. **Виділення басейнів:** автоматична сегментація поверхні за допомогою алгоритмів catchment delineation.
4. **Генерація гідромережі:** побудова водотоків за допомогою алгоритму flow accumulation, з фільтрацією фонових шумів.

Аналіз отриманих результатів

Побудована ЦМР дозволила чітко окреслити рельєф місцевості та визначити структуру поверхневого стоку. Було виявлено кілька основних водозбірних ділянок, що мають прямий вплив на екологічний стан водойм регіону. Зокрема, території з високим коефіцієнтом ухилу виявилися більш вразливими до ерозійних процесів та змиву забруднюючих речовин, особливо в сільськогосподарських зонах.

Гідрографічна мережа, отримана в результаті моделювання, включає як постійні водотоки, так і тимчасові стоки, які активізуються в період сильних опадів. Просторовий аналіз дозволив також ідентифікувати ділянки з потенційним скупченням поверхневого забруднення – так звані "**гарячі точки**" (hotspots), які потребують особливого моніторингу та технічних заходів очищення.

Переваги геоінформаційного підходу

Застосування ГІС для побудови ЦМР має низку переваг:

- **Висока точність:** цифрові моделі дозволяють враховувати навіть мінімальні зміни у рельєфі.
- **Актуальність:** використання супутникових даних дозволяє оперативну оновлювати модель у разі змін.
- **Масштабованість:** можливість роботи як на рівні малих водозборів, так і на регіональному рівні.
- **Інтеграція з іншими шарами:** поєднання з даними про ґрунти, рослинність, інфраструктуру.

Зарубіжний досвід

Дослідження, проведені у Швеції, Нідерландах та Німеччині, підтверджують ефективність використання цифрових моделей рельєфу в управлінні водними ресурсами. Наприклад, за даними дослідження **Sikorska-Senoner et al. (2020)**, побудова високоточної DEM у басейні річки Aar (Швейцарія) дозволила спрогнозувати паводки з точністю до 95%. В Італії модель MERIT DEM

застосовують для визначення зон забруднення нітратами у сільськогосподарських регіонах.

Крім того, **Li et al. (2018)** у своєму аналізі демонструють, що поєднання DEM з даними про землекористування значно підвищує точність прогнозування дифузного забруднення в аграрних регіонах.

Цифрова модель рельєфу, створена для території Перщина і Хмельник, слугує основою для ефективного просторового аналізу в сфері водоочистки. Вона дозволяє моделювати природні гідрологічні процеси, оцінювати ризики забруднення, прогнозувати наслідки екстремальних погодних подій та розробляти ефективні стратегії екологічного управління. Побудова гідрографічної мережі є невід'ємним етапом цього процесу, оскільки забезпечує розуміння структури водообміну в межах аналізованої території.

3.3 Визначення зон підвищеного ризику забруднення

Забезпечення екологічної безпеки водних ресурсів є ключовим пріоритетом сталого розвитку будь-якої території. Для ефективного управління водними екосистемами необхідно своєчасно виявляти території, що мають підвищений ризик забруднення. Геоінформаційні системи (ГІС) виступають потужним інструментом для просторового аналізу таких зон, оскільки дозволяють інтегрувати дані з різних джерел, виявляти просторові закономірності, моделювати сценарії забруднення та планувати відповідні заходи щодо запобігання екологічним загрозам.

Методичні основи ідентифікації ризикових зон

Для визначення зон ризику у водозбірних басейнах Перщини й Хмельника були застосовані сучасні методи просторового аналізу на основі багат шарових тематичних карт. Основу аналізу становлять такі групи даних:

- топографічні та гідрографічні дані;
- цифрова модель рельєфу (ЦМР);

- земельне покриття та землекористування;
- наявність антропогенних джерел забруднення (промислові об'єкти, сільське господарство, очисні споруди);
- кліматичні фактори (кількість опадів, температура, випаровування).

На основі цих даних проводиться просторове зважування факторів із застосуванням методу **Weighted Overlay** у середовищі ArcGIS або QGIS. Кожному чиннику присвоюється ваговий коефіцієнт відповідно до його впливу на ризик забруднення. Наприклад, близькість до джерел забруднення, тип ґрунтів і ухил місцевості значною мірою визначають потенціал забруднення поверхневих і підземних вод.

Картографування зон ризику

Картування зон ризику – це процес, під час якого визначаються та відображаються на карті місця, де існує висока ймовірність небезпечних або несприятливих подій.

Мета картування зон ризику:

Визначити території, які найбільше піддаються ризику:

Це допомагає зосередитися на тих сферах, де ризик є найбільшим і де необхідно вжити заходів для його зменшення.

Оцінка та аналіз ризиків:

Картування дозволяє оцінити масштаби ризику в різних зонах і виявити потенційні причини.

Розробка стратегій та планування заходів:

На основі картування ризиків можна розробити конкретні заходи для зменшення або усунення негативних наслідків.

Визначення стратегічних напрямків:

Картування може допомогти підприємствам або організаціям визначити області, в яких ризик є низьким, і зосередитися на їх розвитку, а також визначити області, в яких ризик є високим, і вжити заходів для його зменшення.

Управління кризовими ситуаціями:

Наявність карти ризиків допомагає швидше та ефективніше реагувати на несприятливі події та зменшувати їх наслідки.

Розміщення зон ризику на карті та їх класифікація за рівнем небезпеки.

У сфері управління територіями:

На основі зібраної інформації було створено карту ризику, де виділено декілька зон:

- **Зона високого ризику** – території поблизу тваринницьких ферм, полів із високим використанням добрив, недостатньо ефективних очисних споруд.
- **Зона середнього ризику** – ділянки поблизу малих населених пунктів із помірним навантаженням.
- **Зона низького ризику** – лісові та природоохоронні території з незначним впливом антропогенних факторів.

Результати моделювання підтверджують, що зони з крутим ухилом, низькою водопроникністю ґрунтів і високою щільністю забудови виявляють найбільший ризик для водних об'єктів.

У міжнародній практиці широко застосовуються підходи до моделювання зон ризику на основі **DRASTIC-методу** та **SWAT-моделі**. Наприклад, у дослідженні *Yidana et al. (2021)* було успішно використано методологію інтеграції геостатистики та гідрологічного моделювання для оцінки вразливості водоносних горизонтів до забруднення в Західній Африці. Подібні підходи є перспективними для регіонів Європи, зокрема для Польщі.

Інше дослідження (*Shrestha et al., 2020*) вказує на ефективність використання машинного навчання в ГІС для автоматичного класифікування зон забруднення, що значно підвищує точність картографування.

Визначення зон ризику має прикладне значення для управління якістю води в регіоні. Отримані карти можуть бути використані для:

- пріоритезації моніторингу водних об'єктів;

- оптимізації розміщення очисних споруд;
- оцінки ефективності впроваджених природоохоронних заходів;
- розробки місцевих екологічних програм.

Застосування ГІС для визначення зон підвищеного ризику забруднення в регіоні Перщина і Хмельник дозволяє підвищити ефективність прийняття екологічних рішень. Просторовий аналіз і візуалізація даних створюють основу для запобігання погіршенню стану водних ресурсів і підвищення екологічної безпеки. Із врахуванням досвіду зарубіжних країн і можливостей сучасних інструментів ГІС доцільно впроваджувати подібні підходи у національні системи моніторингу та управління водними ресурсами.

Використання геоінформаційного підходу виявилось ефективним для просторової оцінки забруднення, що дозволяє приймати обґрунтовані управлінські рішення в регіональному масштабі.

З урахуванням отриманих даних, доцільним є запровадження:

- буферних смуг уздовж водотоків;
- зон обмеженого використання хімікатів;
- локальних систем збору та очищення дощових стоків;
- інтеграції системи раннього попередження на основі ГІС та метеорологічних прогнозів.

3.4 Картографічне моделювання та оцінка ефективності заходів очищення

Сучасні екологічні виклики, пов'язані із зниженням якості водних ресурсів, зумовлюють необхідність використання інноваційних інструментів для оцінки та вдосконалення заходів із водоочистки. Одним із найбільш перспективних підходів у цьому контексті є застосування ГІС для картографічного моделювання.

Основи картографічного моделювання у сфері водоочистки

Картографічне моделювання у водному секторі ґрунтується на інтеграції даних про:

- стан поверхневих та підземних вод;
- джерела забруднення (точкові та дифузні);
- природні та антропогенні чинники, що впливають на якість води;
- розміщення існуючих та запланованих очисних споруд;
- результати моніторингу якості води у ключових локаціях.

У програмному середовищі QGIS або ArcGIS формується багат шарова структура карти, де кожен шар відображає окремий аспект екосистеми – гідрографічну сітку, рельєф, землекористування, рівень забруднення, стан інфраструктури. Об'єднання цих даних у єдиний аналітичний простір дозволяє проводити просторовий аналіз, моделювати сценарії розвитку ситуації та оцінювати ефективність реалізованих заходів.

Аналіз заходів із покращення якості води

У межах дослідження територій Перщини й Хмельника було змодельовано вплив таких заходів на якість води:

1. **Модернізація очисних споруд** – заміна застарілих технологій очищення на біологічні реактори з мембранною фільтрацією дозволяє знизити вміст органічних забруднювачів на 65–85% у межах 6 місяців після впровадження.

2. **Створення буферних зон уздовж водотоків** – зелені смуги з дерев і чагарників на відстані 5–15 м від русла зменшують дифузне забруднення від сільського господарства, особливо нітратами і фосфатами.

3. **Контроль ерозійних процесів** – терасування схилів і посадка багаторічної рослинності дають змогу обмежити надходження завислих речовин до водойм.

4. **Впровадження агроекологічних практик** – включаючи мінімізацію використання пестицидів, точкове внесення добрив та інтегроване управління земельними ресурсами.

Картографічне моделювання показало, що поєднання цих заходів дозволяє значно покращити показники якості води за параметрами хімічного та біологічного стану.

У межах практичної частини дослідження було розроблено серію тематичних карт:

- карта вихідного стану забруднення;
- карта впроваджених заходів (розташування споруд, буферних смуг тощо);
- карта прогнозованого покращення екологічного стану.

Картографічні шари дозволяють візуально оцінити, як змінюється ситуація в межах басейну після реалізації конкретних проєктів. Такі карти можуть бути корисні як для фахівців, так і для громадськості, сприяючи прозорості екологічного управління.

У країнах ЄС, зокрема в Нідерландах, Німеччині та Франції, картографічне моделювання є невід'ємною складовою водного менеджменту. Наприклад, згідно з дослідженням *Melesse et al. (2019)*, ГІС і дистанційне зондування використовуються для оцінки впливу кліматичних змін на ефективність очисних систем у басейнах річок Рейн і Луара.

В іншому дослідженні *Panagopoulos et al. (2020)* показано, що поєднання SWAT-моделі та ГІС дозволяє оцінити довгострокову ефективність комплексного підходу до зменшення забруднення в аграрних регіонах Греції.

Картографічне моделювання є потужним аналітичним інструментом, який дає змогу інтегрувати екологічні, інфраструктурні й соціальні дані в єдину систему управління якістю води. У регіоні Перщина і Хмельник застосування цього підходу дозволило визначити оптимальні шляхи для покращення ситуації з водопостачанням та очищенням. Досвід зарубіжних країн підтверджує ефективність використання ГІС у плануванні й оцінці природоохоронних заходів, що робить доцільним широке впровадження цієї технології і в Україні.

4. КАРТОГРАФІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЄКТІВ ЗЕМЛЕУСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ ПІД БУДІВНИЦТВО ОЧИСНИХ СПОРУД У ГМІНАХ ПЕРЗНІЦА ТА ХМЕЛЬНІК РЕСПУБЛІКА ПОЛЬЩА

4.1 Просторовий аналіз

Просторовий аналіз є ключовим компонентом геоінформаційного дослідження, що дозволяє інтегрувати, оцінити та візуалізувати взаємозв'язки між різними географічними характеристиками об'єкта. У контексті вибору ділянок для розміщення очисних споруд, просторовий аналіз включає оцінку ландшафту, інфраструктури, гідрології та екологічних обмежень із застосуванням методів векторно-растрової обробки в QGIS.

Для проведення дослідження було використано широкий спектр матеріалів та методів. Основними джерелами даних були геопросторові дані, отримані з відкритих джерел (OpenStreetMap (OSM) , Європейський портал даних , геопортал INSPIRE) та створені шляхом обробки в QGIS.

Також запропоновано інноваційну систему показників, засновану на аналізі даних дистанційного зондування та ГІС. Її мета – визначити оптимальні місця для розміщення очисних споруд у Пномпені. Це допомагає уникнути погіршення стану водного середовища та зменшити ризики для здоров'я людей.

Використовується безліч досліджень які базуються на гідрологічному аналізі з використанням цифрової моделі рельєфу (ЦМР), що дозволило визначити межі водозбірних басейнів та дренажної мережі. Були визначені ділянки, придатні для встановлення дренажних систем, з урахуванням ухилу місцевості, видів землекористування та близькості до водойм. Розроблені інноваційні методи, включаючи поєднання аналізу ГІС та вимірювання опору постійного струму (DCR), для виявлення витоків стічних вод у напівпустельних міських районах. Ці дані мають вирішальне значення для подальшого планування та управління водними

ресурсами. Питання впливу небезпечних геологічних процесів на навколишнє середовище та їх врахування в межах певних кадастрових зон було досліджено .

Розташування очисних споруд є ключовим елементом їх ефективності. Цей процес вимагає врахування таких факторів, як щільність населення, наявність води та транспортна інфраструктура. Для проведення просторового аналізу цих факторів було використано ГІС. Згідно з матеріалами конференції GeoTerrace-2024 , сучасні технології, такі як ГІС, відкривають нові можливості для просторового аналізу та прийняття рішень у територіальному плануванні. Аналіз враховував рельєф місцевості, водні ресурси, транспортну інфраструктуру та соціально-економічні фактори.

ГІС дозволяє об'єднувати та аналізувати різні просторові дані, що забезпечує точність і обґрунтованість рішень. Це дослідження має на меті визначити оптимальні місця для будівництва очисних споруд у громадах Пержніца та Хмільник, Республіка Польща, з використанням географічних інформаційних систем. Цей процес є багатофакторним і враховує географічні, екологічні, економічні та соціальні аспекти.

Для досягнення цієї мети було виконано наступні завдання.

Збір та аналіз просторових даних: визначення меж досліджуваних територій; аналіз рельєфу з урахуванням ухилів, висот та природних бар'єрів; збір інформації про водні ресурси (річки, озера, ставки тощо); вивчення транспортної інфраструктури (доріг, залізниць, основних маршрутів); аналіз існуючих будівель та їх впливу на вибір місця розташування.

Визначення критеріїв вибору ділянки: вибір ділянок з мінімальним ухилом для забезпечення стабільності споруд; встановлення безпечної відстані від водойм для уникнення забруднення; оцінка наявності транспортної інфраструктури для будівництва та експлуатації; врахування соціальних факторів, таких як відстань від житлових районів.

Просторовий аналіз: інтеграція та обробка даних за допомогою інструментів ГІС; створення тематичних карт, що відображають основні аспекти територій; виконання запитів для визначення ділянок, що відповідають встановленим критеріям.

Оцінка результатів: порівняння варіантів за критеріями; аналіз ризиків і переваг кожного із запропонованих місць розташування. (Рис. 1)

Методологія дослідження поділяється на три ключові етапи :

- 1) попередня обробка картографічних даних;
- 2) просторовий аналіз і створення моделей на основі даних SRTM;
- 3) інтерпретація результатів і формування висновків.

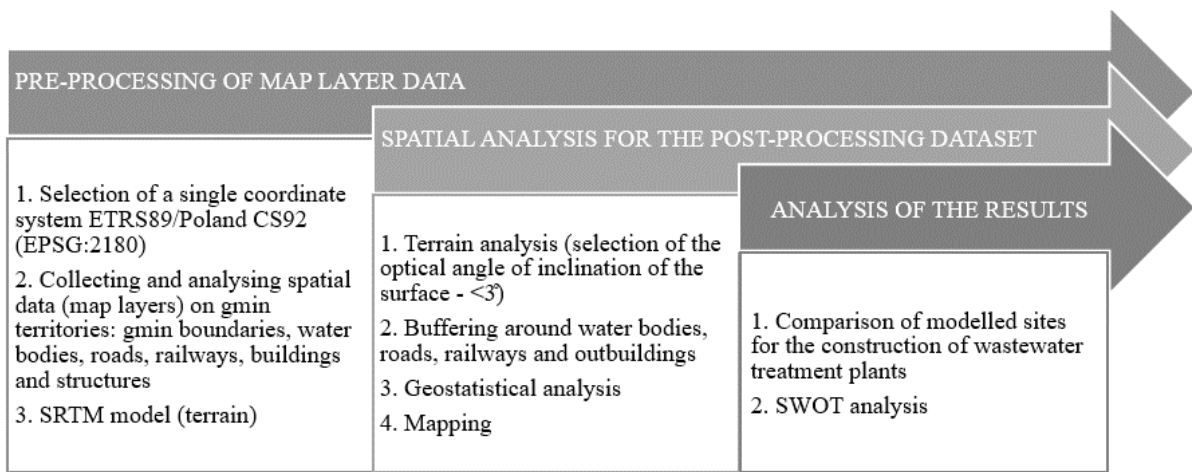


Рисунок 1. Структура методології

У дослідженні використовувались основні інструменти просторової обробки QGIS:

Vector Analysis – для обчислення площ, периметрів та факторів форми ділянок;

Raster Calculator – для комбінування бінарних масок придатності;

Spatial Join – для додавання характеристик ділянок (висота, ухил, тип землекористування);

Intersect, Difference, Union – для поєднання і виключення просторових об'єктів.

Ці інструменти дозволили сформувати набір полігонів, що відповідають усім критеріям придатності, та проаналізувати їх конфігурацію, розташування і взаємозв'язок із елементами середовища.

Кожна ділянка, що залишилась після просторової фільтрації, була оцінена за кількома параметрами:

1. **Площа:** \$area (м²);
2. **Периметр:** \$perimeter;
3. **Фактор форми:** обчислений як співвідношення площі до периметра (індекс компактності).

Це дозволило відкинути занадто витягнуті або фрагментовані ділянки, що є складними для інженерного проектування. Як показує практика, оптимальними є ділянки близькі за формою до квадрата або прямокутника, із низьким співвідношенням периметр/площа.

За допомогою **Spatial Query** було проведено оцінку близькості кожної ділянки до:

- джерел водопостачання (для забору/скиду очищеної води);
- доріг (для логістичної доступності);
- забудованих територій (для оцінки потенційного конфлікту);
- рельєфних бар'єрів (гір, ярів).

4.2 Формування бази геоданих (вибірка, зокрема опрацювання ЦМР)

Забезпечення раціонального використання природних ресурсів та мінімізація впливу на навколишнє середовище є одними з головних викликів сучасного просторового планування. Урбанізація, зростання населення та зміна клімату створюють нові виклики в галузі управління навколишнім середовищем, особливо в контексті будівництва очисних споруд. Важливість розміщення таких споруд

зумовлена необхідністю забезпечення ефективної очистки стічних вод та збереження водних екосистем.

Просторове планування вимагає врахування складного комплексу природних, соціальних та технічних факторів, що ускладнює прийняття оптимальних рішень. Використання ГІС дозволяє інтегрувати різні просторові дані, аналізувати та візуалізувати їх, що значно підвищує точність і обґрунтованість рішень.

Актуальність ГІС у цій сфері зумовлена не тільки їхньою здатністю обробляти великі обсяги даних, але й можливістю проведення багатокритеріального аналізу. Це забезпечує врахування таких аспектів, як особливості рельєфу, доступність транспортної інфраструктури, вплив на навколишнє середовище та соціально-економічні наслідки.

За даними Національного статистичного управління Польщі, у 2023 році населення країни становило приблизно 37,6 мільйона осіб, причому смертність перевищувала народжуваність, що призвело до скорочення населення [1], а прогнози вказують на подальше скорочення населення до 30,9 мільйона осіб у 2060 році [2]. Ці демографічні зміни впливають на структуру та функціонування урбанізованих територій, що, в свою чергу, вимагає адаптації інфраструктури, включаючи системи очищення стічних вод.

Формування повноцінної бази геоданих є основою для будь-якого просторового дослідження, що має на меті аналітичну оцінку території. У контексті екологічних проєктів, зокрема пов'язаних з оптимізацією розміщення очисних споруд, якісна підготовка геопросторової інформації відіграє ключову роль. Це дає змогу побудувати логічну структуру територіального аналізу, інтегрувати різноманітні тематичні шари та створити передумови для подальших кроків: гідрологічного моделювання, просторової фільтрації та оцінки екологічного ризику.

Дослідження проводилося на території двох громад у Польщі (Рис. 2) – Пержніца та Хмільник, розташованих у Кельцеському повіті, регіоні, що має важливе екологічне та соціально-економічне значення.

Обидва муніципалітети розташовані у Свентокшиському воєводстві (Південно-Східна Польща) та характеризуються значною часткою сільськогосподарських земель, наявністю населених пунктів, що не повністю охоплені централізованим водовідведенням, а також перспективами розширення екологічної інфраструктури.

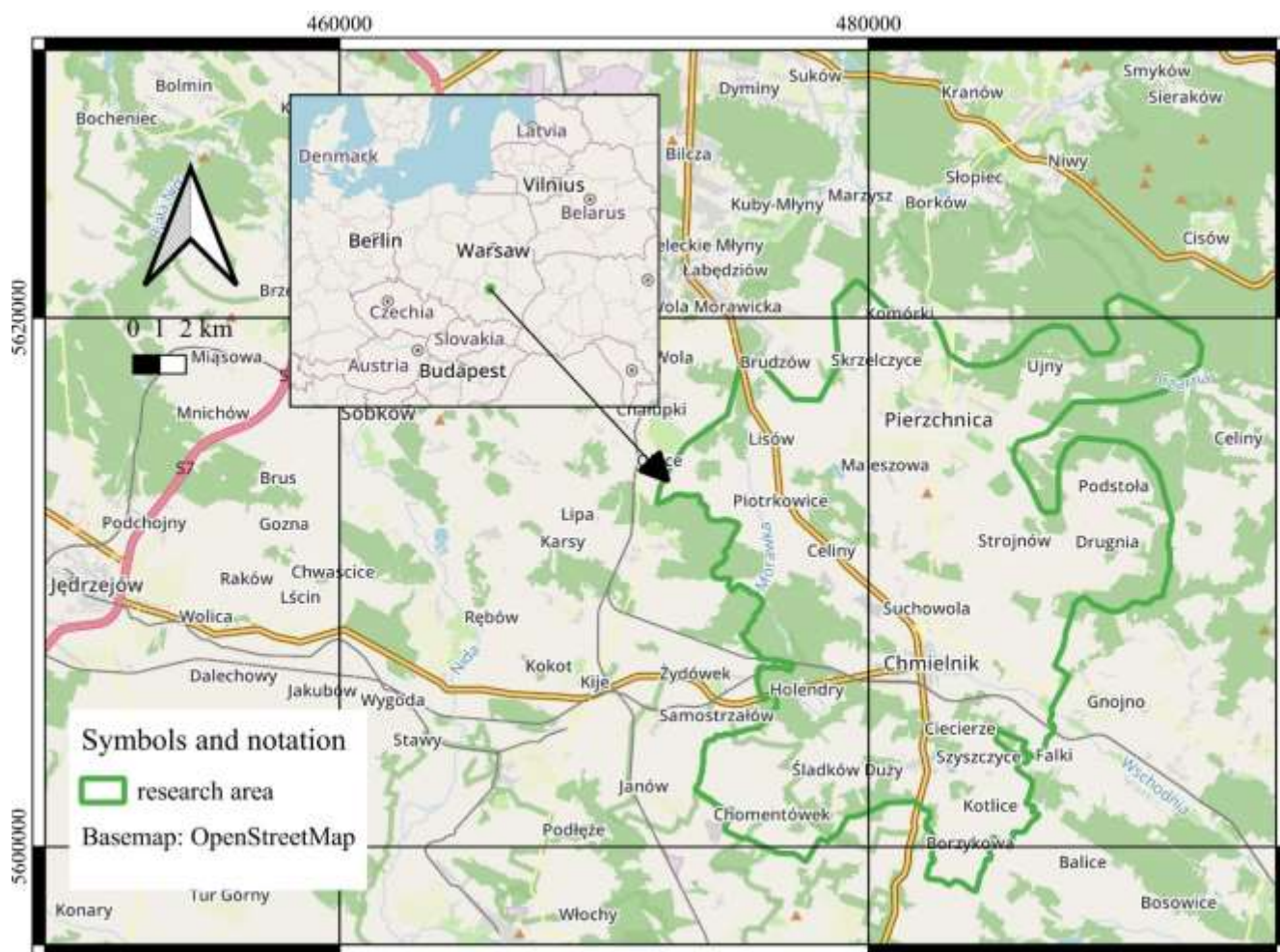


Рисунок 2. Територія дослідження

Основною причиною вибору цих гмін було необхідність поліпшення управління стічними водами через зростаюче навантаження на місцеву

інфраструктуру та ризик забруднення води, а також модернізація систем очищення води.

Окрім гмін Пержніца та Хмільник, аналіз було поширено на сусідні райони, які включають:

1) охоронювані території – території з обмеженим втручанням людини, які є важливими для збереження екосистем;

2) транспортну інфраструктуру – основні дороги, залізничні вузли та транспортні коридори, що забезпечують логістичні переваги;

3) водойми та гідрографічні об'єкти – річки, озера та інші водні ресурси, що впливають на вибір місця розташування очисних споруд через необхідність дотримання екологічних стандартів.

Інтегрований підхід дозволив нам врахувати такі аспекти, як соціальний вплив, доступ до ресурсів та охорона навколишнього середовища. Наприклад, визначення безпечної відстані від водойм (відповідно до нормативних вимог) було ключовим фактором для виключення деяких територій з подальшого аналізу. Врахування транспортної інфраструктури дозволило нам визначити території, які є найбільш зручними для будівництва та експлуатації з точки зору логістики. Таке розширення території дослідження допомогло створити більш точний і обґрунтований перелік потенційних місць для будівництва очисних споруд та врахувати соціально-економічний контекст.

Після відкриття QGIS було створено новий проєкт у системі координат ETRS89 / Poland CS92 (EPSG:2180) – державному стандарті координат у Польщі. Це забезпечило сумісність векторних і растрових шарів без необхідності додаткової трансформації.

До проєкту підключено такі основні шари:

- **адміністративні межі** – векторний шар GMINA;
- **транспортна інфраструктура** – дороги державного і місцевого значення;

- **водні об'єкти** – річки, струмки, водосховища (векторні та растрові формати);
- **землекористування** – CORINE Land Cover з детальними класами (луки, орні землі, забудовані території);
- **цифрова модель рельєфу (DEM)** – дані SRTM та Copernicus DEM у форматі GeoTIFF.

Для більш точного аналізу використовувались супутникові знімки Sentinel-2, доступні через плагін Semi-Automatic Classification Plugin. Це дозволяло звіряти інформацію та виявляти недавні зміни в землекористуванні.

Виділення досліджуваної території

Із загального шару адміністративного поділу Польщі було відібрано дві гміни за допомогою SQL-фільтра:

"GMINA" = 'Chmielnik' OR "GMINA" = 'Pierzchnica'

Після фільтрації за атрибутивними даними виконано обрізання всіх інших тематичних шарів (води, дороги, землі) відповідно до нових меж за допомогою функції Clip. Це дозволило уникнути надлишкової інформації та зосередитись лише на цільовій території.

Опрацювання цифрової моделі рельєфу

DEM було завантажено в QGIS, трансформовано до системи координат PUWG1992 та обрізано відповідно до меж території. За допомогою модулів **GDAL** та Raster Analysis було побудовано:

- **карта ухилів (slope)** – визначено ділянки з нахилом менше 3°;
- **карта експозицій (aspect)** – орієнтація схилів відносно сторін світу;
- **Hillshade** – тіньова модель для візуалізації рельєфу;
- **рівні висоти** – за допомогою гістограми визначено, що придатними є висоти від 200 до 300 м.

Логічні умови для відбору реалізовані через Raster Calculator:

("slope@1" <= 3) AND ("elevation@1" >= 200 AND "elevation@1" <= 300)

Результати були збережені у вигляді бінарного шару придатності, де 1 = придатна зона, 0 = ні. Після цього растровий шар було конвертовано у вектор за допомогою Polygonize (raster to vector).

Структура даних та просторове узгодження

Для забезпечення коректного функціонування подальших етапів аналізу, усі шари були:

1. приведені до однакової проекції;
2. гармонізовані за розміром пікселя (для растрових шарів);
3. атрибутивно очищені (видалення зайвих полів);
4. збережені в єдиному каталозі проекту.

Всі атрибути були дубльовані англійською мовою для забезпечення можливості двомовної аналітики (Рис. 3) у разі необхідності інтеграції з європейськими платформами.

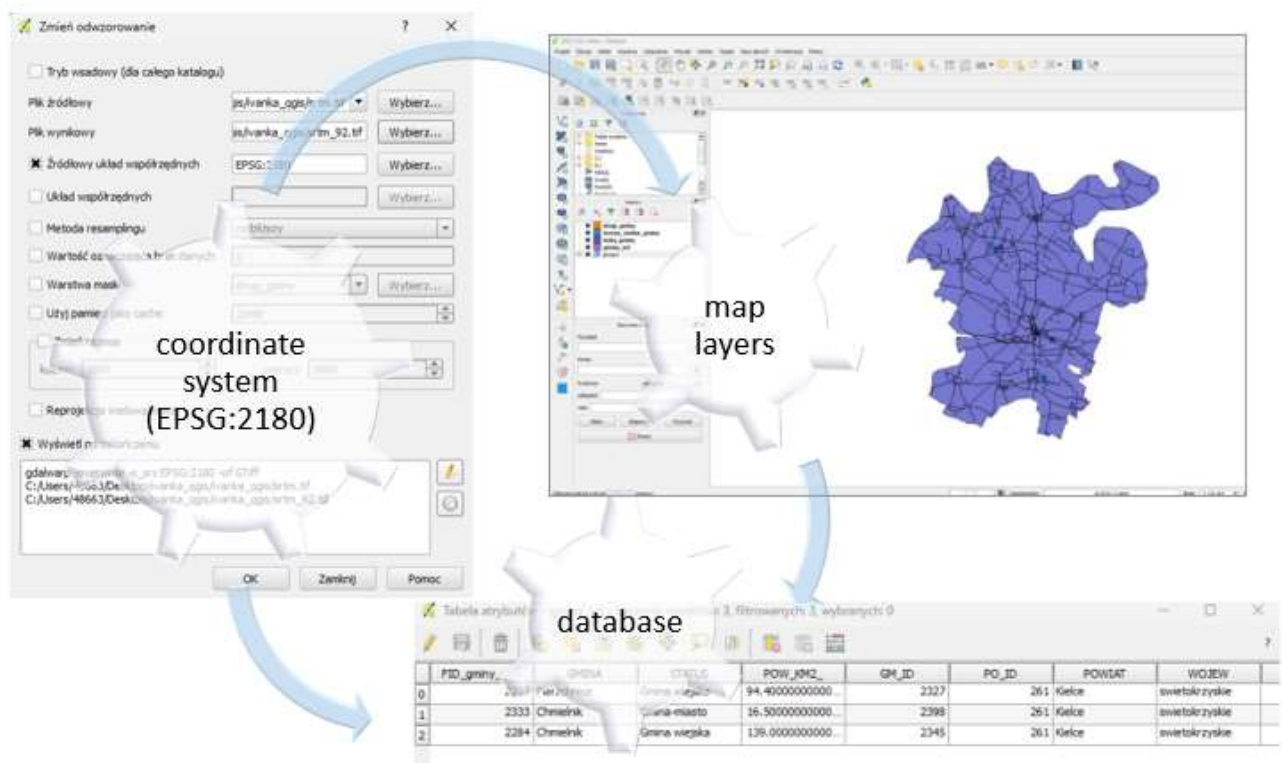


Рисунок 3. Попередня обробка

Формування бази геоданих є необхідною умовою для просторового аналізу, що дозволяє забезпечити узгодженість, структурованість та доступність інформації. Виконана обробка цифрової моделі рельєфу та підготовка всіх тематичних шарів створює основу для побудови комплексної моделі вибору ділянки для водоочисних споруд. Підхід, використаний у цьому дослідженні, відповідає міжнародним практикам та дозволяє масштабувати методику на інші регіони.

4.3 Вибір параметрів (умов) щодо розташування водоочисних споруд та побудова карт

Процес вибору придатної території для розміщення очисних споруд повинен ґрунтуватися на чітко визначених критеріях, що враховують як фізико-географічні, так і соціально-економічні умови. Головна мета полягає в тому, щоб визначити ділянки, які одночасно відповідають санітарним, інженерно-будівельним і екологічним вимогам, а також є доступними з точки зору землекористування та інфраструктури. Застосування геоінформаційних систем (ГІС) дозволяє реалізувати цей підхід системно та ефективно.

У межах дослідження було сформовано перелік базових критеріїв, які мають вирішальне значення для відбору оптимальних ділянок під будівництво очисних споруд на території гмін Пержниця та Хмельнік:

1. Ухил місцевості – не повинен перевищувати 3°, щоб забезпечити стабільну роботу інженерних споруд і мінімізувати ризики ерозії.
2. Висота над рівнем моря – у межах 200–300 м н.р.м. як оптимальна для енергетичної ефективності обслуговування.
3. Тип землекористування – допускається лише на територіях сільськогосподарського призначення, відкритих територіях або пустирях, де будівництво не суперечить чинному землекористуванню.

4. Віддаленість від житлових забудов – не менше 200 м, що відповідає санітарно-захисним нормам.

5. Площа ділянки – не менше 1,5 га, що дозволяє розмістити всі необхідні компоненти інфраструктури.

6. Відсутність перетину з охоронними, лісовими чи водоохоронними зонами.

Ці умови реалізовані у вигляді окремих тематичних шарів, які дозволяють здійснити багатокритеріальне просторове фільтрування (Рис. 4)



Рисунок 4. Багатокритеріальний аналіз рішень

Технічна реалізація параметрів у QGIS

- Ухил

Для визначення ділянок із допустимим ухилом було використано шар, створений на основі цифрової моделі рельєфу. За допомогою інструменту Raster Calculator виділено ділянки з ухилом $\leq 3^\circ$:

$$('slope@1' <= 3)$$

Отриманий растровий шар перетворено у векторний формат для подальшої інтеграції з іншими критеріями (Polygonize).

- Висота

Аналогічно, з шару висот (elevation) виділено зони у межах 200–300 м. Це забезпечує належний гідродинамічний режим і мінімізує витрати на насосні станції.

("elevation@1" >= 200) AND ("elevation@1" <= 300)

- Землекористування

Із шару CORINE Land Cover були відібрані категорії:

орні землі;

відкриті території без специфічного використання;

сільськогосподарські угіддя.

Ці типи землекористування поєднані в один векторний шар за допомогою функції Merge Selected Features, після чого застосовано обрізання (Clip) за межами досліджуваної території.

Для забезпечення санітарних норм навколо житлових зон створено буферні зони шириною 200 м за допомогою інструменту Buffer. Вони були відняті від придатних ділянок за допомогою функції Difference, що дозволило виключити конфліктні території з аналізу.

Площа

Для всіх об'єднаних полігонів (що відповідають критеріям) було розраховано площу за допомогою Field Calculator. Ділянки з площею менше 1,5 га виключено з подальшого аналізу:

\$area >= 15000

Після формування окремих масок кожен критерій було поєднано у фінальну багатофакторну модель. Для цього використано послідовне застосування Intersect та Union, що дозволило виявити ділянки, які одночасно відповідають усім умовам (Рис. 5)

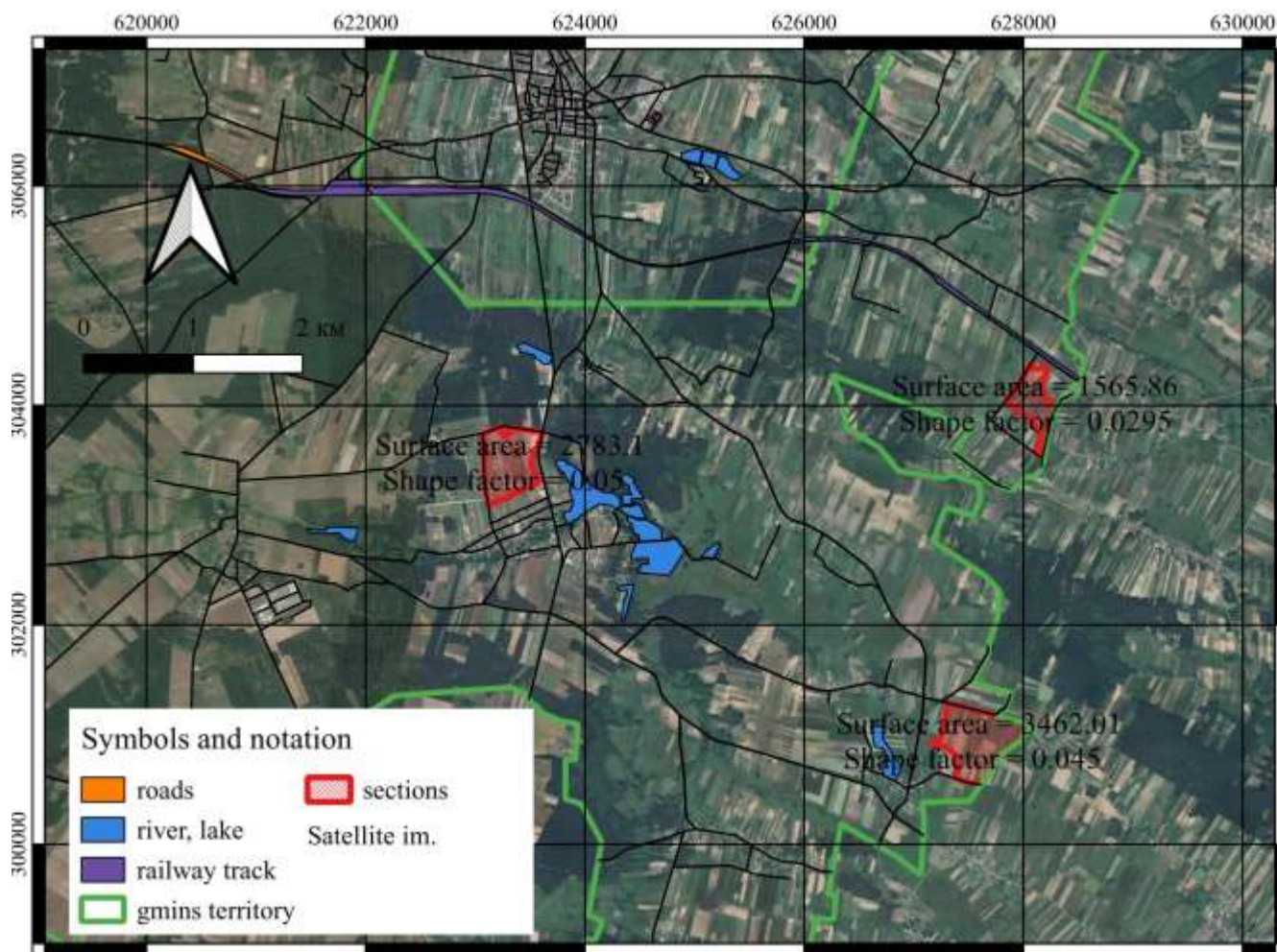


Рисунок 5. Карта запропонованих ділянок для будівництва очисної станції

Результати аналізу показали, що 3 ділянки розташовані у межах 200 м від транспортної інфраструктури, мають позитивні рельєфні характеристики (пологі схили, висота 230–270 м) і не перетинаються з охоронними зонами.

На основі даних про типи ґрунтів, схили та напрямки стоку було здійснено попередню оцінку вразливості ділянок до забруднення. Ділянки, що розташовані в нижніх частинах басейну з високим ризиком підтоплення, були виключені. Також враховано потенційний вплив зміни клімату – збільшення кількості зливових опадів, що може вплинути на роботу споруд.

Візуалізація результатів показала, що на основі об'єднаного шару придатних ділянок була створена тематична карта, на якій відображено:

- контури ділянок;
- буферні зони навколо обмежень;
- дорожня та гідрографічна мережа;
- межі адміністративних одиниць.

Використано стилі класифікації за значеннями площі та атрибутів придатності для візуального представлення найкращих альтернатив. Додатково виконано накладання супутникових знімків для валідації результатів.

Просторовий аналіз дозволив здійснити багатофакторну оцінку ділянок із урахуванням рельєфу, землекористування, інженерної доступності та екологічних обмежень. Отримані результати підтверджують ефективність ГІС-інструментів для формування обґрунтованих рішень щодо розміщення об'єктів водоочистки. У підсумку виділено обмежену кількість ділянок, які відповідають комплексним критеріям і рекомендовані для подальшого проектування.

Візуалізація на картах QGIS показала, що значна частина території після відсікання не відповідає критеріям (через забудову, високий ухил чи охоронні зони). Проте, після просторової фільтрації було визначено кілька ізольованих ділянок, які мають правильну геометрію, достатню площу та доступність інфраструктури.

Ретельний вибір параметрів для розміщення очисних споруд дозволяє забезпечити екологічну безпеку, ефективність експлуатації та відповідність законодавчим нормам. Застосування ГІС для реалізації критеріїв вибору продемонструвало високу ефективність як інструменту аналізу і прийняття рішень. Подібна модель може бути використана для планування об'єктів інфраструктури в інших регіонах з урахуванням локальних особливостей.

Картографування є одним із найбільш важливих етапів у геоінформаційному аналізі, оскільки саме карта дає можливість наочно представити результати просторових досліджень, інтегрувати численні тематичні шари та надати їм логічної, просторово-орієнтованої форми. Карта не тільки завершує аналітичний

цикл, а й слугує засобом комунікації між фахівцями, місцевою владою, інженерами та громадськістю.

У дослідженні також використовувалося дистанційне зондування та географічні інформаційні системи (ГІС) для моделювання оптимального розташування очисної станції стічних вод у місті Хмільник, Польща. За допомогою Google Earth Engine (GEE) та геопросторових наборів даних у дослідженні визначаються придатні ділянки з урахуванням екологічних, інфраструктурних та топографічних обмежень. Аналіз інтегрує дані про буферні зони, склад ґрунту та ухили для забезпечення сталого вибору ділянки.

Доцільність будівництва очисних споруд аналізується з урахуванням інфраструктурних, екологічних та геоморфологічних факторів. Оцінка враховує буферні зони навколо ключової інфраструктури та природних об'єктів, включаючи будівлі (500 м), кладовища (200 м), озера (150 м), залізниці (100 м), річки (150 м), дороги (100 м), лінії електропередач (100 м) та водно-болотні угіддя (200 м). Ці зони об'єднуються в захисну зону, яка визначає території, заборонені для будівництва. Дозволені ділянки визначаються шляхом віднімання зон виключення від меж муніципалітету, а потім оцінки властивостей ґрунту. Визначаються ділянки з вмістом глини не менше 30%, оскільки такі ґрунти забезпечують природну ізоляцію, зменшуючи ризик забруднення ґрунтових вод. Аналіз ухилу за допомогою цифрової моделі рельєфу (ЦМР) гарантує, що враховуються лише ділянки з ухилом 5° або менше, що мінімізує ризики, пов'язані з ерозією та нерівномірним розподілом стічних вод.

Інтегруючи ці три критерії – дозволені зони будівництва, відповідний склад ґрунту та оптимальний ухил – дослідження визначає та візуалізує потенційні ділянки для будівництва очисних споруд. Аналіз визначив приблизно 1083 гектари ($10,8 \text{ км}^2$) придатної землі в межах муніципалітету (Рис. 6). Ці результати є основою для раціонального планування інфраструктури, захисту навколишнього середовища та сталого управління стічними водами.

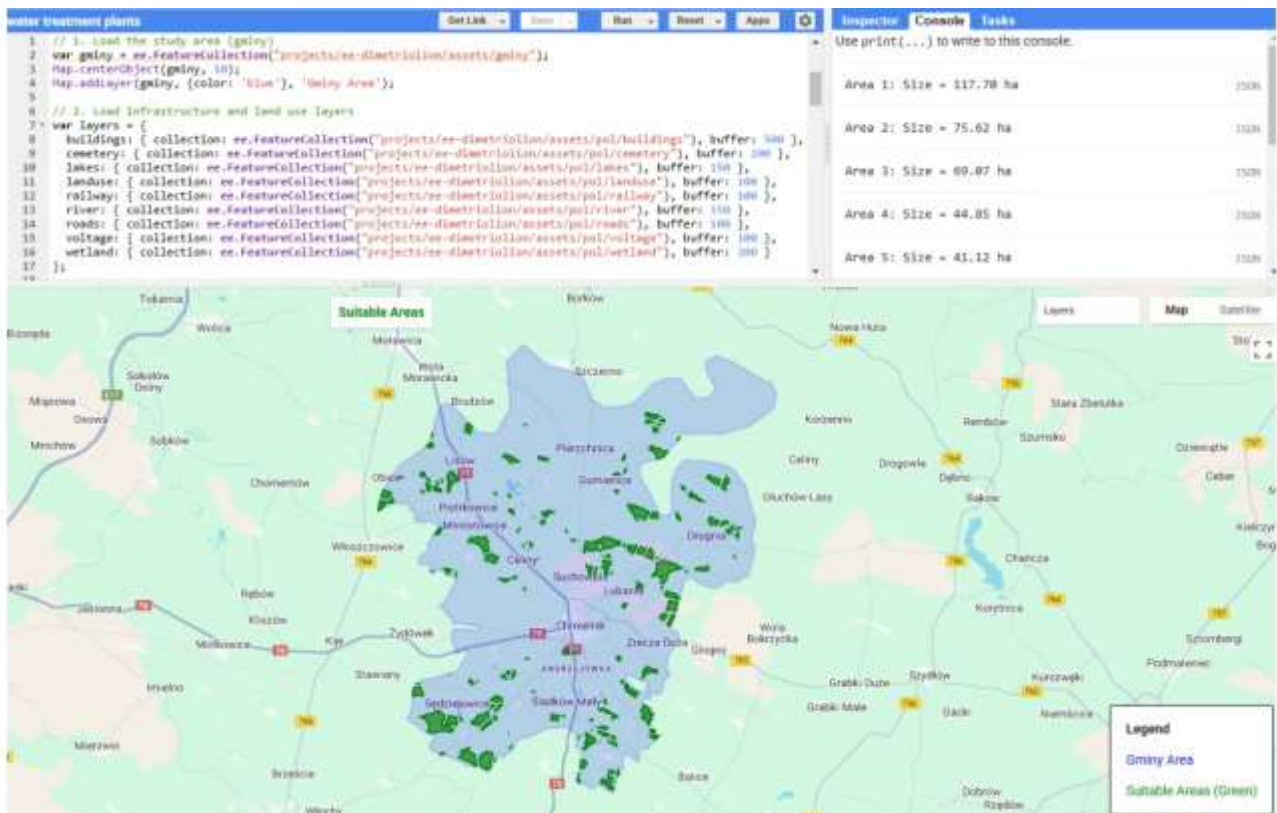


Рисунок 6. Знімок екрана виконання програмного коду в GEE.

Побудова підсумкової карти підтвердила ефективність поетапного геоінформаційного аналізу для визначення територій під екологічну інфраструктуру. Візуалізація дозволила не лише узагальнити результати, а й створити основу для подальших кроків – інженерного проектування, громадського обговорення, затвердження проєктів місцевими органами.

Карта також дає змогу оперативного оновлювати результати у разі зміни вхідних даних, що підкреслює гнучкість і довготривалу цінність геоінформаційного підходу.

ВИСНОВКИ

Результати дослідження підтвердили, що використання ГІС у просторовому плануванні дозволяє враховувати різні фактори, включаючи природні обмеження, технічні вимоги та соціально-економічні аспекти. Метод багатокритеріальної оцінки забезпечив об'єктивний вибір і мінімізував ризики впливу на навколишнє середовище.

Використання ГІС дозволяє провести комплексний аналіз для вибору найкращих ділянок для будівництва об'єктів інфраструктури. Вибрані ділянки відповідають екологічним, технічним та соціальним критеріям, що забезпечує стійкість прийнятих рішень. Дослідження було проведено з використанням географічної інформаційної системи QGIS для визначення оптимальних місць для будівництва очисних споруд у громадах Пержніца та Хмільник у Республіці Польща. Це завдання є багатофакторним і вимагає врахування географічних, екологічних, економічних та соціальних аспектів.

Аналіз визначив три найбільш підходящі місця для будівництва очисної станції. Вибрані місця відповідали критеріям безпеки, доступності та ефективного використання земельних ресурсів. Зокрема, аналіз враховував нахил місцевості, відстань від водних ресурсів, доступність транспортної інфраструктури та мінімізацію впливу на навколишнє середовище та місцевих жителів. Серед визначених ділянок ділянка 1 була оцінена як найбільш оптимальна для будівництва, оскільки вона максимально відповідає встановленим критеріям і забезпечує ефективність майбутньої експлуатації очисної станції.

Отримані результати можуть слугувати основою для подальших техніко-економічних обґрунтувань та прийняття рішень щодо реалізації проектів у цих громадах. Методологія може бути використана для планування подібних об'єктів в інших регіонах Польщі та Європи.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Statistics Poland. Statistics Poland (Główny Urząd Statystyczny) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://stat.gov.pl> (дата звернення: 12.12.2025).
2. Nasz Wybor. Nasz Wybor – Portal dla Ukraińców w Polsce [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://naszwybor.pl> (дата звернення: 12.12.2025).
3. OpenStreetMap. OpenStreetMap [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.openstreetmap.org/> (дата звернення: 12.12.2025).
4. European Data Portal. European Data Portal [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://data.europa.eu/en> (дата звернення: 12.12.2025).
5. INSPIRE Geoportals. INSPIRE Geoportals [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://inspire-geoportals.ec.europa.eu/> (дата звернення: 12.12.2025).
6. Zhou Y., Song Y., Li S., Qin W., Sun J. A Location Selection Method for Wastewater Treatment Plants Integrating Dynamic Change of Water Ecosystem and Socio-Cultural Indicators: A Case Study of Phnom Penh. *Water*, 2022, 14(22), P. 3637. DOI: [10.3390/w14223637](https://doi.org/10.3390/w14223637).
7. Babajanov A., Abdiramanov R. Drafting land allocation projects for urban development based on GIS technologies. *E3S Web Conf*, 2021, 264, P. 03040. DOI: [10.1051/e3sconf/202126403040](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126403040).
8. Awawdeh M., Al-Rousan Z., Alkaraki K. Wastewater treatment plant site selection using GIS and multicriteria decision analysis. *Arab Gulf Journal of Scientific Research*, 2023. DOI: [10.1108/AGJSR-09-2023-0412](https://doi.org/10.1108/AGJSR-09-2023-0412).
9. Saranya A., Alanoud Al Mazroa, Mashaal Maashi, Nithya T.M., Priya V. Remote sensing and machine learning approach for zoning of wastewater drainage system. *Desalination and Water Treatment*, 2024, 319, P. 100549. ISSN 1944-3986. DOI: [10.1016/j.dwt.2024.100549](https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100549).

10. Гаврилюк П. Б., Касіянчук Д. В. Оцінка параметрів річкового басейну в управлінні територіями на прикладі р. Луква з використанням ГІС. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, 2024, (3), 12–20. <https://doi.org/10.32782/apcmj.2024.3.2>
11. Attwa M., Zamzam S. An integrated approach of GIS and geoelectrical techniques for wastewater leakage investigations: Active constraint balancing and genetic algorithms application. *Journal of Applied Geophysics*, 2020, 175, P. 103992. DOI: [10.1016/j.jappgeo.2020.103992](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103992).
12. Hablovskiy B., Hablovska N., Shtohryn L., Kasiyanchuk D., Kononenko M. The Long-Term Prediction of Landslide Processes within the Precarpathian Depression of the Cernivtsi Region of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2023, 24, 7, P. 254–262. DOI: [10.12911/22998993/164753](https://doi.org/10.12911/22998993/164753).
13. Monitor Info. Monitor Info – Aktualne wiadomości z Polski i świata [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://monitorinfo.pl> (дата звернення: 12.03.2025).
14. **Oleksiuk I.**, Kasiyanchuk D. GIS in Territory Management for the Site Selection of Wastewater Treatment Facilities in the Communities of Pierzszczyzna and Chmielnik, Poland. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024»*, 2024, P. 1–5. DOI: [10.3997/2214-4609.2024510077](https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510077). (SCOPUS)
15. Бойко В. М., Іщук І. А. Геоінформаційні системи в управлінні природними ресурсами: навч. посіб. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2021. – 204 с.
16. Костенко В. В. Основи екологічного моделювання у геоінформаційних системах. – Київ: КНЕУ, 2020. – 156 с.
17. Zwirowicz-Rutkowska A., Kocur-Bera K. Land cover analysis using CORINE data and GIS for spatial planning purposes in Poland // *Land Use Policy*. – 2021. – Vol. 108. – Article ID: 105629.

18. Skłodowski M., Czapiewski K. The application of GIS and remote sensing for sustainable water management in rural Poland // Sustainability. – 2022. – Vol. 14(3). – P. 1452.
19. European Environment Agency. CORINE Land Cover (CLC) 2018 – Copernicus Land Monitoring Service. – URL: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover> (дата звернення: 05.06.2025).
20. Młynarczyk Z. Spatial modeling of nitrate pollution risks using GIS and SWAT in agricultural catchments in Poland // Water. – 2020. – Vol. 12(6). – P. 1781.
21. Senthil Kumar A., Muttill N., Jayasiri H. Integration of GIS and SWAT model for identifying potential locations for wastewater treatment plants // Environmental Monitoring and Assessment. – 2023. – Vol. 195(4). – Article 506.
22. United States Environmental Protection Agency (EPA). Watershed Assessment, Tracking & Environmental Results System (WATERS). – URL: <https://www.epa.gov/waters> (дата звернення: 05.06.2025).
23. **Oleksiuk, I., & Kasiyanchuk, D. (2025)** The use of geoinformation systems in territorial planning for the location of wastewater treatment plants in Poland. Airport Planning, Construction and Maintenance Journal, 1 <https://journals.nau.in.ua/index.php/apcmj/issue/view/5> (**ФАХОВЕ ВИДАННЯ**)
24. Kasiyanchuk D.V., **Oleksiuk I.I.** Remote sensing-based modeling for water treatment facility location in Chmielnik, Poland. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. X Міжнародний молодіжний конгрес, 27-28 березня 2025, Україна, Львів, С.83. DOI: <https://doi.org/10.51500/7826-65-0>

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи: «Картографічне забезпечення проєктів землеустрою для визначення місця під будівництво очисних споруд у гмінах Перзніца та Хмельнік Республіка Польща»

Обсяг пояснювальної записки: 58 аркушів.

Перелік графічних додатків:

23.06.25 рік

(дата)

(підпис студента)