

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ БУДІВНИЦТВА,  
ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА ЦИВІЛЬНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

Кафедра земельного адміністрування та геоінформаційних систем

Пояснювальна записка

до дипломної роботи бакалавра

на тему: **«Геоінформаційне моделювання зон затоплення як інструмент оцінки паводкових ризиків»**

Виконав студент 4 курсу групи ГКЗ 2022-1  
спеціальності 193 Геодезія та землеустрій  
ОП Геодезія, картографія та землеустрій



Молоткова Наталія Сергіївна

Керівник



Євдокімов Андрій Анатолійович

Рецензент



Мамонов Костянтин Анатолійович

2026 року

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут будівництва, землеустрою та цивільної інженерії

Кафедра земельного адміністрування та геоінформаційних систем

Освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

Освітня програма Геодезія, картографія та землеустрій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЗА та ГІС  
проф. Мамонов К. А.

 Восстановившая подпись

X 

Подписано: f054c53-ba06-45d3-8422-a8d59cd399bb

«25» травня 2026 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ**

Молотковій Наталії Сергіївні

1. Тема проєкту (роботи): Геоінформаційне моделювання зон затоплення як інструмент оцінки паводкових ризиків

керівник проєкту (роботи) к.т.н., доцент Євдокімов Андрій Анатолійович, затверджені наказом вищого навчального закладу від 22.05.2026 року № 441-03.

2. Строк подання студентом проєкту (роботи): 18 червня 2026 року.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи): наукові та навчально-методичні джерела, нормативно-правові документи у сфері цивільного захисту та управління водними ресурсами, матеріали дистанційного зондування Землі, цифрові моделі рельєфу, відкриті геопросторові дані, картографічні матеріали, наукові статті, матеріали конференцій, спеціалізовані інтернет-ресурси та базові просторові дані, необхідні для виконання геоінформаційного аналізу території дослідження.







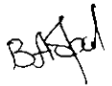
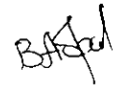
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: теоретичний огляд можливостей використання засобів ГІС щодо визначення зон затоплення; підготовка вихідних даних щодо визначення рівнів води для заданих сценаріїв руйнування дамби Печенізького водосховища; визначення зон ризику при можливому прориві дамби засобами ГІС

(перелік питань, які потрібно розробити)

5. Перелік графічного матеріалу: презентаційний матеріал 25 слайдів; схема методики дослідження; карта-схема території дослідження; цифрова модель рельєфу; схема гідродинамічної моделі НЕС-RAS; карта зон затоплення; карта паводкових ризиків; схема розташування об'єктів у зоні ризику; результати просторового аналізу; підсумкова карта оцінки паводкових ризиків.

(з точним зазначенням обов'язкових креслень)

## 6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1. Теоретичний огляд можливостей використання засобів ГІС щодо визначення зон затоплення	Євдокімов А. А., доцент кафедри ЗА та ГІС		
2. Імітаційне моделювання можливого прориву дамби печенізького водосховища засобами HEC-RAS	Євдокімов А. А., доцент кафедри ЗА та ГІС		
3. Визначення зон ризику при можливому прориві дамби засобами ГІС	Євдокімов А. А., доцент кафедри ЗА та ГІС		
3. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Абракітов В. Е., доцент кафедри ОП та БЖД		

7. Дата видачі завдання: 25 травня 2026 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Формування інформаційної бази	25.05.26	Виконано
2.	Розробка та написання першого розділу роботи	03.06.26	Виконано
3.	Розробка та написання другого розділу роботи	09.06.26	Виконано
4.	Розробка та написання третього розділу роботи	12.06.26	Виконано
5.	Розробка та написання розділу з охорони праці	15.06.26	Виконано
6.	Оформлення роботи	18.06.26	Виконано
7.	Попередній захист роботи	19.06.26	
8.	Захист дипломної роботи у ДЕК	24.06.26	

Студент



Молоткова Н. С.

Керівник проєкту (роботи)



Євдокімов А. А.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 57 с., 3 табл., 36 рис., 3 дод., 11 джерел, 25 слайдів презентації.

ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ, МОДЕЛЮВАННЯ, ЗАТОПЛЕННЯ, ПАВОДКОВІ РИЗИКИ, ПРОРИВ ДАМБИ, ЦИФРОВА МОДЕЛЬ РЕЛЬЄФУ, ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ, ГІДРОТЕХНІЧНІ СПОРУДИ, НАДЗВИЧАЙНІ СИТУАЦІЇ.

Об'єкт дослідження – геоінформаційне та гідродинамічне моделювання наслідків можливого прориву дамби Печенізького водосховища.

Мета дослідження – розроблення та апробація геоінформаційної технології моделювання зон затоплення для оцінювання паводкових ризиків і прогнозування наслідків можливого прориву дамби Печенізького водосховища.

Предмет дослідження – методи та засоби геоінформаційного моделювання зон затоплення і просторового аналізу паводкових ризиків у разі аварійного руйнування гідротехнічних споруд.

Методи дослідження – методи геоінформаційного аналізу, цифрового моделювання рельєфу, просторового аналізу, оброблення даних дистанційного зондування Землі та картографічного моделювання.

Розроблено геоінформаційну модель оцінювання зон можливого затоплення при різних сценаріях прориву дамби Печенізького водосховища. Визначено території потенційного ризику, до яких належать населені пункти Чугуївської громади, смт Кочеток та інші прилеглі території. Окрему увагу приділено аналізу ризиків для об'єктів критичної інфраструктури, зокрема Кочетоцької водопровідної станції, яка забезпечує водопостачання значної частини населення м. Харкова.

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗОН ЗАТОПЛЕННЯ	8
1.1 Сучасні програмні засоби моделювання зон затоплення	9
1.2 Геоінформаційні системи для аналізу зон затоплення: QGIS та ArcGIS Pro	10
1.3 Об'єкт і предмет дослідження	15
1.4 Висновки по розділу	16
2 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МОЖЛИВОГО ПРОРИВУ ДАМБИ ПЕЧЕНІЗЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ЗАСОБАМИ HEC-RAS	17
2.1 Математичні основи розв'язання задачі нестационарного руху води при прориві дамби	17
2.2 Розв'язання задачі визначення хвилі прориву для заданих сценаріїв руйнування дамби Печенізького водосховища	20
2.3 Висновки по розділу	27
3 ВИЗНАЧЕННЯ ЗОН РИЗИКУ ПРИ МОЖЛИВОМУ ПРОРИВІ ДАМБИ ЗАСОБАМИ ГІС	28
3.1 Характеристика вихідних даних	28
3.2 Процедура визначення зон затоплення при підвищенні рівнів води	34
3.3 Басейновий підхід до визначення зон затоплення	38
3.4 Визначення зон затоплення при можливому прориві дамби Печенізького водосховища	40
3.11 Висновки по розділу	42
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	43
4.1 Загальні відомості	43
4.2 Характеристика лабораторного приміщення	44
4.3 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	44

4.4 Освітлення в лабораторії	46
4.5 Безпека праці під час роботи з геоінформаційними системами та засобами моделювання	47
4.6 Заходи безпеки в умовах надзвичайних ситуацій та воєнного стану	48
4.7 Висновки по розділу	49
ВИСНОВКИ	51
СПИСОК ДЖЕРЕЛ	52
Додаток А Дистанційний моніторинг Каховського водосховища	54
Додаток Б Результати моделювання оцінювання наслідків прориву дамби водосховища у HEC-RAS	55
Додаток В Місто Чугуїв при можливому прориву дамби Печенізького водосховища	56

## ВСТУП

Однією з найсерйозніших техногенних небезпек сьогодення є аварії та руйнування гідротехнічних споруд. Порушення цілісності дамб водосховищ супроводжується утворенням потужної хвилі прориву, яка здатна протягом короткого часу поширюватися на значні території, спричиняючи значні економічні збитки, екологічні наслідки та створюючи загрозу життю і безпеці населення. Для України ця проблема набуває особливої актуальності в умовах воєнного стану, коли об'єкти водогосподарської та гідротехнічної інфраструктури можуть зазнавати навмисних уражень.

Руйнування греблі Каховського водосховища у 2023 році стало одним із найбільших прикладів техногенно-екологічної катастрофи в сучасній історії України. Наслідками цієї події стали масштабні затоплення територій, пошкодження житлової забудови та об'єктів інфраструктури, деградація природних екосистем, а також суттєві порушення функціонування систем водопостачання та зрошення (Додаток А). Ця подія продемонструвала критичну важливість своєчасного прогнозування можливих наслідків аварій на гідротехнічних спорудах та необхідність підготовки заходів реагування.

Додатковим підтвердженням актуальності проблеми є події останніх років, пов'язані з пошкодженнями об'єктів водогосподарської інфраструктури внаслідок бойових дій. Зокрема, потенційна небезпека для Печенізького водосховища та його гідротехнічних споруд свідчить про необхідність постійного контролю та оцінювання можливих ризиків. Навіть локальні пошкодження або часткова втрата стійкості окремих конструктивних елементів можуть спричинити аварійний скид значних обсягів води та утворення зон небезпечного затоплення вздовж долини річки Сіверський Донець, що становить загрозу для населених пунктів, транспортної інфраструктури та об'єктів життєзабезпечення.

У таких умовах особливо важливим стає науково обґрунтоване прогнозування наслідків можливого прориву дамб та оцінювання паводкових

ризиків. Сучасні геоінформаційні системи у поєднанні з цифровими моделями рельєфу, даними дистанційного зондування Землі та засобами гідродинамічного моделювання дозволяють формувати сценарії розвитку надзвичайних ситуацій, визначати межі потенційного затоплення, розраховувати глибину і швидкість водного потоку, а також оцінювати можливі наслідки для населення, критичної інфраструктури та навколишнього природного середовища.

Відповідно до вимог законодавства України у сфері цивільного захисту та управління ризиками надзвичайних ситуацій, органи влади та суб'єкти господарювання повинні здійснювати оцінювання потенційних небезпек, прогнозувати можливі сценарії розвитку аварій та визначати території можливого ураження. Одним із найбільш ефективних інструментів для вирішення таких завдань є геоінформаційні системи (ГІС), які забезпечують інтеграцію просторових даних, моделювання сценаріїв розвитку надзвичайних ситуацій та візуалізацію результатів аналізу.

Особливу небезпеку для Харківської області становить можливе пошкодження або руйнування дамби Печенізького водосховища. У разі виникнення аварійної ситуації хвиля прориву може спричинити затоплення територій уздовж русла річки Сіверський Донець, включаючи населені пункти Печеніги, Кочеток, Чугуїв та інші прилеглі території. Наслідками такого затоплення можуть стати руйнування житлової забудови, транспортної та інженерної інфраструктури, об'єктів водопостачання, а також виникнення загроз для життя і здоров'я населення.

Основними факторами, що впливають на масштаби затоплення, є обсяг водних ресурсів у водосховищі, рівень його наповнення, параметри руйнування дамби, особливості рельєфу місцевості та конфігурація річкової долини.

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗОН ЗАТОПЛЕННЯ

Затоплення територій належать до найбільш поширених природних та техногенних небезпек, що можуть спричиняти значні матеріальні збитки, порушення функціонування критичної інфраструктури та створювати загрозу життю населення. У державному будівельному стандарті (ДБН В.1.1-25:2009) ці явища віднесені до групи небезпечних геологічних процесів та інженерно-геологічних явищ [1]. Особливої актуальності проблема прогнозування зон затоплення набуває в умовах зміни клімату, збільшення частоти екстремальних опадів, старіння гідротехнічних споруд та ризиків їх пошкодження внаслідок воєнних дій.

В наслідок обстрілів є постійний ризик прориву дамб на території України. Відповідно до Закону України «Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру» (Відомості Верховної Ради України, 2000, № 40, ст. 337) [2], суб'єкти господарювання зобов'язані розробляти та погоджувати з органами Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС) плани локалізації і ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС). Зазначені документи ґрунтуються на прогнозуванні розвитку можливих надзвичайних ситуацій, оцінюванні їх наслідків та визначенні зон потенційного ризику.

Сучасні технології геоінформаційного аналізу та гідродинамічного моделювання дозволяють оцінювати масштаби можливих наслідків аварій на водосховищах, визначати території потенційного ризику та обґрунтовувати заходи цивільного захисту населення. Важливу роль у цьому процесі відіграє інтеграція гідрологічних моделей із геоінформаційними системами, що забезпечує просторову прив'язку результатів розрахунків та їх картографічне представлення.

Динамічні характеристики хвилі прориву гідротехнічних споруд можуть бути визначені за допомогою сучасних гідродинамічних моделей. До

основних параметрів належать рівень води, швидкість течії, глибина затоплення та час проходження хвилі прориву. Отримані результати використовуються для створення карт затоплення, оцінювання паводкових ризиків та планування заходів реагування на надзвичайні ситуації.

### 1.1 Сучасні програмні засоби моделювання зон затоплення

Для розв'язання задач прогнозування паводків і моделювання наслідків прориву дамб застосовуються спеціалізовані програмні комплекси, серед яких найбільшого поширення набули HEC-RAS, MIKE FLOOD, SOBEK, TELEMAC, TUFLOW та InfoWorks ICM.

У даній роботі для моделювання зон затоплення обрано програмний комплекс HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System), розроблений Інженерним корпусом армії США [3]. Програмний продукт є безкоштовним, активно підтримується розробниками та широко використовується науковими установами, проєктними організаціями та службами цивільного захисту в багатьох країнах світу.

Серед найбільш поширених програмних засобів для моделювання сценаріїв аварійного затоплення слід відзначити комплекси HEC-RAS та HEC-HMS, які широко застосовуються у світовій практиці інженерної гідрології. Програмний продукт HEC-RAS має значний досвід практичного використання, зокрема у задачах оцінювання паводкових ризиків, страхування від повеней та розробки планів цивільного захисту. Програмний продукт HEC-RAS може бути завантажений у вільному доступі [3].

Сучасні версії HEC-RAS (6.x) забезпечують можливість виконання як одновимірного (1D), так і двовимірного (2D) гідродинамічного моделювання. На відміну від попередніх версій, сучасна система дозволяє безпосередньо використовувати цифрові моделі рельєфу високої точності та виконувати розрахунок поширення водного потоку на складних територіях без застосування додаткових модулів.

Основними можливостями HEC-RAS є:

- моделювання сталих та нестационарних потоків;
- аналіз паводкових процесів;
- моделювання прориву дамб і гідротехнічних споруд;
- побудова карт глибин затоплення;
- визначення швидкостей течії;
- розрахунок часу проходження хвилі прориву;
- створення карт ризиків затоплення;
- експорт результатів у геоінформаційні системи.

Основою математичної моделі є система рівнянь Сен-Венана, що описує закони збереження маси та імпульсу для відкритих потоків. Для двовимірного моделювання використовується чисельне розв'язання рівнянь мілкої води (Shallow Water Equations), що забезпечує більш реалістичне відображення процесів затоплення на територіях зі складним рельєфом.

Важливою перевагою HEC-RAS є можливість інтеграції з геоінформаційними системами, що дозволяє поєднати результати гідродинамічного моделювання з даними про рельєф, землекористування, населені пункти, транспортну інфраструктуру та інші просторові об'єкти.

Таким чином, програмний комплекс HEC-RAS є ефективним інструментом для дослідження паводкових процесів та моделювання можливих наслідків прориву дамб.

## 1.2 Геоінформаційні системи для аналізу зон затоплення: QGIS та ArcGIS Pro

Ефективне моделювання зон затоплення неможливе без використання геоінформаційних систем, які забезпечують збір, обробку, аналіз та візуалізацію просторових даних.

На сьогодні найбільш поширеними ГІС-платформами є QGIS та ArcGIS Pro. Обидві системи дозволяють працювати з цифровими моделями рельєфу,

результатами гідродинамічних розрахунків, супутниковими даними та векторною інформацією.

ArcGIS Pro. ArcGIS Pro є професійною геоінформаційною платформою компанії Esri. ESRI (Environmental Systems Research Institute) [4] – американська транснаціональна компанія, що спеціалізується на геоінформаційних системах. Найбільш відома завдяки виробництву програмного забезпечення для геоінформаційних систем ArcGIS Pro. Є світовим лідером у галузі постачання програмного забезпечення для ГІС, а також мережевих ГІС та спеціальних додатків для управління просторовими базами даних.

ArcGIS Pro (рис.1.1) – це передове повнофункціональне настільне програмне забезпечення геоінформаційних систем (ГІС) від компанії Esri [4]. Воно створене для професійного збору, обробки, поглибленого аналізу, 2D/3D-візуалізації та управління геопросторовими даними.

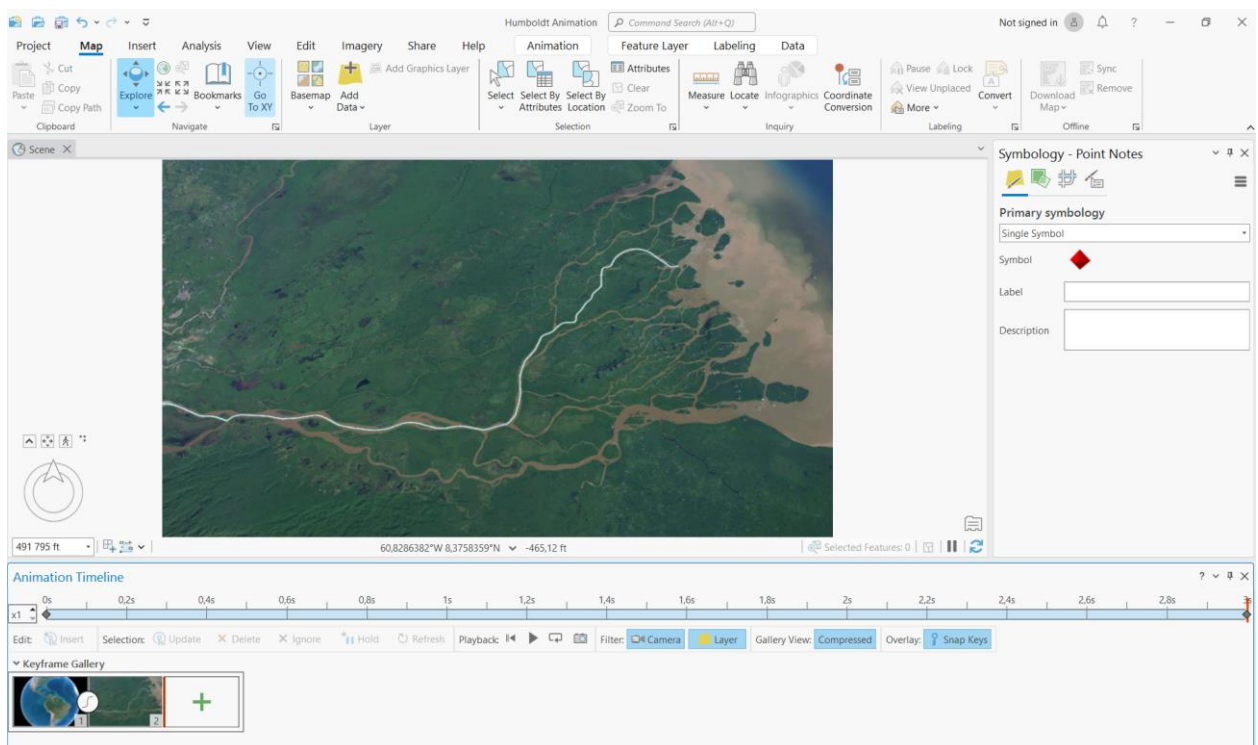


Рисунок 1.1 – Інтерфейс програмного забезпечення ArcGIS Pro від Esri

Головні можливості:

- багатовимірне картографування. Підтримка створення та редагування 2D-карт, 3D-сцен та 4D-даних (враховуючи час);
- просторовий аналіз. Розширені інструменти для моделювання, обробки зображень та машинного навчання;
- інтеграція з хмарою. Повна сумісність з платформою ArcGIS Online та порталами ArcGIS Enterprise для спільної роботи.

ArcGIS Pro доступний у трьох основних версіях, залежно від потреб:

- Basic. Базові функції перегляду, редагування та створення карт;
- Standard. Розширене редагування даних та розширені інструменти управління;
- Advanced. Повний набір інструментів аналізу та просторової обробки. Додаток вимагає ліцензійного входу і поступово стає основним робочим інструментом фахівців, замінюючи класичний додаток ArcMap.

Основними перевагами ArcGIS Pro є:

- потужні інструменти просторового аналізу;
- інтеграція з ArcGIS Online;
- підтримка великих корпоративних баз геоданих;
- широкий набір засобів автоматизації;
- спеціалізовані модулі для аналізу ризиків та надзвичайних ситуацій.

Недоліками є:

- висока вартість ліцензування;
- залежність від комерційної підтримки;
- обмежена доступність для окремих користувачів та невеликих організацій.

QGIS [5] є безкоштовною геоінформаційною системою з відкритим програмним кодом, яка активно використовується в наукових дослідженнях, державному управлінні та комерційних проєктах (рис. 1.2).

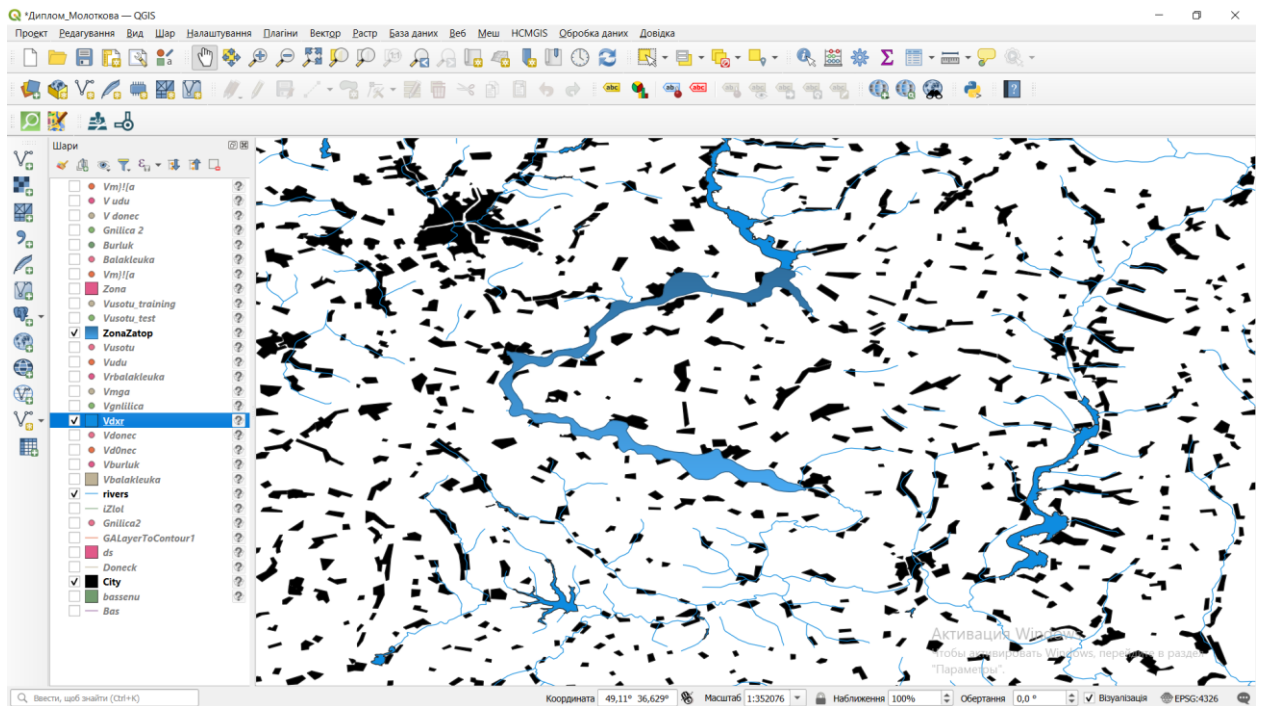


Рисунок 1.2 – Інтерфейс програмного забезпечення з відкритим програмним кодом QGIS

Переваги QGIS:

- безкоштовне використання;
- відкритий вихідний код;
- підтримка великої кількості форматів просторових даних;
- інтеграція з PostgreSQL/PostGIS;
- розвинена система плагінів;
- підтримка Python для автоматизації процесів;
- можливість роботи з результатами HEC-RAS.

Серед недоліків можна відзначити:

- відсутність деяких спеціалізованих корпоративних інструментів;
- різний рівень якості окремих плагінів;
- залежність від спільноти розробників.

Порівняльний аналіз QGIS та ArcGIS Pro наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз QGIS та ArcGIS Pro

Критерій	QGIS	ArcGIS Pro
Ліцензування	Відкрите, безкоштовне	Комерційне
Вартість	Безкоштовно	Висока
Підтримка форматів	Дуже широка	Дуже широка
Інтеграція з HEC-RAS	Так	Так
Автоматизація Python	Так	Так
Геообробка	Висока	Дуже висока
Веб-ГІС можливості	Через додаткові рішення	Вбудовані сервіси
Використання в освіті	Дуже поширене	Обмежене ліцензіями

Зважаючи на безкоштовне поширення, достатній функціонал для виконання просторового аналізу, підтримку сучасних форматів геоданих та можливість інтеграції з результатами гідродинамічного моделювання HEC-RAS, у даному дослідженні як основне геоінформаційне середовище обрано QGIS. Технологічна схема для моделювання зон ризику при надзвичайних ситуаціях на водосховищах представлена на рисунку 1.3.

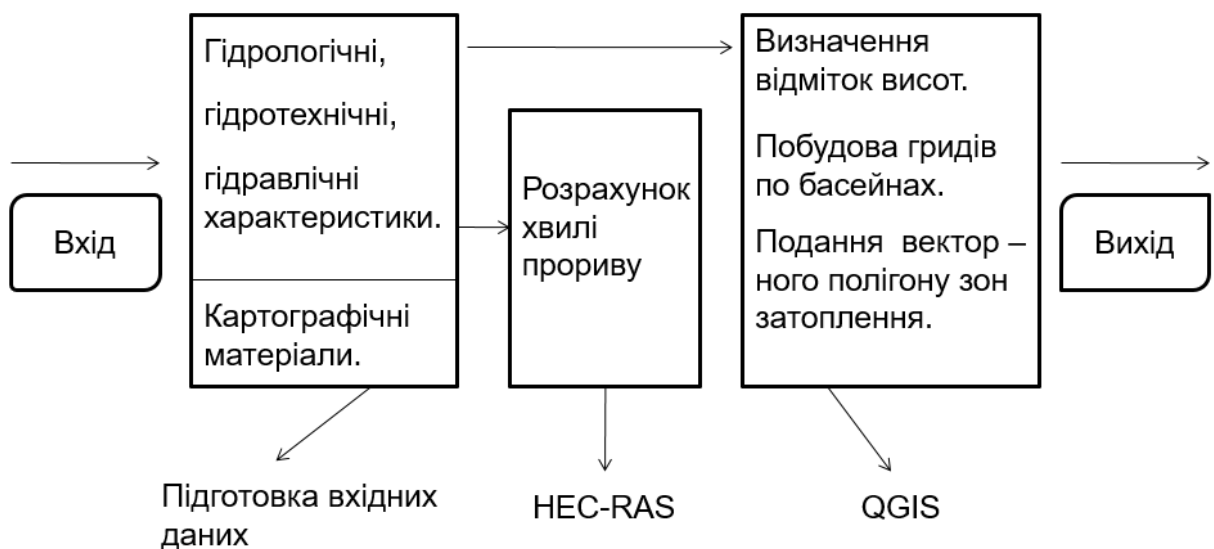


Рисунок 1.3 – Технологічна схема для моделювання зон ризику при надзвичайних ситуаціях на водосховищах

Поєднання HEC-RAS та QGIS дозволяє реалізувати повний цикл моделювання зон затоплення: від підготовки цифрової моделі рельєфу та

гідрографічної мережі до побудови карт глибин затоплення, визначення територій ризику та оцінювання потенційних наслідків надзвичайних ситуацій.

### 1.3 Об'єкт і предмет дослідження

Об'єкт дослідження – геоінформаційне та гідродинамічне моделювання наслідків можливого прориву дамби Печенізького водосховища.

Предмет дослідження – методи та засоби геоінформаційного моделювання зон затоплення і просторового аналізу паводкових ризиків у разі аварійного руйнування гідротехнічних споруд.

Для обґрунтування мети дослідження необхідно врахувати основні технічні та гідрологічні характеристики Печенізького водосховища.

Печенізьке водосховище було створене з метою забезпечення м. Харкова прісною водою на місці Кочетокського водосховища, спорудженого у 1936 році. Будівництво Печенізького водосховища тривало з 1958 по 1962 рік, а його наповнення завершилося під час весняної повені 1964 року. З того часу об'єм водосховища залишається практично незмінним і становить близько 0,4 км<sup>3</sup>. Підпір води поширюється до гирла річки Вовча. Основні параметри Печенізького водосховища:

- нормальний підпірний рівень 100,5 м;
- форсований підпірний рівень 102,1 м;
- рівень мертвого об'єму 94,5 м;
- повний об'єм 383 млн м<sup>3</sup>;
- корисний об'єм 341 млн м<sup>3</sup>;
- площа водного дзеркала 8620 га;
- довжина 75 км;
- середня ширина 1,15 км;
- максимальна ширина 4,0 км;
- середня глибина 4,44 м;

- максимальна глибина 14,0 м.

Основні гідрологічні характеристики:

- площа водозбірного басейну 8400 км<sup>2</sup>;
- річний об'єм стоку 50 % забезпеченості 703 млн м<sup>3</sup>;
- паводковий стік 50 % забезпеченості 403 млн м<sup>3</sup>;
- максимальні витрати води 1 % забезпеченості 1940 м<sup>3</sup>/с [6].

Гребля Печенізького водосховища розташована в смт Печеніги Харківської області. До складу гідротехнічних споруд входять земляна гребля, бетонна водоскидна споруда, донний водоспуск та трубчастий водовипуск.

Водосховище використовується для промислового, комунального та сільськогосподарського водопостачання м. Харкова, рибного господарства та рекреаційних потреб, що зумовлює підвищену значущість оцінювання можливих наслідків аварійних ситуацій [7].

#### 1.4 Висновки до розділу

У першому розділі проаналізовано сучасний стан проблеми безпеки гідротехнічних споруд та наслідки їх можливого руйнування. Проведено порівняльний аналіз сучасних програмних засобів для моделювання зон затоплення. Обґрунтовано доцільність застосування геоінформаційних систем і систем гідравлічного моделювання як основи для оцінювання зон ризику та підтримки управлінських рішень у сфері цивільного захисту. Розглянуто об'єкт і предмет дослідження.

## 2 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МОЖЛИВОГО ПРОРИВУ ДАМБИ ПЕЧЕНІЗЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ЗАСОБАМИ HEC-RAS

Для імітаційного моделювання хвилі прориву дамби та розрахунку параметрів водного потоку в нижньому б'єфі водосховища використовується програмний комплекс HEC-RAS. Його застосування передбачає підготовку значного масиву взаємопов'язаних гідрологічних, гідравлічних і геометричних характеристик досліджуваної території. Точність і повнота вихідних даних безпосередньо визначають надійність отриманих результатів та достовірність подальшого просторового аналізу зон потенційного затоплення засобами геоінформаційних систем.

Процес підготовки вихідної інформації охоплює формування математичної моделі дослідження, обґрунтування сценаріїв пошкодження або руйнування дамби, побудову геометричної моделі русла річки та прилеглої території, встановлення граничних і початкових умов розрахунку, визначення характеристик потоку, а також подальшу обробку та аналіз результатів гідравлічного моделювання. Отримані дані слугують основою для побудови карт затоплення, оцінювання паводкових ризиків і визначення потенційно небезпечних зон впливу надзвичайної ситуації.

### 2.1 Математичні основи розв'язання задачі нестационарного руху води при прориві дамби

Рух води та поширення домішок у водотоці можуть описуватися рівняннями турбулентної дифузії, що враховують перенесення речовин потоком та їх розсіювання у просторі. Загальний вигляд рівняння турбулентної дифузії має вигляд [8]:

$$v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \cdot \left( \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right), \quad (2.1)$$

де  $x, y, z$  – координати вздовж потоку, у поперечному та вертикальному напрямках;

$V_x, V_y, V_z$  – проєкції вектора швидкості;

$D$  – коефіцієнт турбулентної дифузії,  $m^2/s$ .

За умови нехтування поперечною складовою швидкості та для неглибоких водотоків, де вертикальне перемішування відбувається інтенсивно, можливе спрощення задачі до плоскої. У цьому випадку використовується рівняння турбулентної дифузії для двовимірної задачі [9]:

$$v_x \frac{\partial C}{\partial x} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} . \quad (2.2)$$

Альтернативний підхід до оцінювання наслідків прориву дамби ґрунтується на розгляді води, що надходить через проривний отвір, як стічної, з подальшим розрахунком кратності її розведення у водотоці та концентрації у контрольному створі [7]:

$$C = \frac{(C_{ст} - C_{\phi})}{n} + C_{\phi} \quad (2.3)$$

де  $C$  – концентрація речовини у контрольному створі;

$C_{\phi}$  – фонові концентрація;

$C_{ст}$  – концентрація у воді, що надходить з прориву;

$n$  – кратність розведення.

Вибір методу визначення кратності розведення залежить від співвідношення витрат води з прориву та витрат водотоку. За значень  $q/Q$  у межах 0,0025–0,1 доцільно застосовувати напівемпіричний метод Фролова–Родзіллера [10]. При цьому коефіцієнт турбулентної дифузії обчислюється за формулою:

$$D = \frac{g \cdot v \cdot R}{37 \cdot n_{ш} \cdot S^2} , \quad (2.4)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння;

$R$  – гідравлічний радіус;

$n_{ш}$  – коефіцієнт шорсткості русла;

S – коефіцієнт Шезі.

Подальші етапи включають визначення коефіцієнтів змішування, дисперсії та остаточної кратності розведення. У випадках, коли умови застосування методу Фролова–Родзіллера не виконуються, використовуються альтернативні підходи, зокрема метод Талліннського політехнічного інституту або метод Караушева, заснований на чисельному розв’язанні рівняння турбулентної дифузії.

Метод Караушева дозволяє безпосередньо отримати поле концентрацій у межах розглянутої ділянки водотоку шляхом переходу до скінченно-різницевої форми рівняння (2.5):

$$v_x \frac{\Delta C}{\Delta x} = D \cdot \frac{\Delta_z^2 C}{\Delta z^2}, \quad (2.5)$$

де  $y = 2,5 \cdot \sqrt{n_{\text{ш}}} - 0,13 - 0,75 \cdot \sqrt{R} \cdot (\sqrt{n_{\text{ш}}} - 0,1)$ .

Для цього поверхня водотоку розбивається на прямокутні осередки розміром  $\Delta x \times \Delta z$  (рис. 2.1), що забезпечує чисельну стабільність і можливість моделювання просторово-часової динаміки процесу.

	$\Delta x$	Напрямок течії →		
$\Delta z$	$C_{11}$	$C_{21}$	....	$C_{K1}$
	$C_{12}$	$C_{22}$	....	$C_{K2}$
	....	....	....	....
	$C_{1M}$	$C_{2M}$	....	$C_{KM}$

Рисунок 2.1 – Сітка для розрахунку турбулентної дифузії

2.2 Розв’язання задачі визначення хвилі прориву для заданих сценаріїв руйнування дамби Печенізького водосховища

Гідравлічне моделювання хвилі прориву виконано з використанням програмного комплексу HEC-RAS, який дозволяє здійснювати одновимірні та

нестационарні розрахунки течії. Процес створення гідравлічної моделі включає п'ять основних етапів:

- створення нового проекту;
- введення геометричних даних;
- задання витрат води та граничних умов;
- виконання гідравлічних розрахунків;
- аналіз і візуалізація результатів.

На етапі створення проекту задається робочий каталог і формується файл проекту з розширенням .PRJ (рис. 2.2).

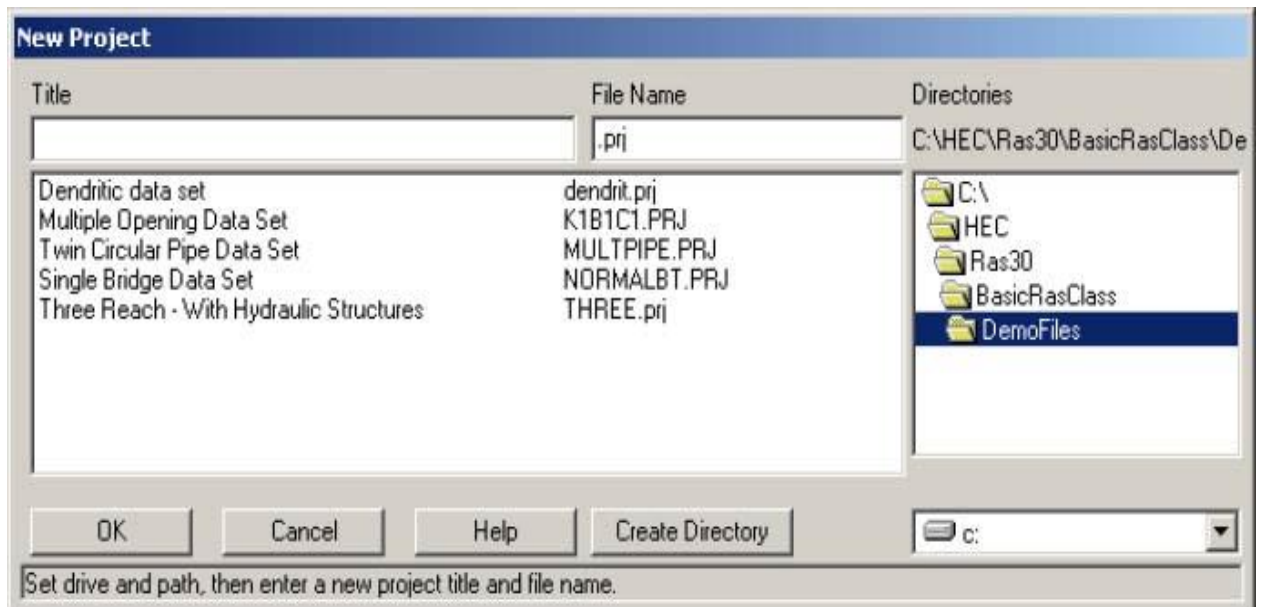


Рисунок 2.2 – Створення нового проекту в HEC-RAS

Як показано на рисунку 2.2, спочатку необхідно вибрати диск і шлях, над чим буде проводитись робота. Потім ввести назву проекту та ім'я файлу. Проект ім'я файлу повинен мати розширення ". PRJ" (користувач не може змінити це). Після того як введено всю інформацію, натисніть кнопку "OK", щоб інформація була прийнята. Після натискання кнопки ОК, з'явиться вікно з назвою проекту і каталогів.

Ввід геометричних даних. Наступним кроком буде введення геометричних даних, які складаються з інформації про підключення до потоку

системи (системи річки схеми), дані про перерізи та гідравлічні структури даних (мостів, водопропускних труб, гребель і т.д.) Геометричні дані вводяться шляхом вибору геометричних даних з меню Правка на головній HEC-RAS вікна.

Як тільки ця опція обрана, геометричні вікна з'являться дані, як показано на рисунку 2.3.

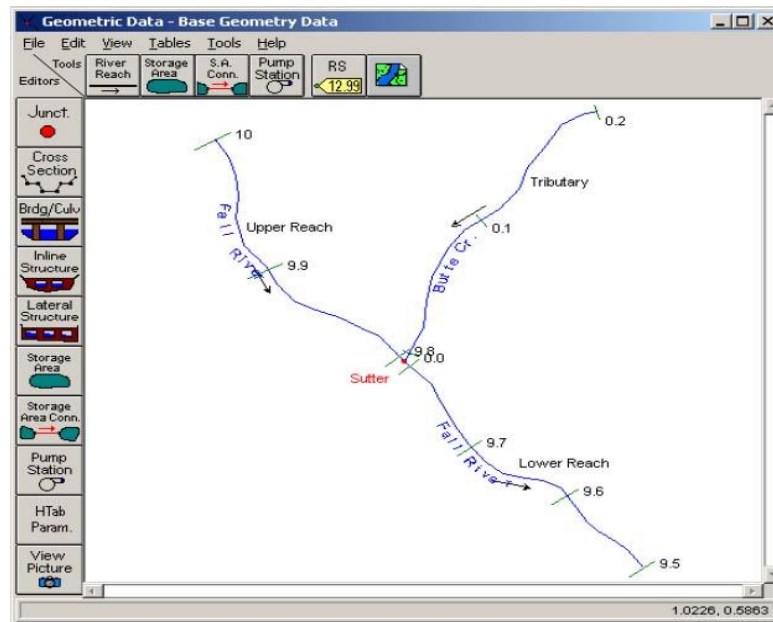


Рисунок 2.3 – Вікна введення геометричних даних HEC-RAS

Для кожного поперечного перерізу задаються ідентифікатори річки, ділянки та умовна річкова відмітка, що забезпечує коректне впорядкування перерізів уздовж течії (рис. 2.4).

Після формування геометрії вводяться дані про витрати води та граничні умови. Залежно від обраного сценарію розрахунку може застосовуватися сталий або нестационарний режим течії. Для моделювання хвилі прориву дамби використовується нестационарний аналіз, який дозволяє врахувати зміну витрат і рівнів води в часі (рис. 2.5).

**Cross Section Data - Base Geometry Data**

Exit Edit Options Plot Help

River:

Reach:  River Sta.:

Description:

Cross Section X-Y Coordinates		
	Station	Elevation
1	110	89.1
2	117.2	79.1
3	174.8	77.1
4	184.8	69.1
5	204.8	70.1
6	214.8	78.1
7	294	80.1
8	301.2	90.1
9		
10		

Downstream Reach Lengths		
LOB	Channel	ROB
0	0	0

Manning's n Values		
LOB	Channel	ROB
0.06	0.035	0.05

Main Channel Bank Stations	
Left Bank	Right Bank
174.8	214.8

Cont/Exp Coefficients	
Contraction	Expansion
0.1	0.3

Enter to move to next downstream river station location

Рисунок 2.4 – Редактор поперечних перерізів HEC-RAS

**Steady Flow Data - larger flows**

File Options Help

Enter/Edit Number of Profiles (500 max):

**Locations of Flow Data Changes**

River:

Reach:  River Sta.:

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates				
	River	Reach	RS	10_yr	25_yr	50_yr	100_yr
1	Fall River	Upper Reach	10.4	750	1000	1500	2000
2	Fall River	Lower Reach	9.79	900	1250	2000	2750
3	Fall River	Lower Reach	9.6	975	1300	2100	3000
4	Butte Creek	Tributary	0.4	150	250	500	750

Edit Steady flow data for the profiles (cfs)

Рисунок 2.5 – Введення даних витрат у HEC-RAS

Після задання всіх параметрів формується план розрахунку та виконується гідравлічне моделювання. Результати розрахунків можуть бути представлені у вигляді графіків поперечних перерізів, профілів поверхні води, гідрографів, а також табличних вихідних даних (рис. 2.6–2.11).

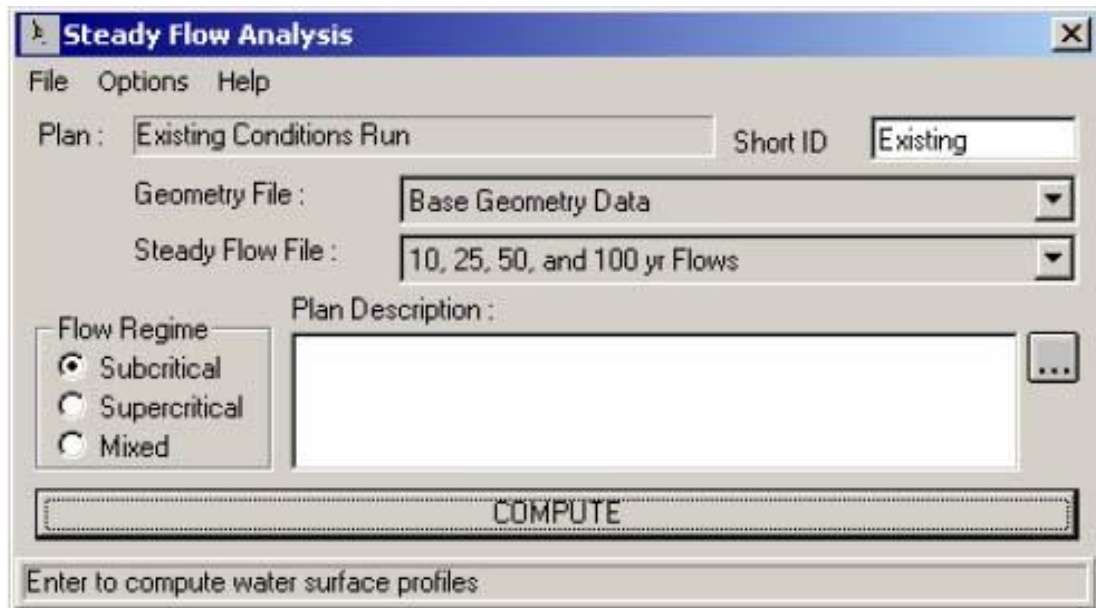


Рисунок 2.6 – Вікно виконання гідравлічних розрахунків

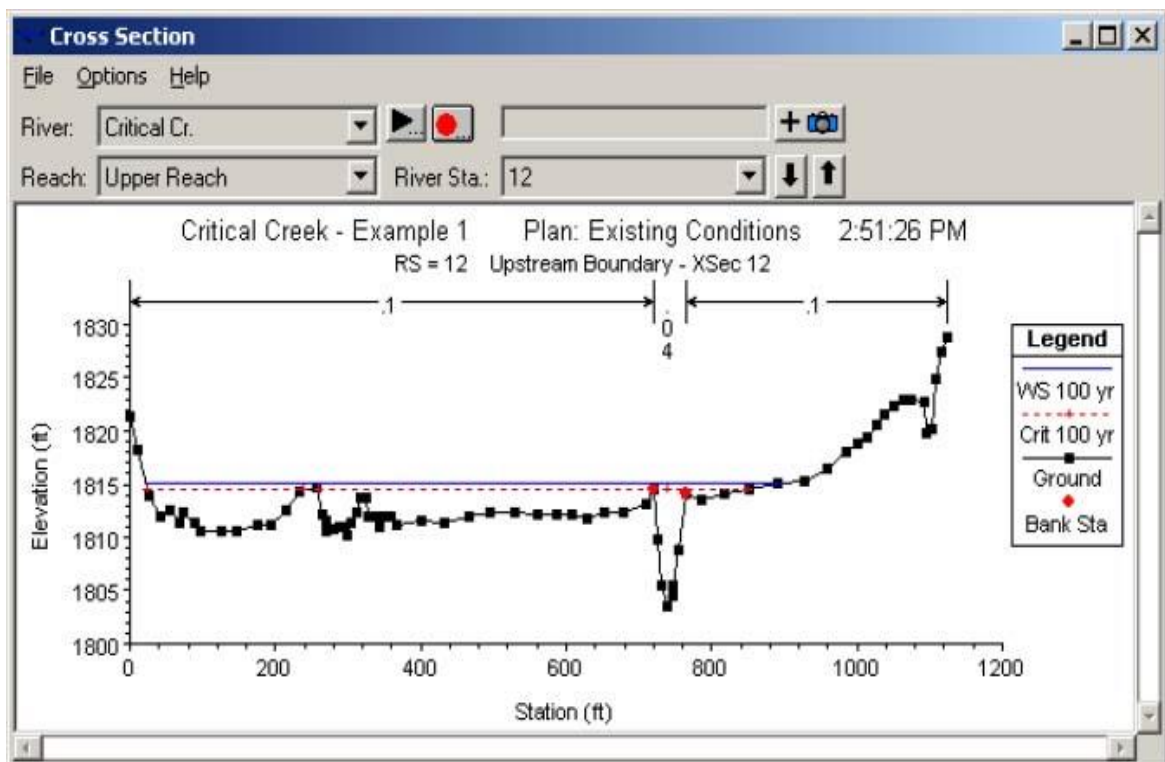


Рисунок 2.7 – Поперечні перерізи русла

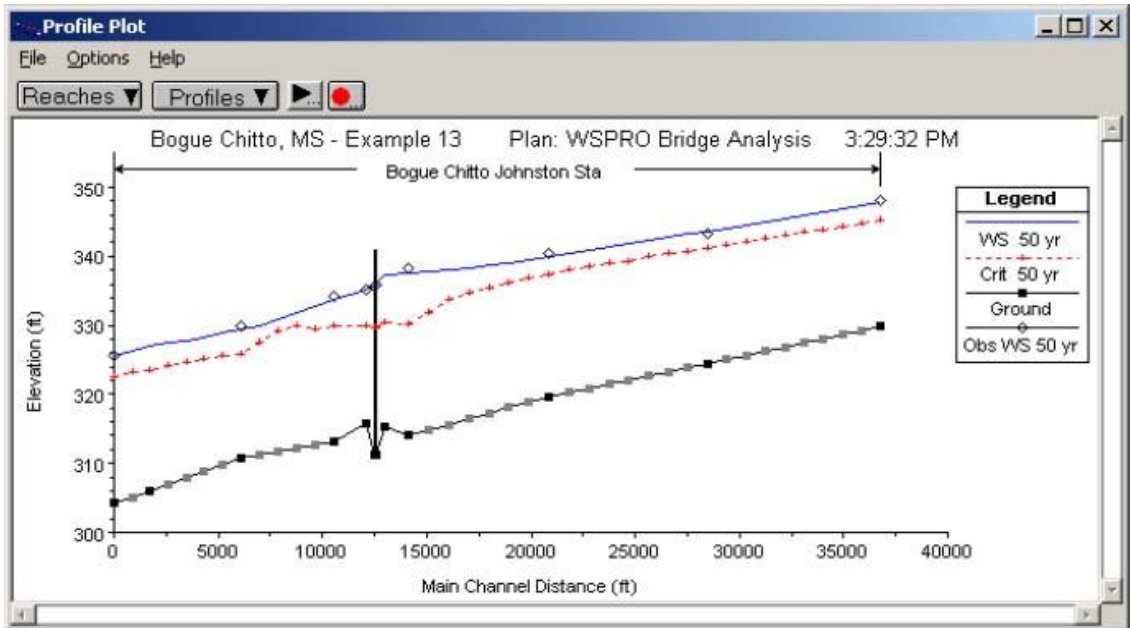


Рисунок 2.8 – Профіль поверхні води

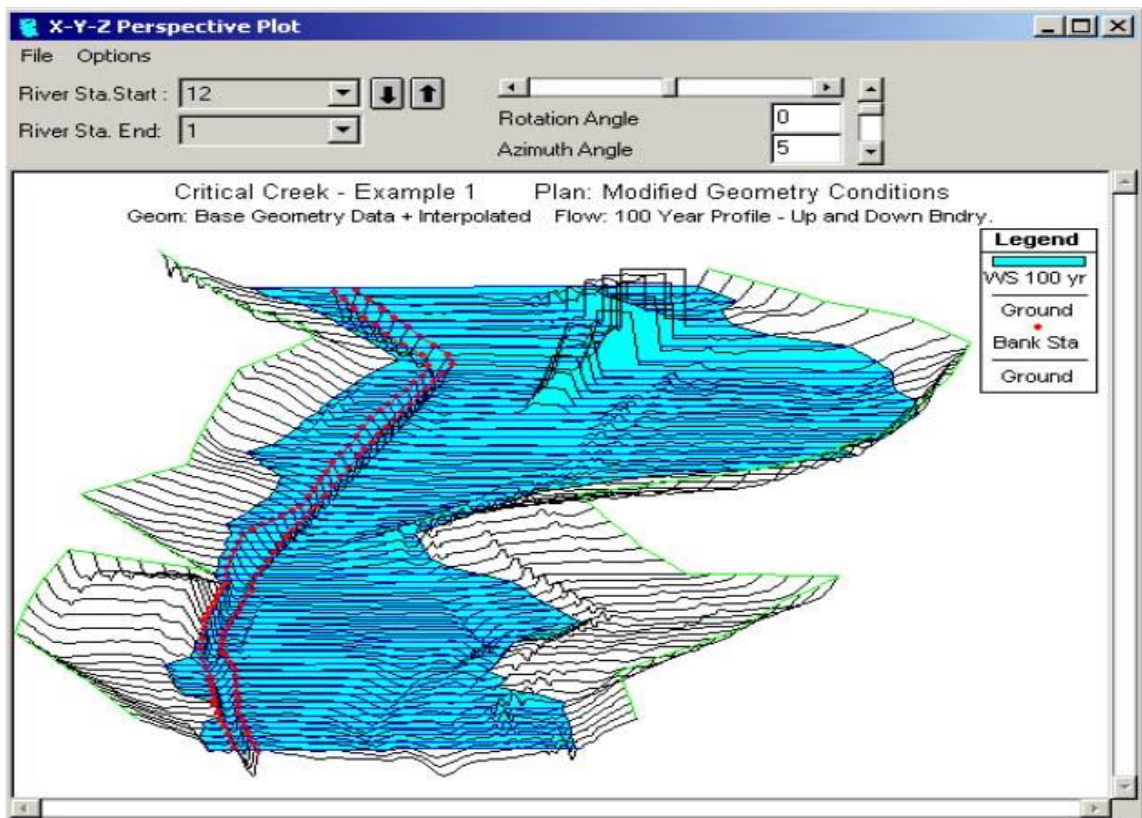


Рисунок 2.9 – Просторова візуалізація результатів (XYZ)

**Cross Section Output**

File Type Options Help

River: Critical Cr. Profile: 100 yr

Reach: Upper Reach Riv Sta: 12

Plan: Modified Geo Critical Cr. Upper Reach RS: 12 Profile: 100 yr

Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (ft)	1816.02		
Vel Head (ft)	0.48		
W.S. Elev (ft)	1815.54		
Crit W.S. (ft)	1814.46		
E.G. Slope (ft/ft)	0.004567		
Q Total (cfs)	9000.00		
Top Width (ft)	915.30		
Vel Total (ft/s)	3.01		
Max Chl Dpth (ft)	11.94		
Conv. Total (cfs)	133182.4		
Length Wtd. (ft)	100.00		
Min Ch EI (ft)	1803.60		
Alpha	3.41		
Frctn Loss (ft)	0.54		
C & E Loss (ft)	0.04		
Wt. n-Val.	0.100	0.040	0.100
Reach Len. (ft)	100.00	100.00	100.00
Flow Area (sq ft)	2473.60	342.47	177.74
Area (sq ft)	2473.60	342.47	177.74
Flow (cfs)	5748.43	3068.15	183.42
Top Width (ft)	699.71	45.00	170.59
Avg. Vel. (ft/s)	2.32	8.96	1.03
Hydr. Depth (ft)	3.54	7.61	1.04
Conv. (cfs)	85065.5	45402.7	2714.3
Wetted Per. (ft)	702.56	50.80	170.61
Shear (lb/sq ft)	1.00	1.92	0.30
Stream Power (lb/ft s)	2.33	17.22	0.31
Cum Volume (acre-ft)	216.87	42.90	10.36
Cum SA (acres)	79.60	6.44	7.92

Errors, Warnings and Notes

Energy gradeline for given WSEL.

Рисунок 2.10 – Детальні табличні результати

**Profile Output Table - Standard Table 1**

File Options Std. Tables User Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: Exist Cond River: Critical Cr. Reach: Upper Reach Profile: 100 yr

Reach	River Sta	Q Total (cfs)	Min Ch EI (ft)	W.S. Elev (ft)	Crit W.S. (ft)	E.G. Elev (ft)	E.G. Slope (ft/ft)	Vel Chnl (ft/s)	Flow Area (sq ft)	Top Width (ft)	Froude # Chl
Upper Reach	12	9000.00	1803.60	1815.06	1814.46	1815.76	0.006851	10.51	2558.45	878.61	0.69
Upper Reach	11	9000.00	1800.70	1810.42	1810.42	1811.87	0.008552	12.03	1734.74	562.38	0.82
Upper Reach	10	9000.00	1794.40	1804.46	1803.69	1804.98	0.010276	10.48	2478.11	914.50	0.79
Upper Reach	9	9000.00	1788.70	1799.31	1799.31	1800.16	0.008851	11.48	2719.81	1216.82	0.80
Upper Reach	8	9500.00	1784.30	1793.89	1793.89	1795.08	0.008613	12.38	2524.66	1110.69	0.81
Upper Reach	7	9500.00	1777.20	1789.88	1788.87	1791.00	0.007410	13.16	2155.56	526.61	0.76
Upper Reach	6	9500.00	1774.50	1784.29	1784.29	1786.35	0.011143	13.38	1266.30	332.38	0.93
Upper Reach	5	9500.00	1768.50	1776.81	1776.81	1778.18	0.013216	13.55	1830.26	583.34	0.97
Upper Reach	4	9500.00	1763.00	1773.44	1772.23	1773.88	0.004991	9.32	2988.72	760.42	0.59
Upper Reach	3	9500.00	1759.40	1767.29	1765.75	1769.34	0.019810	16.09	1610.99	621.76	1.20
Upper Reach	2	9500.00	1753.60	1761.54	1760.03	1762.10	0.009413	10.36	2323.62	682.71	0.79
Upper Reach	1	9500.00	1747.40	1756.71	1755.71	1757.21	0.010002	9.91	2403.99	728.01	0.79

Рисунок 2.11 – Зведені профільні таблиці

Характерні результати визначення рівнів води та параметрів хвилі прориву дамби Печенізького водосховища наведені на рис. 2.12 та 2.13.

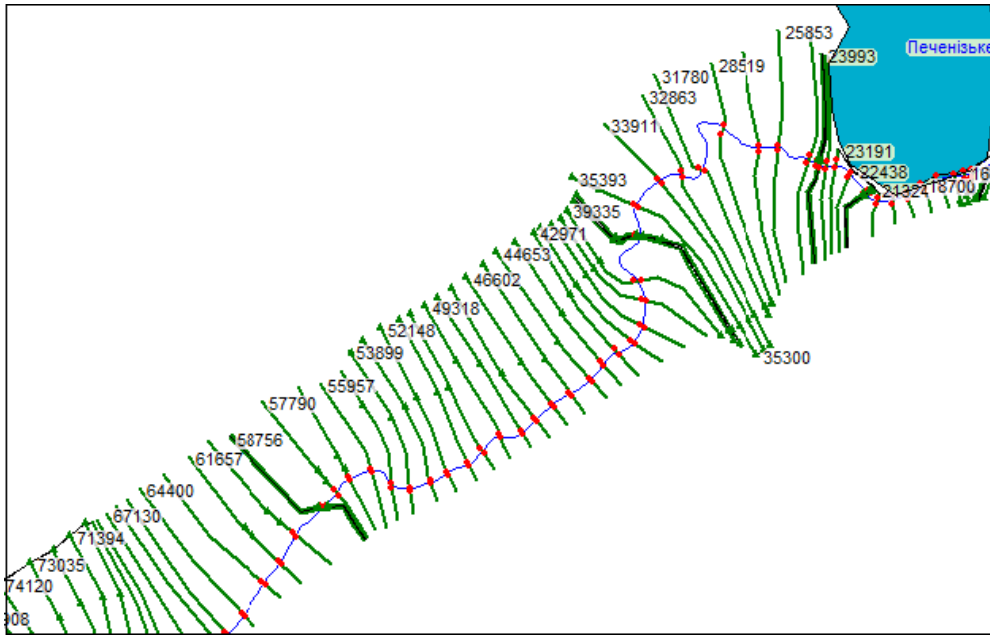


Рисунок 2.12 – Геометрія створів

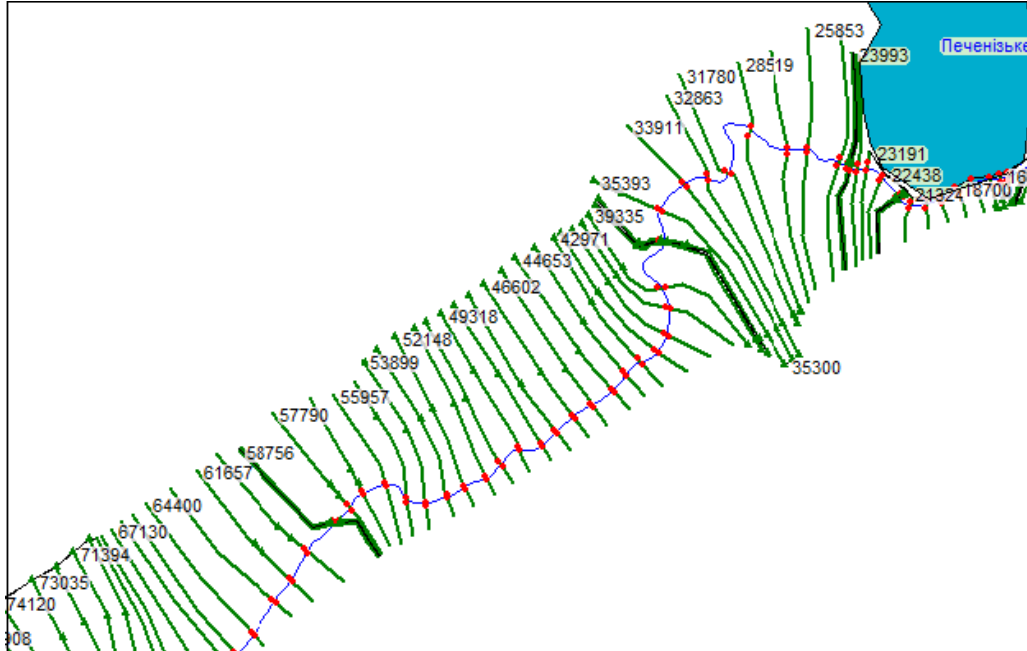


Рисунок 2.13 – Результати розрахунку хвилі прориву

Таким чином, результати моделювання хвилі прориву, отримані за допомогою програмного комплексу HEC-RAS, мають нелінійний характер і змінюються як у просторі, так і в часі (рис.2.14).

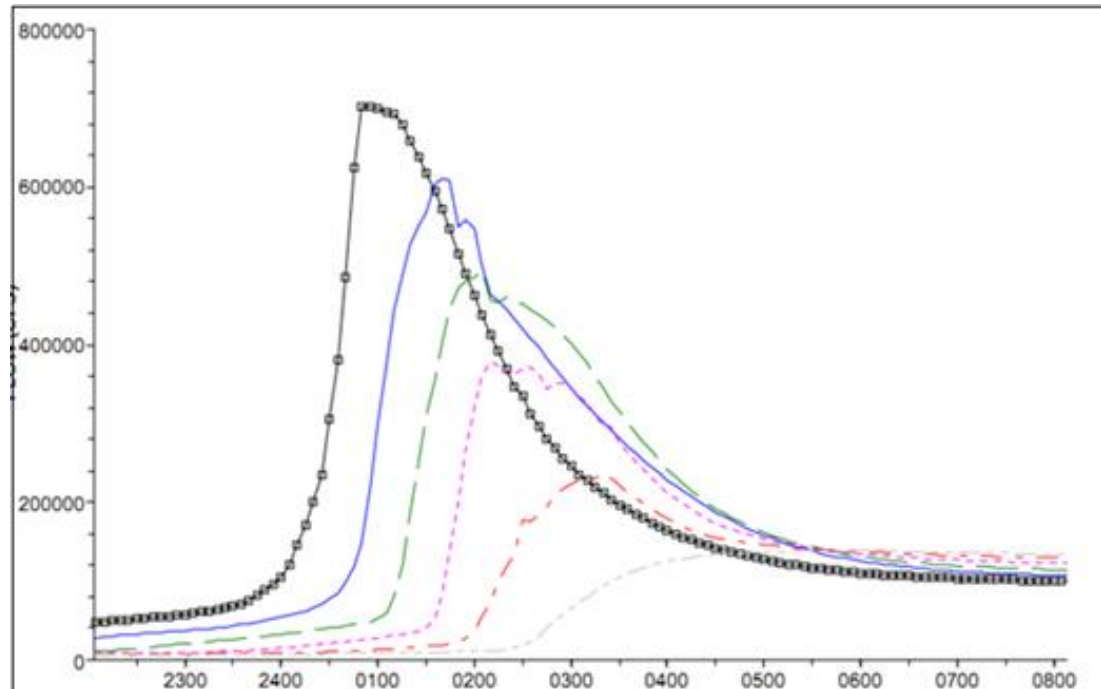


Рисунок 2.14 – Результуючі дані

Це ускладнює безпосереднє визначення зон затоплення та обумовлює необхідність подальшої інтеграції результатів гідравлічного моделювання з геоінформаційними системами для просторового аналізу та картографування зон ризику.

### 2.3 Висновки до розділу

У другому розділі розроблено та обґрунтовано методику підготовки вихідних даних для моделювання наслідків можливого прориву дамби Печенізького водосховища. Розглянуто теоретичні засади математичного опису нестационарного руху водних потоків і процесів турбулентного перенесення, що виникають у нижньому б'єфі водосховища під час аварійного скиду значних обсягів води.

На основі програмного комплексу HEC-RAS сформовано гідродинамічну модель досліджуваної ділянки та виконано серію розрахунків для різних сценаріїв пошкодження гідротехнічної споруди. За результатами моделювання отримано основні параметри хвилі прориву, зокрема рівні водної поверхні, швидкість течії, глибини затоплення та часові характеристики поширення потоку вздовж русла річки Сіверський Донець.

Встановлено, що результати гідравлічних розрахунків мають виражений просторово-часовий характер і потребують подальшої інтеграції з геоінформаційними системами для їх комплексного аналізу та візуалізації. Отримані моделі є основою для побудови карт затоплення, визначення меж потенційно небезпечних територій, оцінювання паводкових ризиків та обґрунтування заходів щодо підвищення рівня безпеки населення й об'єктів критичної інфраструктури.

### 3 ВИЗНАЧЕННЯ ЗОН РИЗИКУ ПРИ МОЖЛИВОМУ ПРОРИВІ ДАМБИ ЗАСОБАМИ ГІС

Процес побудови просторової моделі зон затоплення є багатоступеневим і передбачає послідовне виконання низки аналітичних та обчислювальних операцій. На початковому етапі необхідно здійснити аналіз вихідних даних та визначити ключові об'єкти і параметри, які будуть включені до геоінформаційної моделі. До таких об'єктів належать гідрологічні пости, руслова мережа, межі басейнів, рельєф місцевості, а також елементи інфраструктури, що потенційно потрапляють у зону затоплення.

Визначення складу вхідних даних на початку моделювання є принципово важливим, оскільки від цього залежать вибір методів інтерполяції, кількість можливих сценаріїв та значення параметрів, що задаються на кожному етапі побудови поверхні. Хоча інструменти геостатистичного аналізу забезпечують надійні параметри за замовчуванням, автоматизовані алгоритми не здатні врахувати специфіку досліджуваного явища, особливості території та цілі моделювання. У зв'язку з цим формування достовірної моделі зон затоплення потребує поетапного уточнення та коригування на основі аналізу результатів і знання фізичних процесів поширення води.

#### 3.1 Характеристика вихідних даних

Ефективність та просторова точність моделювання гідрологічного режиму та оцінки зон затоплення в басейні річки Сіверський Донець безпосередньо залежать від якості, повноти та топологічної коректності вихідної інформації. У межах виконання практичного етапу дослідження здобувачем було сформовано та систематизовано комплексний масив різномірних вихідних даних (атрибутивних, векторних та растрових),

адаптованих для подальшої аналітичної обробки у відкритій геоінформаційній системі QGIS.

Увесь обсяг залученої інформації за своєю структурою та функціональним призначенням розподілено на чотири базові блоки:

– морфометричні та локалізаційні характеристики гідрологічних постів. До цієї групи увійшли систематизовані дані щодо просторового розміщення та технічних параметрів пунктів спостереження Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС) та Укргідрометцентру, розташованих у межах басейну р. Сіверський Донець у Харківській області. В атрибутивні таблиці геоданих здобувачем внесено географічні координати постів, їхні номенклатурні номери, відмітки нулів постів у Балтійській системі висот (БС-77) та історичні гідрологічні максимуми;

– динамічні показники рівнів води. Даний блок містить хронологічні ряди спостережень за рівнями води на визначених гідрологічних постах, прив'язані до конкретних розрахункових дат та часових інтервалів (зокрема періодів проходження екстремальних паводків та весняного водопілля). Ці дані представлені у вигляді структурованих табличних матриць і слугують основою для побудови розрахункових поверхонь водотоків та калібрування гідравлічних моделей;

– базові векторні шари гідрографічної та селитебної мереж. Для забезпечення просторового аналізу та візуалізації результатів здобувачем сформовано набір шарів у поширеному ГІС-форматі шейп-файлів (Shapefile / .shp), який має повну сумісність із середовищем QGIS.

Картографічна основа та матеріали дистанційного зондування. Для просторової прив'язки, верифікації елементів рельєфу та генералізації об'єктів використано цифрову карту Харківської області масштабу 1:100 000 (рис. 3.1). Цей масштаб забезпечує оптимальний рівень деталізації для регіонального та субрегіонального рівнів моделювання, дозволяючи чітко ідентифікувати межі заплав, бровки терас та елементи транспортної інфраструктури.

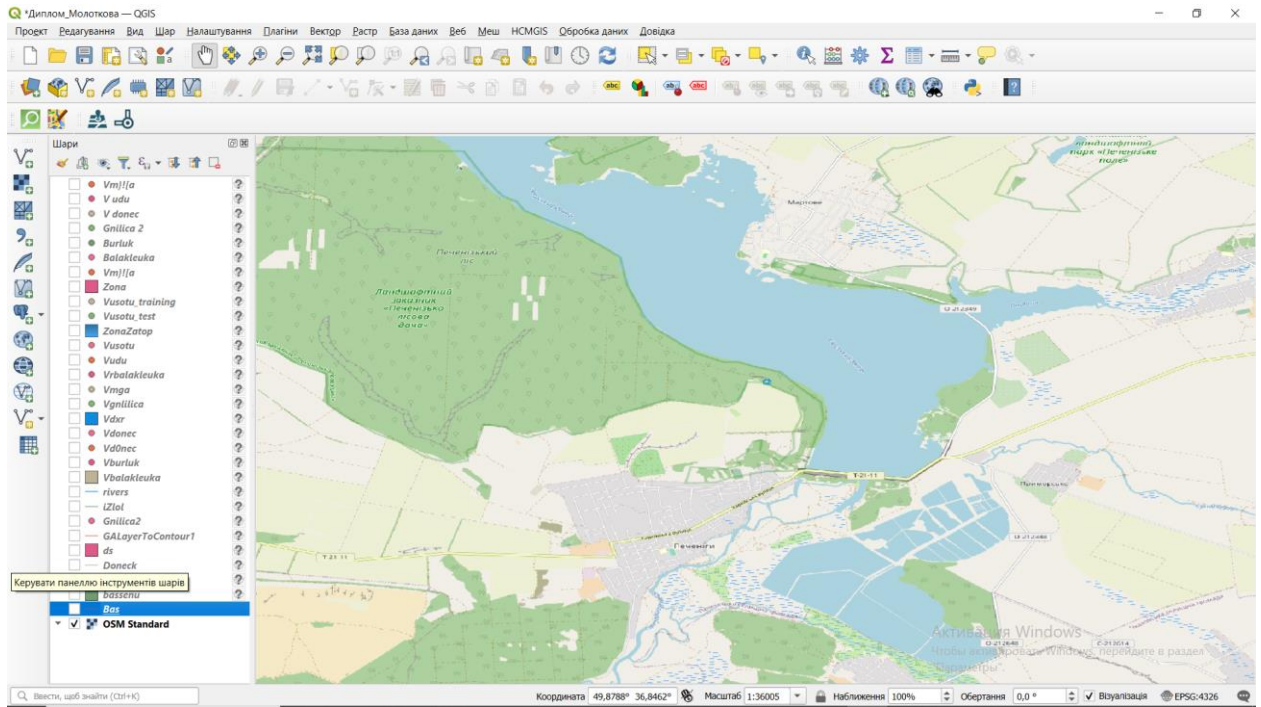


Рисунок 3.1 – Цифрова карта Харківської області масштабу 1:100 000

Структура векторних моделей містить:

– полігональний шар водосховищ Харківської області (із деталізацією дзеркала Печенізького водосховища) (рис. 3.2);

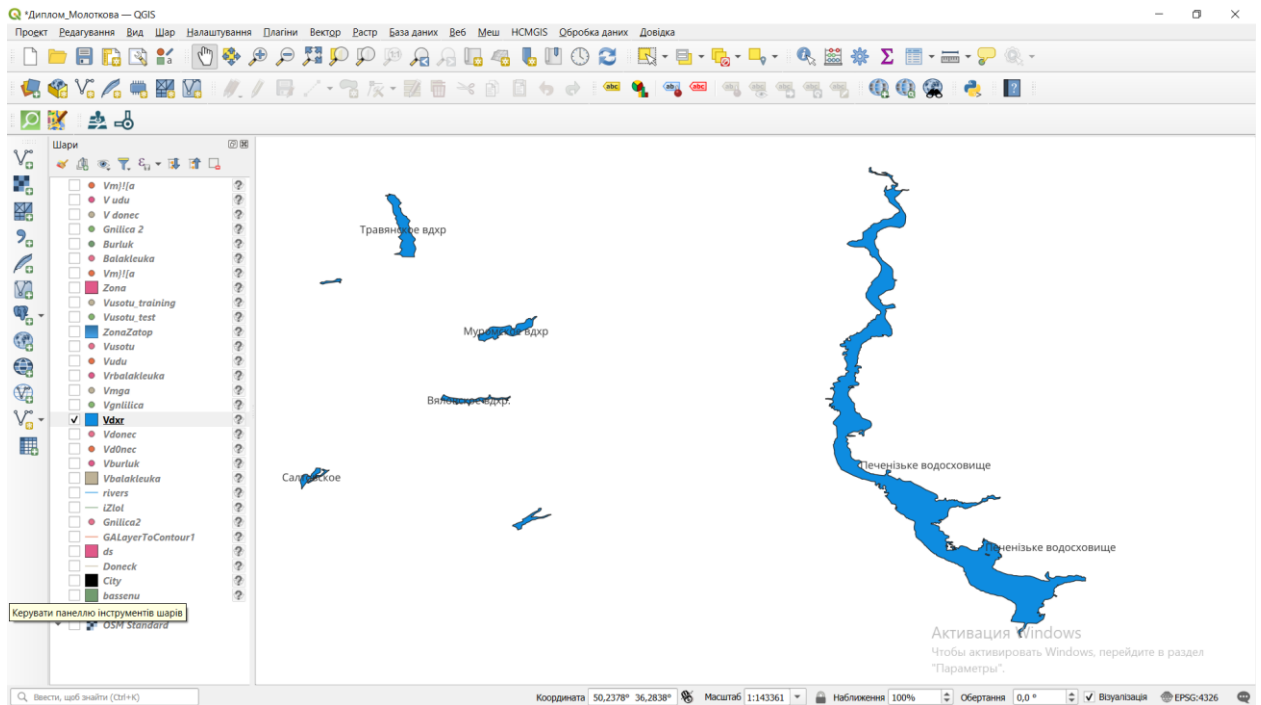


Рисунок 3.2 – Полігональний шар водосховищ Харківської області

– лінійні шари русла річки Сіверський Донець та її численних проток, рукавів і стариць (рис. 3.3) (що є критично важливим для коректного відображення гідродинамічної зв'язності);

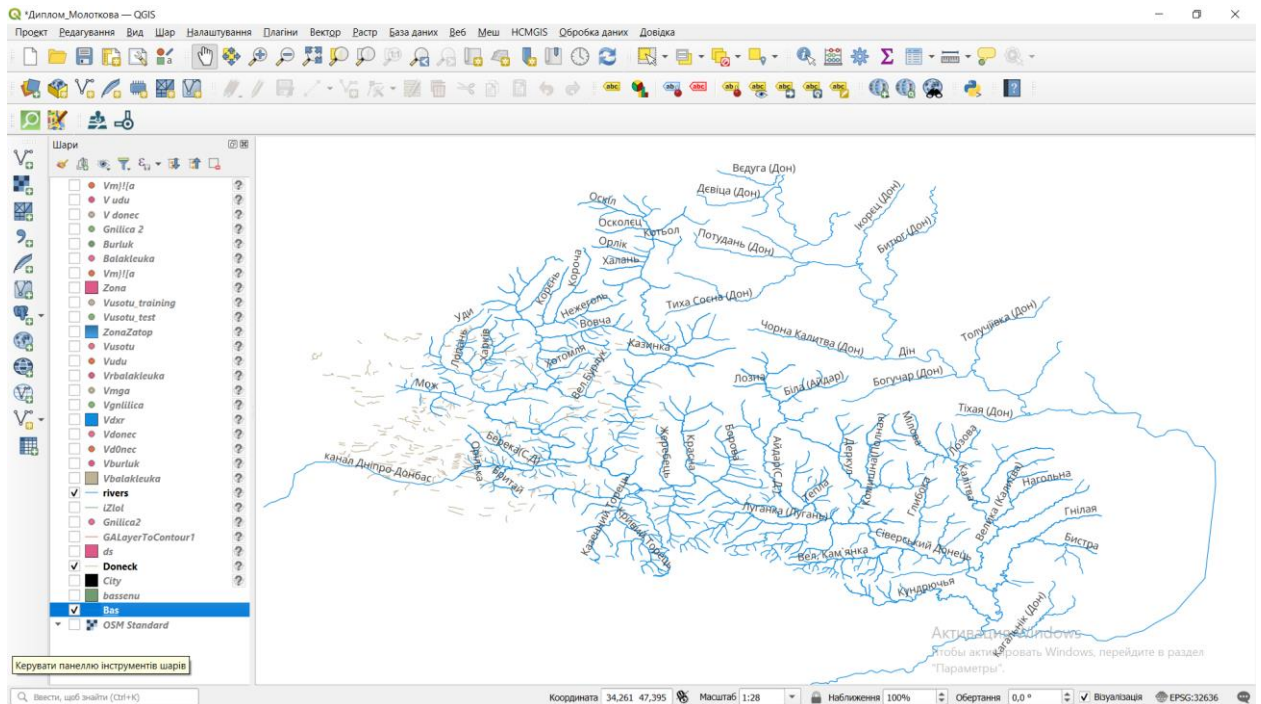


Рисунок 3.3 – Лінійні шари русла річок

– полігональні шари населених пунктів регіону (рис. 3.4);

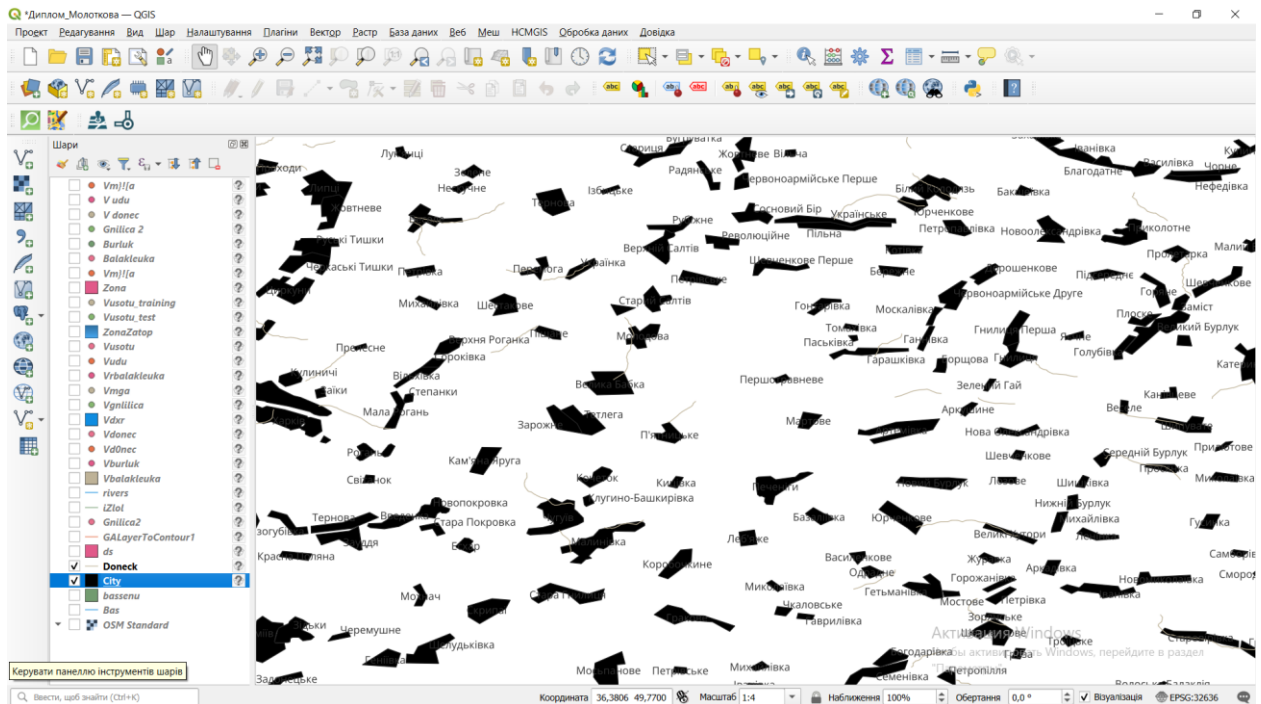


Рисунок 3.4 – Полігональні шари населених пунктів регіону

– полігональний шар басейнів річок (рис. 3.5);

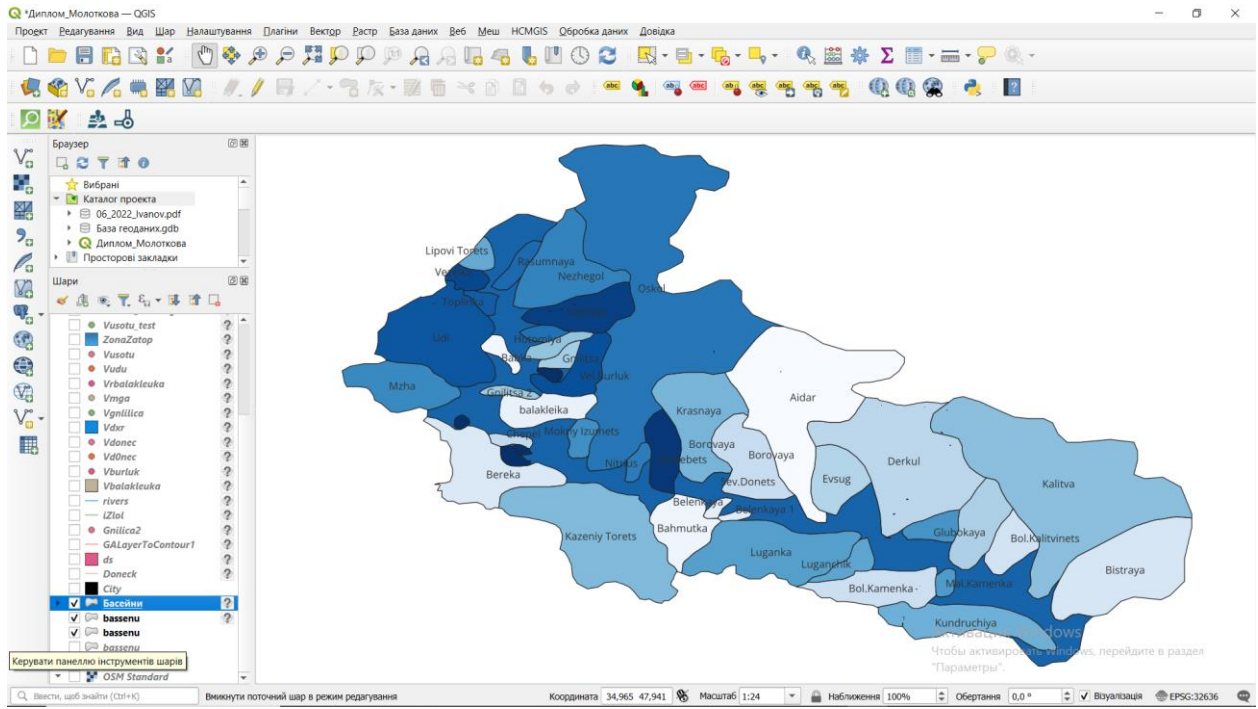


Рисунок 3.5 – Басейни річок

– точковий шар висоти (рис. 3.6);

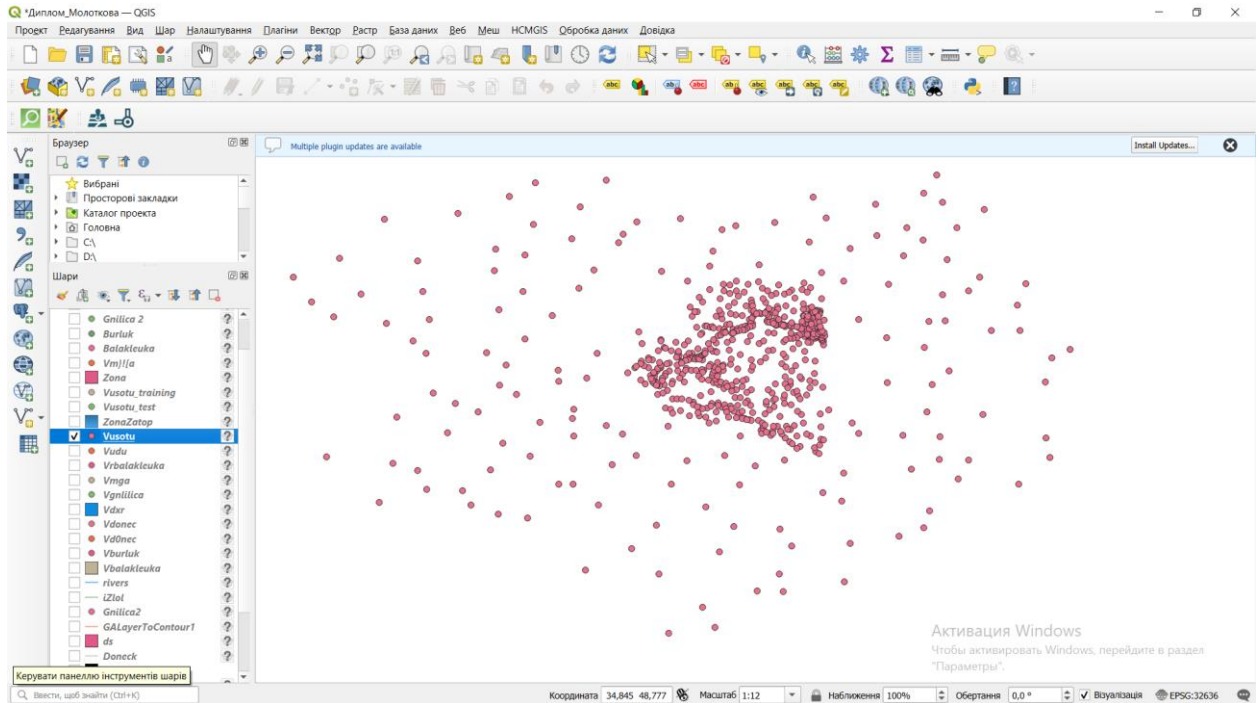


Рисунок 3.6 – Точковий шар висоти

– лінійний шар ізолінії (рис. 3.7);

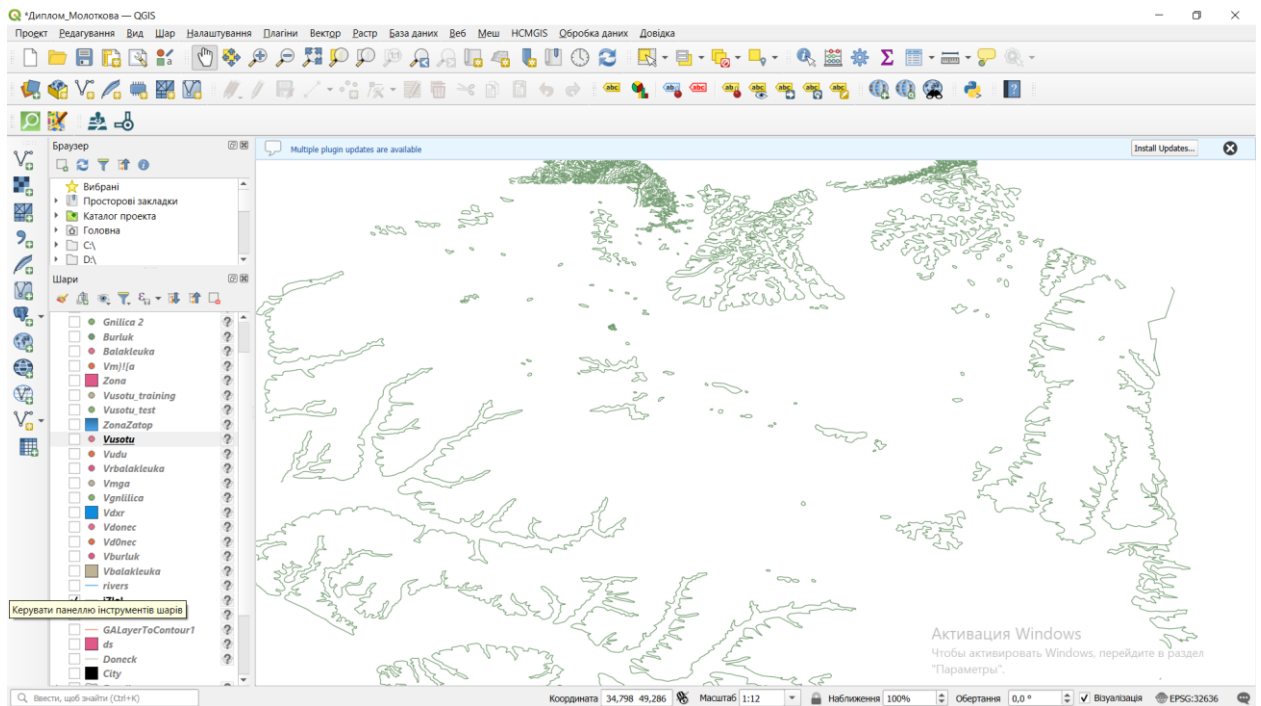


Рисунок 3.7 – Лінійний шар ізолінії

— шари разом (рис. 3.8);

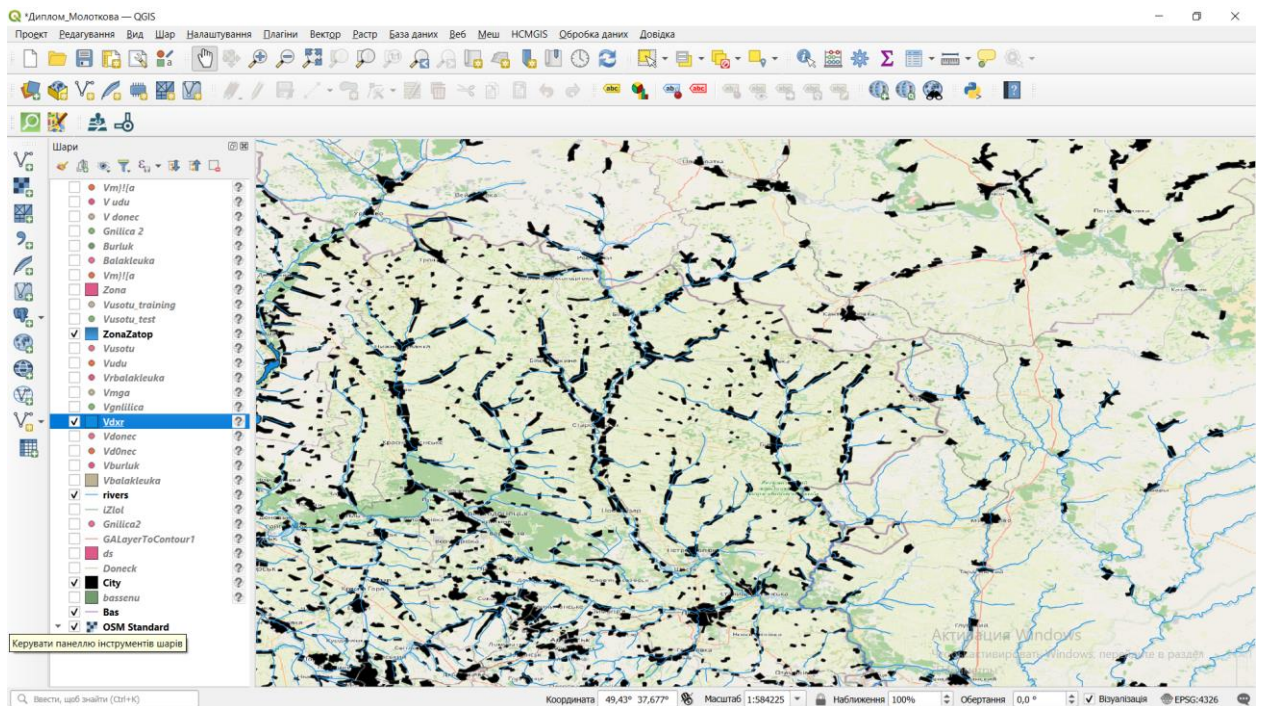


Рисунок 3.8 – Шари разом

З метою забезпечення коректності виконання просторових операцій у середовищі QGIS, усі вищезазначені вихідні дані були приведені до картографічної проекції UTM Zone 36N на еліпсоїді WGS-84 (рис. 3.9), що

мінімізує лінійні та площинні спотворення при розрахунках площ потенційного затоплення територій.

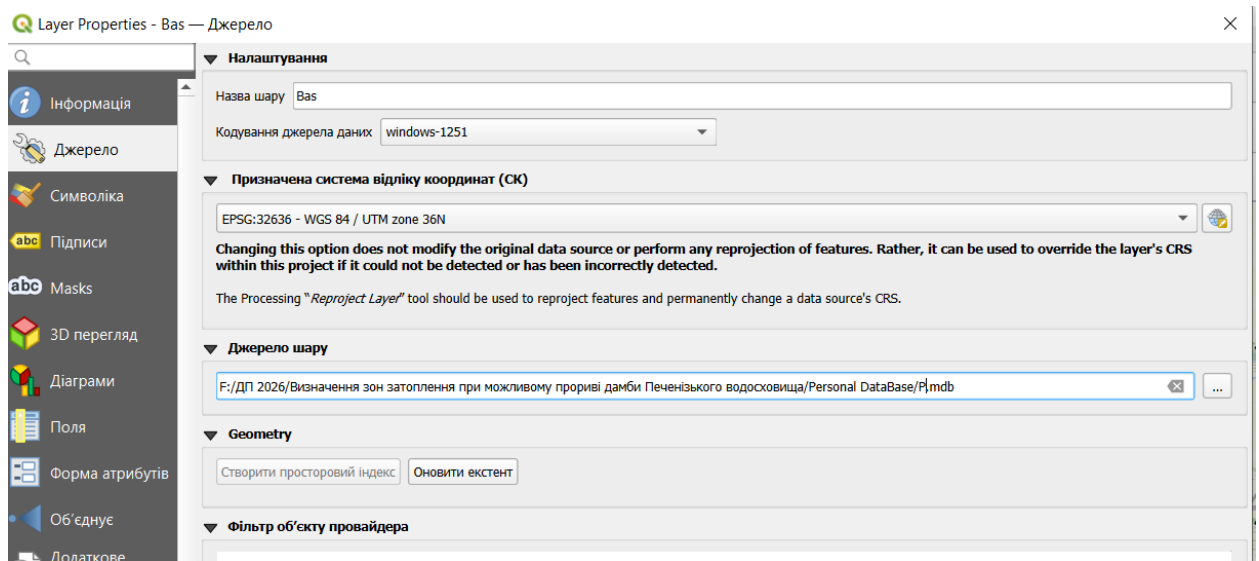


Рисунок 3.9 – Приведення вихідних даних до картографічної проекції UTM Zone 36N на еліпсоїді WGS-84

### 3.2 Процедура визначення зон затоплення при підвищенні рівнів води

Для побудови поверхні рівнів води використовувалися методи просторової інтерполяції, зокрема метод крігінгу та метод зворотно зважених відстаней (IDW).

Інтерполяційний ґрид методом IDW (Inverse Distance Weighted або зворотно-зважених відстаней) у QGIS створюється для оцінки невідомих значень на основі найближчих точок вимірювань. Для цього найчастіше використовують вбудований інструмент «Інтерполяція» або алгоритми бібліотеки GRASS GIS.

Покроковий алгоритм побудови в QGIS:

– відкриття інструменту. Переходимо у Панель аналізу (Processing Toolbox) та знаходимо інструмент IDW Interpolation (у групі «Інтерполяція») (рис. 3.10);

- налаштування параметрів. Векторний шар (Vector layer) – обираємо шар із точками;
- інтерполяційний атрибут (Interpolation attribute). Обираємо числову колонку таблиці, значення якої треба інтерполювати. Натискаємо кнопку "+", щоб додати поле до списку обробки;
- визначення розміру та меж (Extent). У полі Extent обираємо випадальний список та натискаємо Розрахувати з шару (Calculate from layer), обравши межі досліджуваної території. Вказуємо Кількість стовпців і рядків (або розмір пікселя) для вихідного растру (що менший піксель, то детальніший, але "важчий" ґрид);
- генерація ґрида. У полі Interpolated вказуємо шлях, де зберегти новий файл формату .tif, або залишаємо його тимчасовим.;
- натискаємо Виконати (Run) (рис.3.11-3.12).

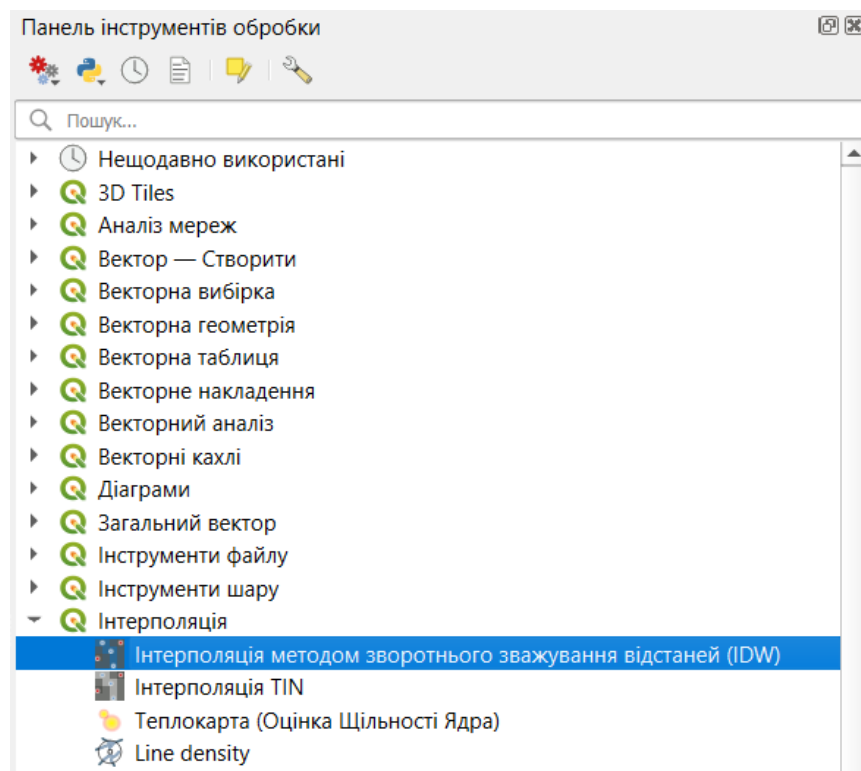


Рисунок 3.10 – Інструмент IDW Interpolation

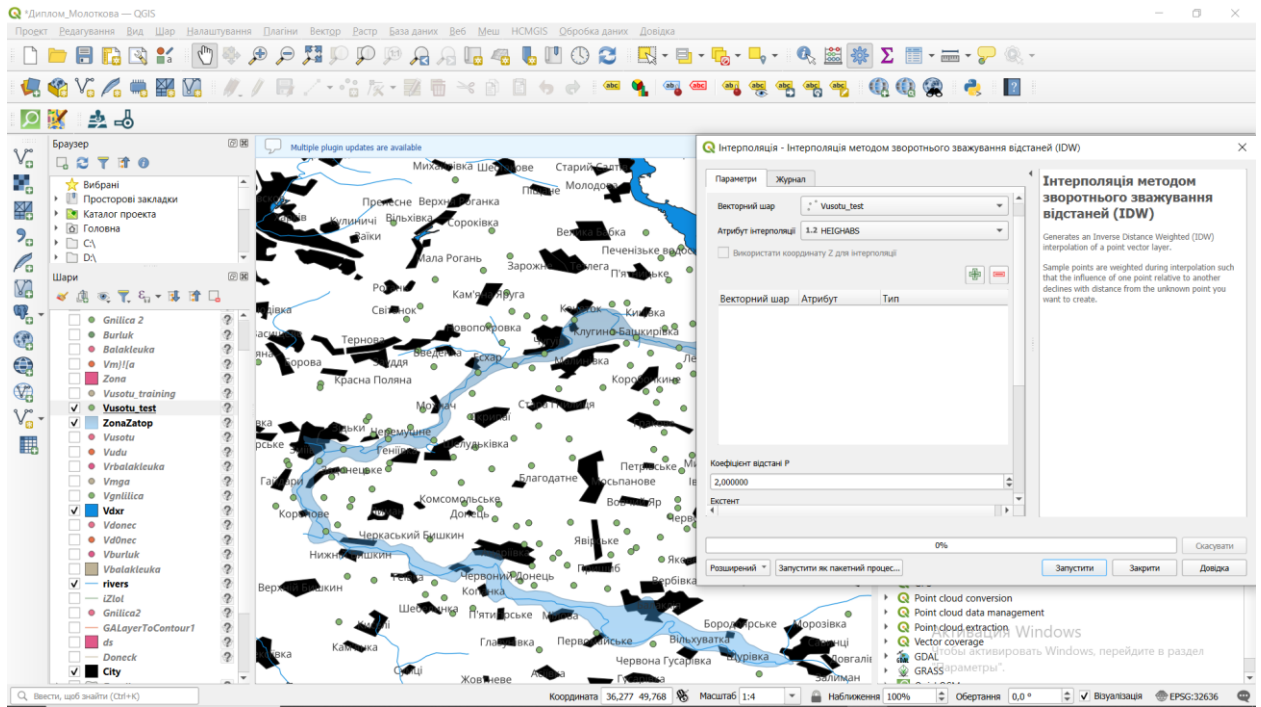


Рисунок 3.11 – Налаштування параметрів інтерполяції

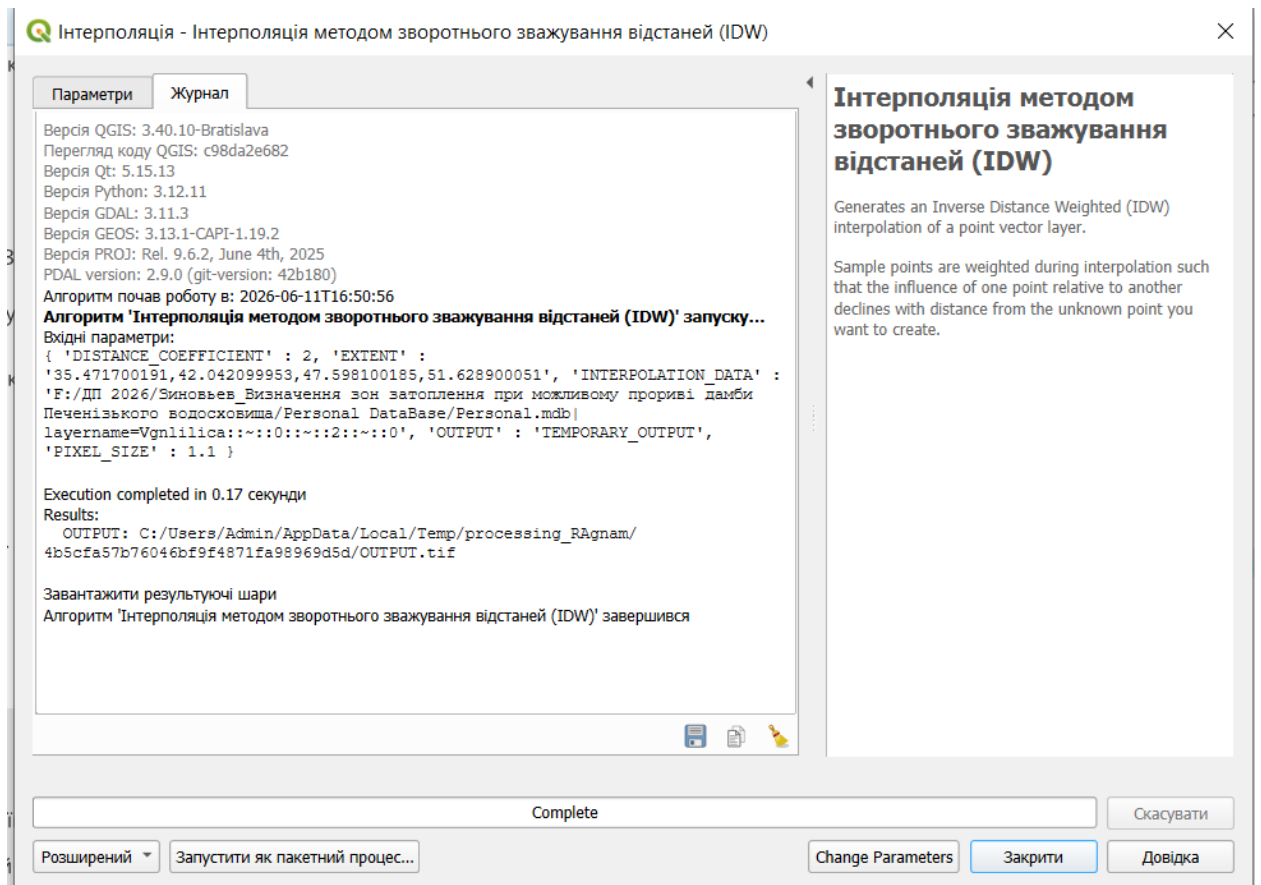


Рисунок 3.12 – Завершення процесу інтерполяції

Інтерполяційний ґрид, побудований методом IDW, наведено на рисунку 3.13.

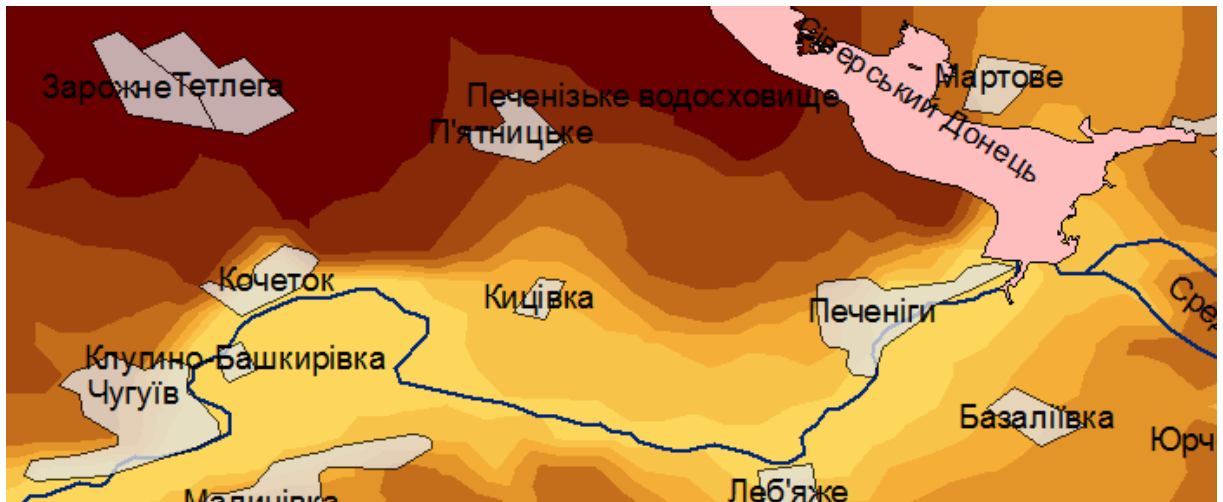


Рисунок 3.13 – Інтерполяційний ґрид, побудований методом IDW

Метод крігінгу базується на припущенні, що просторові варіації природних явищ мають стохастичну природу та характеризуються просторовою автокореляцією. Зазначена автокореляція описується за допомогою варіограм, що дозволяє не лише прогнозувати значення в невимірних точках, а й оцінювати похибку прогнозу. Завдяки цьому крігінг є ефективним інструментом аналізу просторових закономірностей та моделювання поверхонь рівнів води.

Інтерполяційний ґрид, побудований методом крігінгу, наведено на рисунку 3.14.



Рисунок 3.14 – Інтерполяційний ґрид, побудований методом Kriging

Метод зворотно зважених відстаней визначає значення комірок растрової поверхні на основі зваженої суми значень опорних точок, де вага кожної точки є функцією відстані до інтерпольованої комірки. Чим ближче опорна точка, тим більший її вплив на результат. Цей метод ґрунтується безпосередньо на фактичних вимірюваннях і не потребує побудови складних статистичних моделей, що робить його зручним для задач оперативного прогнозування.

Для подальшого моделювання було обрано метод IDW, оскільки він дозволяє отримати згладжену поверхню рівнів води, яка безпосередньо базується на вимірних даних гідрологічних постів і є більш стабільною при використанні обмеженої кількості опорних точок.

### 3.3 Басейновий підхід до визначення зон затоплення

Басейновий підхід розглядає річковий басейн як єдину екосистему. Він передбачає прогнозування зон затоплення та управління ризиками не в окремих населених пунктах, а в межах усього водозбору. Це дозволяє врахувати взаємозв'язок між верхів'ями річок, їхніми притоками та гирлами.

Визначення зон затоплення доцільно здійснювати з використанням басейнового підходу, який враховує природну структуру водозборів та гідрологічні зв'язки між окремими ділянками території.

Апробацію басейнового підходу виконано на основі даних максимальної (95%-ної забезпеченості) повені, наведених у таблиці 3.1.

Застосування такого підходу дозволяє забезпечити узгодженість меж зон затоплення в межах суміжних басейнів і підвищити достовірність результатів моделювання.

На основі отриманих даних було сформовано векторний шар, що відображає розподіл об'єктів за басейнами, представлений на рисунку 3.15.



### 3.4 Визначення зон затоплення при можливому прориві дамби Печенізького водосховища

На основі вихідних гідрологічних даних були побудовані інтегровані інтерполяційні ґриди, що об'єднують результати для окремих басейнів у єдину просторову модель. Інтерполяційний ґрид затоплення території при максимальній повені наведено на рисунку 3.16, а ґрид, що моделює сценарій можливого прориву дамби Печенізького водосховища, – на рисунку 3.17.

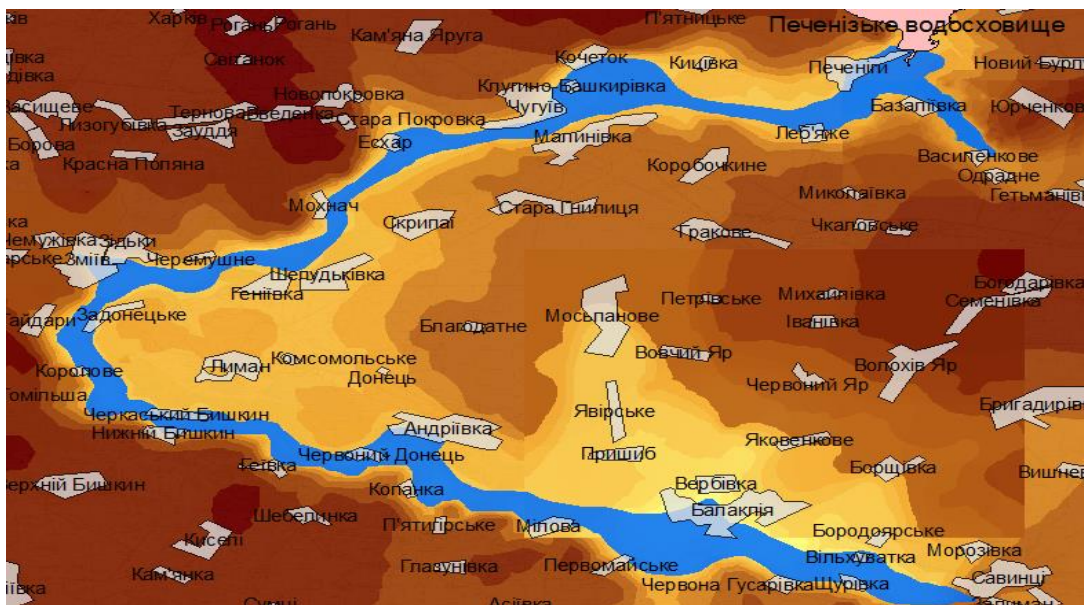


Рисунок 3.16 – Інтерполяційний ґрид затоплення території при максимальній повені

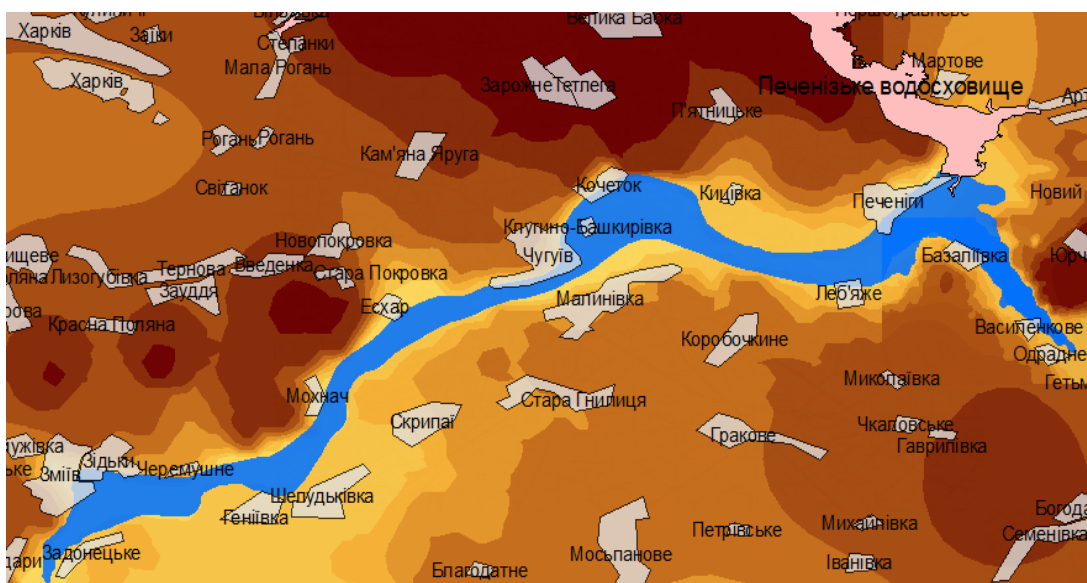


Рисунок 3.17 – Інтерполяційний ґрид при можливому прориві дамби

Візуалізація результатів моделювання на карті масштабу 1:100 000 подана на рисунку 3.18, що дозволяє оцінити просторове поширення зон затоплення та їх взаємодію з населеними пунктами й об'єктами інфраструктури.



Рисунок 3.18 – Інтерполяційний ґрид при можливому прориві дамби Печенізького водосховища (М 1:100 000)

Основні об'єкти ризику затоплення при можливому прориві дамби Печенізького водосховища наведені на рисунку 3.19.

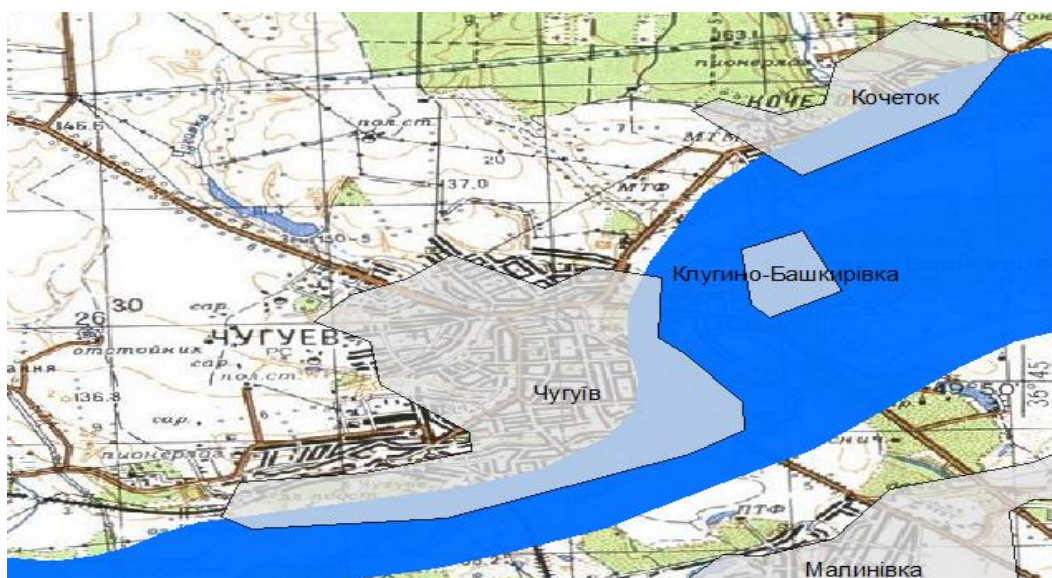


Рисунок 3.19 – Основні об'єкти ризику затоплення при можливому прориві дамби Печенізького водосховища

Результати дослідження свідчать, що розроблена геоінформаційна технологія є придатною для визначення зон затоплення при можливому прориві дамби Печенізького водосховища. До зони потенційного ризику потрапляють м. Чугуїв (додаток В), смт Кочеток та інші населені пункти, а також об'єкти критичної інфраструктури, зокрема Кочетокська водопровідна станція, яка забезпечує питною водою населення міста Харкова. Результати моделювання збігають з моделлю, отриманою за допомогою HEC-RAS (додаток Б). Це підкреслює важливість застосування ГІС-моделювання для завчасного прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій та підтримки управлінських рішень у сфері цивільного захисту.

### 3.4 Висновки до розділу

У третьому розділі виконано геоінформаційне моделювання зон затоплення на основі результатів гідравлічних розрахунків. Проведено інтеграцію даних HEC-RAS з цифровою моделлю рельєфу та картографічною основою в середовищі ГІС. Побудовано карти поширення зон затоплення для різних сценаріїв прориву дамби, визначено площі затоплення та потенційно небезпечні ділянки. Отримані результати підтверджують ефективність застосування ГІС-технологій для просторового аналізу наслідків аварій на гідротехнічних спорудах та можуть бути використані для планування заходів цивільного захисту і територіального управління.

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Загальні відомості

Охорона праці є важливою складовою системи управління будь-якої організації та спрямована на забезпечення безпечних і здорових умов праці працівників. Вона охоплює комплекс правових, соціально-економічних, організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та профілактичних заходів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини в процесі трудової діяльності.

Відповідно до Закону України [11] та Кодексу законів про працю України кожен працівник має право на належні, безпечні та здорові умови праці. Роботодавець зобов'язаний забезпечити функціонування системи управління охороною праці, здійснювати контроль за станом виробничого середовища та впроваджувати заходи щодо попередження професійних ризиків.

Особливого значення питання охорони праці набувають під час виконання робіт, пов'язаних із використанням комп'ютерної техніки та геоінформаційних систем. Тривала робота з цифровими картами, базами просторових даних та засобами моделювання потребує створення ергономічних умов праці, дотримання режимів праці та відпочинку, а також забезпечення належних параметрів мікроклімату й освітлення.

В сучасних умовах цифровізації та розвитку геоінформаційних технологій важливим напрямом є впровадження ризик-орієнтованого підходу до управління безпекою праці. Такий підхід передбачає своєчасне виявлення потенційних небезпек, оцінювання виробничих ризиків та розроблення превентивних заходів щодо їх мінімізації. Це сприяє підвищенню ефективності роботи персоналу, зниженню рівня професійних захворювань та створенню комфортного виробничого середовища.

### 4.2 Характеристика лабораторного приміщення

Дослідження виконувалося в комп'ютерній лабораторії, призначеній для проведення навчальних і наукових робіт із використанням геоінформаційних систем, засобів просторового аналізу та комп'ютерного моделювання. Лабораторія розташована на другому поверсі двоповерхової цегляної будівлі та складається з чотирьох робочих приміщень.

Загальна площа лабораторії становить 80 м<sup>2</sup>, висота приміщень – 3 м. У приміщеннях одночасно працюють до 11 осіб. Таким чином, площа та об'єм приміщення, що припадають на одного працівника, відповідають вимогам чинних нормативних документів щодо організації робочих місць користувачів персональних комп'ютерів.

Приміщення характеризується нормальними умовами експлуатації: є сухим, опалюваним та не містить агресивних середовищ, що дозволяє віднести його до категорії приміщень без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом. Робочі місця обладнані персональними комп'ютерами, моніторами, мережевими обладнаннями та периферійними пристроями.

Для створення сприятливих умов праці внутрішнє оздоблення виконано у світлих тонах із достатніми коефіцієнтами відбиття світла. Вікна обладнані жалюзі для регулювання природного освітлення та усунення відблисків на екранах моніторів. Організація робочого простору відповідає ергономічним вимогам щодо розміщення комп'ютерної техніки та меблів.

#### 4.3 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Основним видом діяльності у лабораторії є робота з персональними комп'ютерами, геоінформаційними системами та спеціалізованим програмним забезпеченням для обробки просторових даних і моделювання надзвичайних ситуацій. У процесі роботи на працівників можуть впливати такі небезпечні та шкідливі фактори:

- електромагнітні поля, що створюються комп'ютерною технікою та мережевим обладнанням;
- підвищена яскравість екранів або виникнення відблисків, які можуть спричиняти зорову втому;
- накопичення статичної електрики на поверхнях обладнання;
- шум від роботи комп'ютерів, систем охолодження та периферійних пристроїв;
- недостатня або надмірна освітленість робочих місць;
- відхилення параметрів мікроклімату від нормативних значень;
- запиленість повітряного середовища, що може збільшуватися внаслідок електростатичного притягання пилу;
- нервово-емоційне навантаження, пов'язане з тривалою концентрацією уваги та роботою з великими обсягами інформації;
- перевтома органів зору внаслідок тривалої роботи за монітором.

Для зниження негативного впливу зазначених факторів необхідно забезпечувати дотримання санітарно-гігієнічних вимог до організації робочих місць, підтримувати нормативні параметри освітлення та мікроклімату, здійснювати регулярне технічне обслуговування обладнання, а також організовувати раціональні режими праці та відпочинку під час роботи з комп'ютерною технікою.

#### 4.4 Освітлення в лабораторії

Раціонально організоване освітлення є одним із найважливіших факторів забезпечення безпечних та комфортних умов праці під час роботи з комп'ютерною технікою. Від рівня освітленості робочих місць значною мірою залежить працездатність користувачів, ступінь зорового навантаження, швидкість виконання робіт та загальне самопочуття працівників.

У досліджуваній лабораторії використовується комбінована система освітлення, яка включає природне та штучне освітлення. Природне освітлення здійснюється через бічні світлові прорізи (вікна), що забезпечують надходження денного світла до робочої зони.

Відповідно до вимог чинних будівельних норм України для приміщень, у яких виконуються роботи високої точності з використанням персональних комп'ютерів, нормативне значення коефіцієнта природної освітленості (КПО) повинно становити не менше 1,5–2,0 %. Для досліджуваного приміщення приймається нормативне значення КПО 1,8 %, що відповідає вимогам до приміщень адміністративного та навчально-дослідного призначення.

Штучне освітлення лабораторії реалізоване у вигляді системи загального рівномірного освітлення. Для освітлення використовуються сучасні світлодіодні світильники, які характеризуються високою енергоефективністю, тривалим терміном експлуатації та низьким рівнем пульсацій світлового потоку.

Загальне освітлення розміщується таким чином, щоб світловий потік рівномірно розподілявся по всій площі приміщення та не створював прямих або відбитих відблисків на екранах моніторів. Світильники встановлені паралельно лінії зору користувачів і розташовані збоку від робочих місць.

Нормативні значення освітленості для робіт, пов'язаних із використанням персональних комп'ютерів, наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Нормативні параметри освітлення робочих місць з ПК

Точність зорової роботи	Мінімальний розмір об'єкту	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової праці	Контраст об'єкту фону	Характеристика фону	Нормоване значення освітлення		
						Природне		Штучне
						$e_i^{III}, \%$	$e_i^{IV}, \%$	$L_{min}, \text{лк}$
Висока точність	0,3..0,5	III	Г	Середній	Світлий	2	1,35	300-500

Рівень освітленості на поверхні робочих столів у лабораторії підтримується в межах 300–500 лк, що відповідає нормативним вимогам для приміщень з постійним використанням відеодисплейних терміналів.

Для забезпечення комфортних умов роботи необхідно обмежувати пряму та відбиту блискучість. Яскравість світлових поверхонь, які потрапляють у поле зору користувача, не повинна перевищувати 200 кд/м<sup>2</sup>. Яскравість відблисків на екрані монітора має бути мінімальною та не перевищувати нормативних значень.

Особливу увагу приділяють рівномірності розподілу яскравості в полі зору працівника. Співвідношення яскравості між робочими поверхнями не повинно перевищувати 3:1, а між робочими поверхнями та навколишніми об'єктами – 5:1. Дотримання цих вимог сприяє зменшенню втоми органів зору та підвищенню продуктивності праці.

Для регулювання інтенсивності природного освітлення на вікнах встановлено жалюзі, які дозволяють уникати засліплення працівників та появи відблисків на моніторах. Система штучного освітлення обладнана окремими групами вимикачів, що забезпечує можливість регулювання освітленості залежно від часу доби та умов роботи.

#### 4.5 Безпека праці під час роботи з геоінформаційними системами та засобами моделювання

Виконання геоінформаційного аналізу та моделювання зон затоплення пов'язане з тривалою роботою за персональним комп'ютером із використанням спеціалізованого програмного забезпечення QGIS та HEC-RAS. Особливістю таких робіт є необхідність постійної взаємодії з великими обсягами просторових даних, цифровими моделями рельєфу, картографічною інформацією та результатами математичного моделювання.

Під час роботи з геоінформаційними системами значне навантаження припадає на органи зору, опорно-руховий апарат та нервову систему

користувача. Для зменшення негативного впливу необхідно дотримуватися ергономічних вимог до організації робочого місця. Відстань від очей користувача до екрана монітора повинна становити 50–70 см, верхня межа екрана має розташовуватися на рівні очей або трохи нижче.

Для попередження перевтоми рекомендується дотримуватися регламентованих перерв у роботі. Під час виконання тривалих операцій з просторовим аналізом і моделюванням доцільно через кожні 1–2 години роботи проводити короткочасні перерви для відпочинку очей та зміни положення тіла.

Особливу увагу необхідно приділяти збереженню результатів досліджень. Використання резервного копіювання даних, хмарних сховищ та систем архівування дозволяє уникнути втрати результатів моделювання внаслідок технічних несправностей або аварійного вимкнення електроживлення.

Під час експлуатації комп'ютерної техніки забороняється використовувати несправне обладнання, пошкоджені кабелі живлення та самостійно виконувати ремонт електронних пристроїв без відповідної кваліфікації.

#### 4.6 Заходи безпеки в умовах надзвичайних ситуацій та воєнного стану

В умовах воєнного стану особливого значення набуває забезпечення безпеки працівників під час виконання професійної діяльності. Відповідно до рекомендацій Державної служби України з надзвичайних ситуацій та вимог цивільного захисту, персонал повинен бути ознайомлений із порядком дій під час повітряної тривоги, ракетної небезпеки, артилерійських обстрілів та інших надзвичайних подій.

У разі отримання сигналу «Повітряна тривога» працівники повинні припинити роботу, зберегти поточні результати досліджень, вимкнути електрообладнання (за наявності часу) та організовано перейти до

найближчого укриття. Повернення до роботи дозволяється лише після офіційного повідомлення про відбій тривоги.

Додаткову небезпеку можуть становити аварії на об'єктах критичної інфраструктури, зокрема пошкодження енергетичних об'єктів, систем водопостачання або гідротехнічних споруд. У таких випадках необхідно діяти відповідно до затверджених планів реагування та інструкцій цивільного захисту.

Для забезпечення безперервності наукових досліджень рекомендується використовувати резервні джерела живлення, системи автоматичного збереження даних та хмарні сервіси для зберігання результатів моделювання. Це особливо актуально під час виконання складних гідродинамічних розрахунків, які можуть тривати значний час.

З огляду на тематику даної роботи, пов'язану з оцінюванням ризиків затоплення територій у разі руйнування гідротехнічних споруд, результати геоінформаційного моделювання можуть використовуватися органами цивільного захисту для планування евакуаційних заходів, визначення потенційно небезпечних зон та підвищення готовності населення до надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру.

#### 4.7 Висновки до розділу

На основі комплексного аналізу стану охорони праці та виробничої санітарії в умовах науково-дослідної лабораторії сформульовано такі науково-практичні висновки:

– оцінка системи управління охороною праці. Чинна на підприємстві система організації безпеки життєдіяльності та виробничої санітарії повністю інтегрована у робочий процес і відповідає актуальним нормативно-правовим актам України. Менеджмент установи забезпечує системний контроль за дотриманням регламентів техніки безпеки, що дозволяє мінімізувати ризики виникнення аварійних ситуацій;

– ергономічний аудит приміщення. За результатами розрахунків встановлено, що об'ємно-планувальні характеристики лабораторії (зокрема корисна площа, кубатура повітряного простору, параметри природного й штучного освітлення та показники мікроклімату) повністю задовольняють вимоги санітарних норм. За класифікацією приміщень об'єкт віднесено до категорій без підвищеної небезпеки;

– ідентифікація виробничих ризиків. Здобувачем деталізовано спектр потенційно шкідливих та небезпечних факторів, що виникають під час тривалої експлуатації комп'ютерної техніки та спеціалізованого обладнання. Особливу увагу приділено кумулятивному впливу електромагнітного випромінювання, статичної електрики, підвищеного зорового напруження та локального шумового навантаження на психофізіологічний стан персоналу;

– обґрунтування захисних рішень. У роботі систематизовано та верифіковано комплекс інженерно-технічних заходів, спрямованих на нейтралізацію виявлених загроз. Захисне заземлення (занулення) приладів, автоматизовані системи вентиляції та кондиціонування, а також сучасні схеми протипожежного захисту та раціонального освітлення визнано ефективними та такими, що відповідають критеріям промислової ергономіки;

– прогностичні рекомендації. Для підтримки високого рівня безпеки праці обґрунтовано необхідність впровадження безперервного моніторингу виробничого середовища та оптимізації графіку періодичних інструктажів із персоналом, що дозволить оперативно реагувати на динамічні зміни в технічному оснащенні лабораторії.

Підсумовуючи, сформоване виробниче середовище лабораторії характеризується як нормативне та безпечне. Чітке дотримання персоналом розроблених інструкцій та регламентів є базовою запорукою збереження їхнього здоров'я та підтримання стабільної ефективності праці.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі науково обґрунтовано та практично реалізовано концепцію інтеграції методів гідродинамічного моделювання та сучасних геоінформаційних технологій для комплексної оцінки й прогнозування наслідків аварій на гідротехнічних спорудах.

За результатами проведеного дослідження сформульовано такі основні висновки:

- методологічна цінність підходу. Доведено високу ефективність поєднання математичних алгоритмів розрахунку хвилі прориву з просторовим аналізом у середовищі ГІС;

- практична реалізація та регіональна специфіка. Розроблена геоінформаційна технологія була успішно апробована для моделювання гідродинамічних процесів у нижньому б'єфі Печенізького гідровузла за різними сценаріями руйнування греблі. У результаті цифрового моделювання просторово визначено території підвищеного техногенного ризику, до яких віднесено заплавні ділянки міста Чугуїв, селища міського типу Кочеток та низки інших прилеглих населених пунктів Харківської області;

- оцінка загроз для критичної інфраструктури. Особливу увагу в роботі приділено верифікації ризиків для об'єктів критичної інфраструктури регіону. Встановлено, що в зону потенційного затоплення потрапляє технологічний комплекс Кочетковської водопровідної станції. Оскільки зазначене підприємство здійснює централізоване питне водопостачання міста Харків, підготовлені прогнозні карти-схеми мають стратегічне значення для розробки превентивних інженерних рішень щодо захисту станції від затоплення.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В 1.1-25:2009 "Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення" [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3074293124562945479?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074293124562945479?doc_type=2)
2. Закон України «Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру» [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1809-14>
3. HEC-RAS [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/download.aspx>
4. Сайт esri.com [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
5. Сайт QGIS [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.qgis.org/>
6. Печенізьке водосховище [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [https://vodokanal.kharkov.ua/content/pechenezskoe\\_reservoir](https://vodokanal.kharkov.ua/content/pechenezskoe_reservoir)
7. Печенізьке водосховище [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://kolokray.com/services/pamyatki-prirodi/pechenezhskoe-vodohranilishche/>
8. О.І. Вайнберг, О.Л. Пальченко. Теорія проектування та експлуатація гідротехнічних споруд: Тексти лекцій для здобувачів вищої освіти спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології» другого (магістерського) рівня. Харків: ХНУБА, 2021. 166 с. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://gps.kh.ua/wp-content/uploads/2023/10/%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82%D0%B8-%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D0%B9.pdf>

9. Інженерна гідрогеологія : навч. посіб. / В. Ю. Єгупов, К. А. Немець, Г. Г. Стріжельчик ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Харків. нац. ун-т ім. В. Н. Каразіна. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 287 с. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/65488/1/2024%201%D0%9D%20%D1%80%D0%B5%D0%BF%D0%BE%D0%B7%20%D0%86%D0%BD%D0%B6%20%D0%B3%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B5%D0%BE%20doc%2009-04-2024.pdf>

10. Коцюрuba В.І., Прошин І.В. Удосконалена методика визначення параметрів руху хвилі прориву та затоплень під час зруйнування гідротехнічних споруд. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони № 1 (49)/2024 с. 69-76 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://sit.nuou.org.ua/article/download/301242/295493/700870>

11. Закон України «Про охорону праці» [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2694-12>

## Додаток А

## Дистанційний моніторинг Каховського водосховища



Рисунок А.1 - Супутникові знімки дамби Каховського водосховища:  
а) до підриву; б) після підриву



Рисунок А.2 - Деградація водних екосистем Каховського водосховища:  
а) стан на 02.06.2023 р.; б) стан на 04.07.2023 р.

Додаток Б

Результати моделювання оцінювання наслідків прориву дамби  
водосховища у HEC-RAS

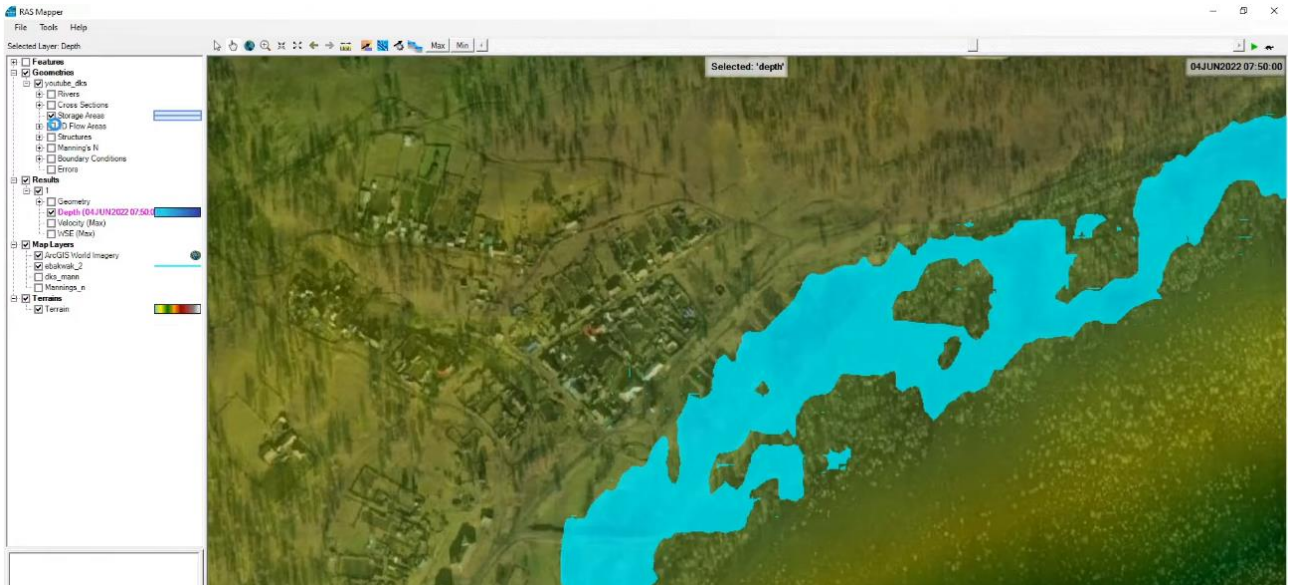


Рисунок Б.1 – Перша хвиля

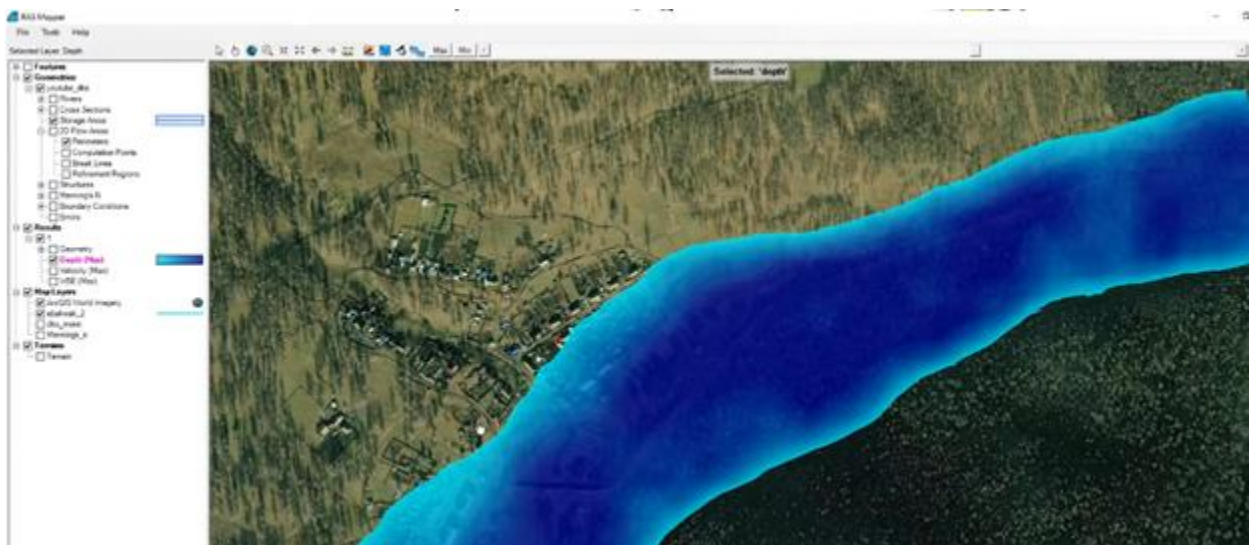


Рисунок Б.2 – Друга хвиля

## Додаток В

Місто Чугуїв при можливому прориву дамби Печенізького водосховища

