

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В.Н. КАРАЗІНА**

**Факультет геології, географії, рекреації і туризму**

*Кафедра фізичної географії та картографії*

*До захисту допустити*  
Зав. кафедри \_\_\_\_\_ доцент **Анатолій БАЙНАЗАРОВ**  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ГЕОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ НАСЛІДКІВ АВАРІЙ НА ГІДРОТЕХНІЧНИХ  
СПОРУДАХ НА ОСНОВІ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ (НА  
ПРИКЛАДІ ТРАВ'ЯНСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА)**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА**

Виконала: студентка 2-го курсу д.ф.з.о.  
групи ГГ- 21

спеціальність: 106 Географія

освітня програма: Географія

**Діана Олександрівна СІНЧУК**

Науковий керівник:

**доцент, к.пед.н. Катерина БОРИСЕНКО**

*Кваліфікаційна робота захищена з оцінкою*

\_\_\_\_\_  
Голова ЕК **Валентина РЕДІНА**  
\_\_\_\_\_  
Секретар ЕК **Тетяна БУЛГАКОВА**  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**Харків – 2025**

	2
<b>ЗМІСТ</b>	стр.
<b>ВСТУП</b> .....	3
<b>РОЗДІЛ I. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ</b> .....	6
1.1. Досвід попередніх досліджень .....	6
1.2. Термінологічний апарат роботи.....	15
1.3. Класифікація гідротехнічних споруд. Їхнє значення у господарській, безпековій та геополітичній сферах.....	17
1.4. Зарубіжні ГІС-портали прогнозу й моніторингу затоплень.....	22
<b>РОЗДІЛ II. ГЕОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТРАВ'ЯНСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ТА ТЕРИТОРІЇ МОЖЛИВОГО ЗАТОПЛЕННЯ</b> .....	27
2.1. Фізико-географічна характеристика території .....	27
2.2. Характеристика Трав'янського водосховища.....	33
2.3. Аналіз геоморфонів як чинника просторової диференціації затоплення .....	35
2.4. Соціальні особливості території, що потрапляє в зону можливого затоплення .....	40
<b>РОЗДІЛ III. ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ НАСЛІДКІВ АВАРІЇ НА ТРАВ'ЯНСЬКОМУ ВОДОСХОВИЩІ</b> .....	44
3.1. Концептуальна модель геоінформаційного моделювання наслідків аварій на ГТС .....	44
3.2. Розрахунки для укладання карти зон затоплення .....	46
3.3. Картографічна інтерпретація отриманих розрахунків .....	52
3.4. Оцінка відповідності результатів моделювання реальним наслідкам аварії.....	60
3.5. Аналіз наслідків аварії на Трав'янському водосховищі згідно розробленої моделі.....	67
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	72
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	74
<b>ДОДАТКИ</b> .....	81

## ВСТУП

Аварії на гідротехнічних спорудах становлять одну з найбільш небезпечних техногенних загроз, наслідки яких можуть призвести до значних людських жертв, руйнування інфраструктури та деградації природного середовища. У сучасних українських реаліях постійної небезпеки обстрілів критичної для цивільних потреб інфраструктури, зокрема водопостачання, й зростання техногенного навантаження, питання картографування зон затоплення набуває особливої важливості. Трав'янське водосховище, як одне з найбільших у Харківській області, є стратегічним об'єктом водопостачання та регулювання стоку. Це робить його потенційною ціллю для обстрілів.

*Актуальність* дослідження обумовлена необхідністю удосконалення підходів до побудови карт зон затоплення з урахуванням локальних фізико-географічних особливостей території (геоморфонів), що забезпечує підвищення точності прогнозування наслідків аварій. Традиційні методи оцінки наслідків аварій часто не враховують локальні фізико-географічні чинники, що знижує точність прогнозів. Саме тому геоінформаційні технології (ГІС) стають ключовим інструментом аналізу, моделювання та візуалізації зон затоплення. Вони дозволяють інтегрувати різноманітні просторові дані з високою деталізацією. На прикладі Трав'янського водосховища, що виконує важливі цивільні та військові функції, розробка та апробація такої методики набуває особливої наукової та прикладної цінності.

*Об'єктом дослідження* виступає Трав'янське водосховище та прилеглі території, що потенційно потрапляють до розрахункової зони затоплення.

*Предметом дослідження* є географічні аспекти та картографічні методи моделювання наслідків затоплення територій у разі аварії на гідротехнічних спорудах.

*Мета* даної роботи полягає в обґрунтуванні та реалізації методики картографічного моделювання зон затоплення територій при аваріях на гідротехнічних спорудах з урахуванням географічного аналізу за допомогою сучасних ГІС-технологій та оцінці наслідків прориву Трав'янського водосховища при найбільш катастрофічному перебігу подій.

*Задачі дослідження:*

1. Проаналізувати існуючі теоретико-методологічні підходи щодо прогнозування наслідків прориву гідротехнічних споруд.
2. Охарактеризувати фізико-географічні та соціальні особливості досліджуваної території. Скласти характеристику водного об'єкту зокрема.
3. Укласти карту геоморфонів території, що потенційно потрапляє в зону впливу об'єкту дослідження.
4. Розробити алгоритм картографічного моделювання зон затоплення у середовищі ГІС.
5. Укласти карту затоплення територій при прориві Трав'янського водосховища та оцінити наслідки затоплення згідно укладеної моделі.

Більшість наявних досліджень, пов'язаних із об'єктом дослідження, мають екологічне спрямування, що характеризують його стан посезонно. Водночас робіт, у яких гідротехнічна споруда (ГТС) цього об'єкта розглядається крізь призму можливих аварійних ситуацій та картографічного моделювання зон потенційного затоплення, немає. Це пояснюється тим, що досі водосховище не ставало об'єктом досліджень у контексті тих самих водних конфліктів чи наслідків суттєвих руйнувань внаслідок бойових дій. Теоретико-методологічною базою даного дослідження стали праці вітчизняних учених, зокрема Р. Мурасова, Б. Тертишного, В. Коцюруби та І. Процина. Окрім використання методологічних підходів, запропонованих у наукових працях вищезазначених авторів, під час підготовки роботи залучено довідкові джерела, статистичні

матеріали та картографічні дані, а також використано інформацію, зібрану автором у процесі власних польових і аналітичних досліджень. До роботи інтегровано попередні напрацювання бакалаврської роботи, що дало змогу поглибити отримані раніше результати та забезпечити наступність у дослідженні магістерської роботи.

*Новизна* даного дослідження проявляється в удосконаленні підходу до географічного обґрунтування меж зон затоплення через інтеграцію морфометричного аналізу місцевості (зокрема геоморфонів) у ГІС-моделюванні. Також новизна полягає в розробленні напів автоматизованого алгоритму побудови карт зон затоплення, адаптованого не лише для Трав'янського водосховища з урахуванням фізико-географічних чинників.

Дотичні результати дослідження були попередньо апробовані та опубліковані у статті в періодичному науковому фаховому виданні, індексованому в міжнародній наукометричній базі Scopus [43]. Крім того, розроблені у межах роботи методичні та аналітичні матеріали впроваджено у практичну діяльність Регіонального офісу водних ресурсів у Харківській області та Харківської обласної військової адміністрації (додаток А).

Основним *методологічним підґрунтям* дослідження стали загальнонаукові методи (описовий, аналізу, синтезу, порівняння і узагальнення), доповнені суто географічними (картографічний та аерокосмічний). Додатково застосовано морфометричний аналіз рельєфу та класифікацію геоморфонів на основі цифрових моделей рельєфу у ГІС.

*Структура роботи.* Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаної літератури (60 найменувань). Робота викладена на 80 сторінках, і включає в себе 34 ілюстрації, 3 таблиці та 1 додаток.

## РОЗДІЛ І ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1. Досвід попередніх досліджень

Огляд попередніх методик та досліджень є важливою складовою будь-якої наукової праці, оскільки дозволяє систематизувати існуючі знання, виявити прогалини та недоліки в підходах, а також визначити найбільш ефективні методи для подальшого розвитку власного дослідження. Такий аналіз стає потужним інструментом на початку роботи. Він сприяє формуванню обґрунтованої методологічної бази, уникненню повторення вже відомих помилок і підвищенню якості дослідження шляхом інтеграції попереднього досвіду та власних інноваційних підходів.

Найбільш ґрунтовні дослідження, пов'язані з темою дослідження, розроблялися на базі *Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського*.

Серед основних робіт варто виокремити «Методику розрахунку наслідків при проривах гідротехнічних споруд критичної інфраструктури» Р. Мурасова та Б. Тертишного [1]. У своїй праці науковці встановили практичні наслідки, які виникають внаслідок руйнування ГТС, та провели порівняльний аналіз з наслідками впливу факторів зброї масового ураження. Цінність цієї роботи для подальшого виконання поставленого завдання полягає у розробленому алгоритмі методики розрахунку наслідків при проривах (руйнування) тіла греблі гідротехнічних споруд критичної інфраструктури. Також у роботі наведено приклад розрахунків для Каховського водосховища. Втім, як повноцінна методика розрахунку, що повністю закриватиме усі питання та вимоги до поставленого завдання, робота не задовольняє. Не дивлячись на це, розроблена методика Р. Мурасова та Б. Тертишного є базовою та необхідною для ознайомлення, адже вона дає доволі ґрунтовне теоретичне уявлення щодо поставленої проблематики.

Більш об'ємною та складнішою є робота В. Коцюрцби та І. Прощина [2], розроблена Національним університетом оборони України разом з Командуванням Сил підтримки Збройних Сил України. Ця методика, на відміну від попередньої, враховує вплив рельєфу русла на параметри руху прориву, що дає можливість зменшити неточності під час прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій на ГТС. Запропонована В. Коцюробою та І. Прощеним методика, на відміну від попередньої [1], додатково враховує динаміку зміни витрати води, що своєю чергою дає змогу зняти обмеження щодо впливу форми русла та долин на часові параметри руху хвилі прориву. Крім того, запропоновано об'ємну модель послідовної витрати напірного потоку води на розрахункових ділянках, що дає змогу спростити процедуру прогнозного оцінювання наслідків активного затоплення місцевості [2]. Саме наведена в цій праці методологія буде використовуватися у подальших розрахунках характеристик прориву ГТС Трав'янського водосховища.

Також вартими згадки джерелами є праці В. Коцюрцби у співавторстві з Д. Михайловським, Р. Черевко, І. Прощеним та Є. Камаловим [3], Ю. Стародуба та В. Багнюка [4]. Вищенаведені науковці й надалі розглядають способи моделювання та оцінки небезпеки при прориві гребель різних водних об'єктів.

Втім, жодна з розглянутих методик не дає відповіді на основну проблему завдання, себто не дає рішень або ж пропозицій, щодо способів картографування (окрім профілів, наведених у [2]). Виходячи з цього, алгоритм картографування буде розроблятися з нуля, звісно, що з урахуванням розрахунків, наведених у роботах вище.

Під час прориву гідротехнічних споруд ключовим завданням є визначення просторових меж і ступеня небезпеки потенційного затоплення. Створення відповідних карт вимагає врахування низки просторових чинників, зокрема морфометричних характеристик, структури гідрографічної мережі, типів землекористування, щільності забудови та розміщення критичної інфраструктури. Саме тому важливо розглядати затоплення не лише як

гідрологічне явище, а як *просторову подію*, що має безпосередній вплив на цілісність та сталість функціонування довколишніх геосистем.

Географічні аспекти такого аналізу охоплюють системну оцінку взаємозв'язку природного середовища й антропогенної діяльності в умовах ризику, що робить геоінформаційні технології незамінним інструментом у процесі картографування. У зв'язку з цим, важливим є критичний аналіз сучасних наукових та прикладних підходів до побудови карт затоплення, що дозволяє виявити ефективні методики, адаптовані до особливостей територіального устрою.

Одним із ключових напрямів у цьому контексті є аналіз історичних випадків проривів гідротехнічних споруд, що дозволяє не лише верифікувати ефективність картографічних методик, а й вивчити просторові закономірності розвитку надзвичайних ситуацій. Документування подібних подій у різних регіонах світу слугує емпіричною основою для аналізу впливу морфологічних, гідрологічних та антропогенних факторів на масштаби й характер затоплення.

У цьому аспекті важливою складовою є систематизація найрезонансніших випадків проривів дамб і гребель, що супроводжувалися масштабними гідрологічними наслідками, людськими жертвами та трансформацією ландшафтної структури. З метою візуалізації масштабів та характеру наслідків таких подій доцільно узагальнити найбільш відомі історичні приклади проривів ГТС (таблиця 1.1).

*Таблиця 1.1*

Відомі історичні випадки проривів ГТС та їх наслідки

<i>Об'єкт</i>	<i>Рік, країна</i>	<i>Короткий опис</i>
Гребля Саут-Форк	1889, США	Після кількох днів надмірних опадів, тіло греблі прорвалося. Потік води пройшов вниз за течією, зруйнувавши кілька міст. Загибло 2208 людей, а збитки склали понад 17 мільйонів доларів [5].

## Продовження таблиці 1.1

Гребля Мальпассе	1959, Франція	Прорив створив масивну хвилю прориву, або стіну води, заввишки 40 м, що рухалася зі швидкістю 70 км/год, зруйнувавши два невеликих села, Мальпассет і Бозон, будівельний майданчик автомагістралі, і через 20 хвилин, все ще стоячи на висоті 3 м досягши Фрежюса Внаслідок аварії 2 грудня 1959 року гребля Мальпассе була повністю зруйнована. Від неї залишилися лише невеликий блок на одному березі. [6].
Гребля Вайонт	1963, Італія	Катастрофа забрала життя від 2 до 3 тисяч осіб. У чашу водосховища за 45 секунд додався величезний гірський масив довжиною 2 км. Чаша водосховища виявилася заповненою гірською породою до висоти 175 м над рівнем води. Зсув викликав перелив води через гребінь греблі об'ємом понад 50 млн м <sup>3</sup> [7].
Гребля Тітон	1976, США	Гребінь дамби прогнувся та обвалився у водосховище. Через дві хвилини залишки правобережної третини головної стіни дамби розпалися. Понад 57 000 м <sup>3</sup> /с (що у багато разів перевищує середню швидкість потоку Ніагарського водоспаду та перевищує середній потік будь-якої річки світу, крім Амазонки) води, наповненої осадами, стікали через пролом 10 км до Каньйону річки Тітон, після чого потік ширився далі та обімлівав на долині річки Снейк [8].
Гребля Святого Франциска	1928, США	Через п'ять хвилин після обвалу хвиля повені заввишки 37 м пододала 2,4 км із середньою швидкістю 29 км/год, зруйнувавши електростанцію №2 та забравши життя 64 з 67 робітників та їхніх сімей, які жили неподалік. Це призвело до відключення електроенергії у значній частині Лос-Анджелеса та долини Сан-Фернандо [9, 13].
Дамба Болдвін-Гіллз	1963, США	Все почалося з ознак руйнування облицювання, потім перейшло в серйознішу течу через дамбу на її східному опорі. Через три години дамба прорвалася, і «знадобилося лише 77 хвилин, щоб вся вода вилілася на Кloverдейл-авеню, Ла-Бреа-авеню, Ла-Сьєнегу та Джефферсон-бульвар». Обвал призвів до викиду 1 100 000 м <sup>3</sup> води, що спричинило п'ять смертей та руйнування 277 будинків [10, 11].
Гребля Банцяо	1975, Китай	Обвал греблі спричинив третю за кількістю смертей повінь в історії, яка вразила загальну кількість населення 10,2 мільйонів осіб і затопила близько 30 міст та округів площею 12 000 км <sup>2</sup> . За оцінками, кількість загиблих коливається від 26 000 до 240 000 осіб. Повінь також спричинила руйнування від 5 до 6,8 мільйонів будинків [12].

Приклади найбільших техногенних катастроф на гідротехнічних спорудах, наведені в таблиці, демонструють основні закономірності, що відіграють важливу роль у розробці концептуальної моделі оцінки наслідків аварій на ГТС. Незалежно від місця розташування усі інциденти мають схожу просторову динаміку: миттєве руйнування греблі провокує лавиноподібне поширення водної хвилі вниз за течією з руйнівним впливом на населені території в заплавної зоні.

Особливо показовими в цьому контексті є події на греблі Саут-Форк, Вайонт та Баньцяо. Загальною особливістю цих катастроф стала недооцінка морфометричних параметрів річкової долини та нехтування природними особливостями рельєфу під час проектування ГТС. У випадку з Саут-Форк, аварійна ситуація була спричинена не в останню чергу недбалим ставленням до гідроспоруди (гребля часто протікала, її латали соломкою на глиною; деякі власники демонтовували та продавали водоспускні механізми, зроблені зі сталі [52]).

Водночас аналіз ситуацій із греблею Тітон та дамбою Болдвін-Гіллз підкреслює критичну важливість моніторингу стану гідротехнічних об'єктів та прилеглих територій. В обох катастрофах попередньо фіксувалися локальні деформації і зміни вологості ґрунтів, які могли бути своєчасно виявлені. Наприклад, водосховище Болдвін-Гіллз було споруджене безпосередньо на активній лінії розлому Ньюпорт-Інглвуд. Підстилаючі геологічні шари вважалися нестабільними для водосховища, і проєкт передбачав ущільнене ґрунтове покриття, призначене для запобігання просочуванню у фундамент, що, очікувано, не дало запроєктованого захисту [53]. На ті часи використання ГІС-аналізу, супутникових NDMI/NDSI-індексів та моделювання динаміки водних потоків, звісно що, було недоступним, але наразі, ці катастрофи лише підкреслюють важливість використання цих методів моніторингу на практиці задля запобігання аварій. Загалом такі події демонструють, що аварії на ГТС завжди мають складний природно-техногенний характер. Вплив катастроф

охоплює широкий спектр аспектів: гідрологічні, геоморфологічні, соціальні й економічні, які нерозривно пов'язані у своїх наслідках.

Повертаючись до аналізу джерел, пов'язаних із картографуванням наслідків подібних катастроф, варто зазначити, що більшість із них зосереджуються на розробленні карт прогнозованих повеней. У цьому контексті вартими уваги роботами є напрацювання А. Озкая [14, 15, 16]. У першому [14] дослідженні було створено основу для подолання труднощів у виборі належного методу маршрутизації паводків шляхом використання двох різних інструментів багатокритеріального аналізу рішень (MCDA), а саме TOPSIS та PROMETHEE, з чітко визначеними вирішальними критеріями, такими як метрики помилок, кількість параметрів моделі та фон моделі, за трьома сценаріям. Ця методика є доволі складною у математичному розрізі, але надзвичайно повною, для прогнозування поведінки та наслідків явища паводків. У роботі [15] автор у співавторстві з іншими науковцями Державного університету в Анкарі, розглядає наслідки картографування паводків на прикладі селища Карамустафа, а у роботі [16] проводить сезонний аналіз рівнів води греблі Сейхан за допомогою картографічних засобів.

Паводкам свої дослідження присвячують і С. Шрехста в співавторстві з Д. Дахалом, що у своїх працях розглядають та аналізують допомогу інтегрованих ГІС та багатокритеріальних структури для оцінки ризиків [17, 18, 19]. Також, вартими огляду науковцями є М. Войтек та Я. Вотейкова, що у одній зі своїх робіт розглядають картографування схильностей певних територій до повеней у розрізі національного масштабу [20].

Якщо розглядати вітчизняні доробки з паводків, то систематичні дослідження з проблем протипаводкового захисту та руслових процесів розпочалися в шістдесяті роки двадцятого, століття, коли на основі матеріалів польових і експериментальних досліджень на гідравлічних моделях розроблялися схеми регулювання русел річок в умовах проходження високих паводків. Головна увага тоді приділялася питанням стійкості дамб, розмиву

нижніх б'єфів гідротехнічних споруд та конструкціям в компонуванні активних гідротехнічних споруд тилу півзагат які на той час вважалися найбільш раціональним та ефективним засобом протипаводкового захисту заплавлених територій [21]. Подібний підхід є дотичним до проблематики поставленого завдання з приводу прогнозування наслідків катастрофічних ситуацій.

В розрізі подій сьогодення, схожі дослідження набувають неабиякої ваги. Утім, у більшості випадків картографуванню підлягають саме наслідки Подібні напрацювання дотичні до екологічного напрямку, і переважно розглядають катастрофічність наслідків для ландшафтів [22, 23].

Якщо говорити за прогнозування саме антропогенно спричиненого розливу, а не природнього паводку, то прикладом досліджень може стати діяльність Національної академії наук України (НАН України). Науковці НАН України спрогнозували характер затоплення територій Києва внаслідок прориву, що може бути допоміжним матеріалом для розроблення заходів своєчасного реагування на можливу катастрофу, попередження і захисту населення, захисту об'єктів особливого призначення. Прогноз складено для періоду інтенсивних обстрілів інфраструктури Києва, на кінець лютого – початок березня 2022 року, для гідрологічної ситуації весняного водопілля, що склалася на цей період. Характер затоплення визначається геометрією руйнування дамби і гідрологічною ситуацією на момент прориву: припливом води у Київське водосховище, рівнем води у водосховищі, підпірним рівнем нижче за течією Дніпра на верхньому б'єфі дамби Канівської ГЕС. За низького водопілля 2022 року головним чинником є рівень води у Київському водосховищі (рис. 1.1.) [24].

Отже, усі вище перелічені науковці розглядали поставлену проблему дотично, складаючи таким чином «повну» картинку методики та значення подібних досліджень. Їхні роботи охоплюють загальні принципи гідрологічного моделювання, аналізу ризиків та оцінки впливу надзвичайних ситуацій на природне середовище, що створює методологічне підґрунтя для подальших прикладних досліджень.

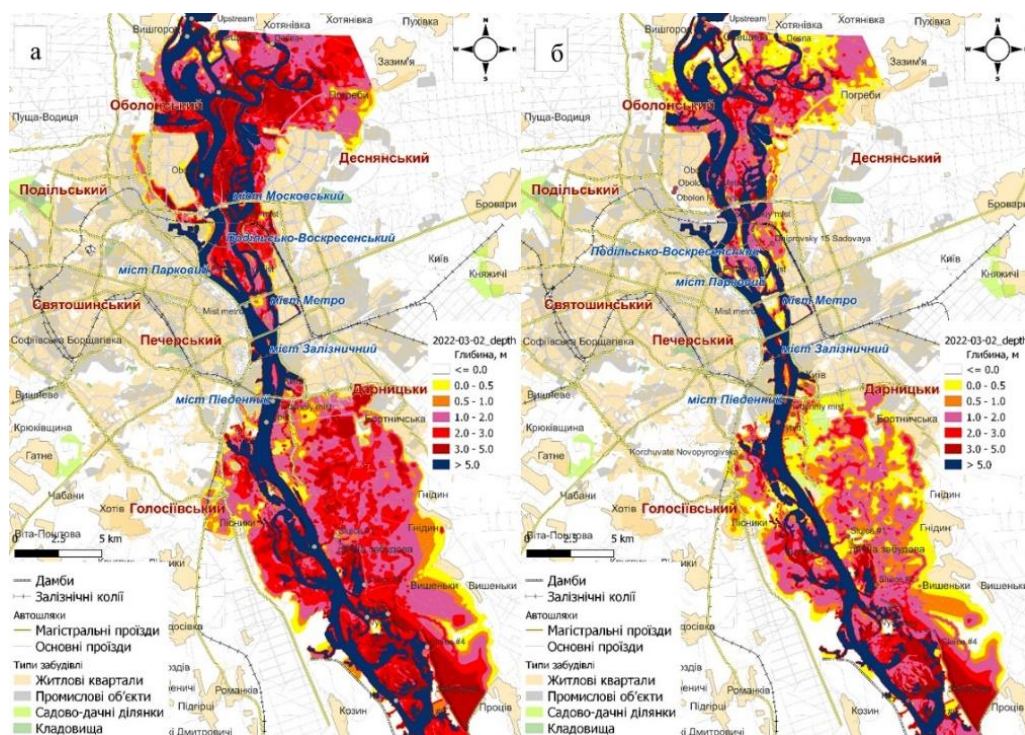


Рис. 1.1. Глибини затоплення берегів Києва при прориві дамби Київської ГЕС для проранів: а) завширшки 280 м і б) 100 м. [24].

Однак для повноцінного картографування можливих зон затоплення, що виникають унаслідок проривів ГТС чи інших гідротехнічних аварій, необхідно зосередити увагу саме на *географічному* аспекті – включно з аналізом рельєфу, гідроморфологічних умов, конфігурацій водозборів та локалізації інфраструктурних об'єктів. У цьому контексті доцільно проаналізувати науковий доробок авторів, які безпосередньо досліджували особливості побудови карт розливу водосховищ при надзвичайних гідротехнічних подіях в розрізі географічних характеристик.

Географічна складова є фундаментальною в дослідженнях, що стосуються затоплення територій та прогнозування наслідків їхнього впливу, оскільки вона дозволяє комплексно врахувати просторові закономірності та взаємозв'язки між природними й антропогенними чинниками. На відміну від суто інженерного або гідрологічного підходу, географічний аналіз охоплює топографічну структуру місцевості, морфологію русел, особливості землекористування, густоту населення та просторове розміщення об'єктів критичної інфраструктури. Це

забезпечує не лише побудову карт зон затоплення з високою просторовою точністю, а й оцінку потенційних соціально-економічних наслідків таких явищ. Зокрема, ГІС, дистанційне зондування Землі та просторове моделювання стають інструментами, що дозволяють інтегрувати дані з різних джерел і відтворити більш-менш реальні сценарії розповсюдження водної маси з урахуванням рельєфу та щільності забудови. Таким чином, географічний підхід забезпечує міждисциплінарний міст між теоретичними розрахунками і практичними рішеннями у сфері запобігання надзвичайним ситуаціям.

Фізико-орієнтований підхід до моделювання отримав широкий розвиток в останні роки для моделювання процесу руйнування дамб. Фан Лю та Сюйдун Фу використали цей підхід у своїй праці, присвяченій фізично-орієнтованому моделюванню процесу руйнування дамби Танцзяшань, спричиненої землетрусом Веньчуань 12 травня 2008 року в Китаї. Змодельований ними гідрограф потоку та процес руйнування загалом добре узгоджуються зі спостережуваними даними. Нестационарність та неоднорідність виявлені як суттєві характеристики процесу руйнування дамб. Аналіз чутливості показав, що коефіцієнт опору Меннінга та коефіцієнт еродованості в моделі Османа та Торна суттєво впливають на піковий розхід потоку, але мають менший вплив на час його виникнення, тоді як коефіцієнт затримки швидкості може суттєво впливати на певні параметри прориву [25]. Подібними дослідженнями також займалися К. Чіннарасрі, Т. Тінгсанчало [26], Чоу Вен Те [27], Д. Фрід та Л. Денні [28, 29, 30], М. Хірано [60] та інші.

Дослідження наслідків прориву гребель становлять окремий напрям у географії надзвичайних ситуацій. Вони зосереджені на аналізі фактичного впливу катастрофічного розливу води на довкілля, населення та інфраструктуру. На відміну від прогнозних моделей, ці дослідження ґрунтуються на емпіричних даних після події – зокрема супутникових знімках, топографічних зйомках, статистиці втрат і польових досліджень територій. Вивчаються масштаби затоплення, зміни руслових процесів, ерозійна активність, деградація ґрунтів,

забруднення вод, а також соціальні наслідки, як-от руйнування поселень, транспортної мережі та зміщення населення. Особливу увагу приділяють оцінці просторової конфігурації шкоди, що дозволяє покращити зонування ризиків у майбутньому. Такі дослідження не лише доповнюють моделювання, а й дають змогу критично переосмислити реалістичність сценаріїв, закладених у прогностичні підходи. Серед вітчизняних науковців, що працювали в цьому напрямку, можна назвати І. Саніна, Г. Люта [31] та П. Лопушинського, О. Проніна [32]. Роботи цих вчених присвячені зокрема досвіду прориву Каховської гідроспоруди.

## 1.2. Термінологічний апарат роботи

Формування термінологічного апарату є фундаментальним етапом дослідження, особливо в контексті специфічної тематики, пов'язаної з географічним обґрунтуванням і картографічним моделюванням зон затоплення при аваріях на ГТС. Визначення ключових понять і термінів дозволяє забезпечити однозначність тлумачень, уникнути непорозумінь у процесі аналізу та інтерпретації даних, а також створює основу для міждисциплінарної комунікації, що є особливо важливим при інтеграції різних географічних, гідрологічних та інженерних підходів у дослідженні.

Термін *гідротехнічних споруд* часто траплятиметься в даній науковій роботі. Згідно положень Державного комітету України у справах містобудування і архітектури (Державні будівельні норми України (ДБНУ)), ГТС – це інженерні конструкції, що створюються для раціонального використання водних ресурсів та запобігання шкідливому впливу водних мас. До ГТС належать греблі й дамби різного призначення та їхні конструктивні елементи; водоскиди, водоспуски, споруди водовідведення (тунелі, канали, труби, і т.п.); регуляційні споруди; накопичувачі промислових відходів; ставки; відкриті водозабори, а також гідромеханічне та механічне обладнання, необхідне для забезпечення нормального функціонування гідротехнічних споруд [33].

Відповідно до тих самих положень ДБНУ, *зона затоплення* трактується як певна територія, в межах якої відбувається надмірне надходження водних мас [34]. *Зона катастрофічного затоплення* являє собою зону затоплення, в радіусі якої спостерігаються найгірші наслідки розливу, а також завдання шкоди інфраструктурним об'єктам та довкіллю [35].

Визначення *геоморфонів* було введене Томашем Лажакком та його колегами у статті [36], яка описувала метод автоматичної класифікації форм рельєфу на основі цифрової моделі рельєфу (ЦМР). Відповідно, *карта геоморфонів* (геоморфологічні фонотипи) являє собою простий растровий візерунок, що служить архетипом морфології рельєфу певної ділянки. Тобто, *геоморфони* – це автоматично виділені на основі аналізу ЦМР локальні форми поверхні.

Також важливим терміном даної наукової роботи є *проран*. Згідно Термінологічного словника-довідника з будівництва та архітектури [37], проран – це не перекрита частина русла річки, призначена для пропуску води при будівництві гідротехнічної споруди. Також прораном може бути вузька протока в косі, мілині, плавнях, випрямлення ділянки річки, що утворилося в результаті прориву вигину під час повені. Більш пасуючим визначенням даного терміну в розрізі дослідження є вимоїна, що утворюється при прориві водним потоком напірної ГТС в наслідок штучного (підрив) чи природнього (поступова ерозія тримаючих гідротехнічних споруд) втручання в її сталі функціонування.

Решта термінів буде з'являтися в ході розрахункового етапу дослідження (розрахунки характеристик хвилі прориву ГТС), що частково будуть наведені в ході їх виконання. Автор роботи частково схилитиметься на термінологічну базу, наведену в [2].

### 1.3. Класифікація гідротехнічних споруд. Їхнє значення у господарській, безпековій та геополітичній сферах

Розгляд класифікації ГТС та визначення їхньої ролі у водогосподарських системах є важливим етапом дослідження, оскільки з географічної точки зору ці об'єкти виступають ключовими елементами просторової організації водорегулювання. Класифікація дозволяє систематизувати споруди за функціональним призначенням, конструктивними особливостями та потенційним масштабом впливу на навколишнє середовище, що забезпечує глибше розуміння їхньої взаємодії з природними компонентами ландшафту. Визначення ролі кожного типу споруд у структурі водогосподарських систем дає змогу оцінити масштаби і напрямки затоплення у разі аварій, врахувати регіональні фізико-географічні умови та підвищити точність картографічного моделювання зон ризику.

Офіційна класифікація видів гідротехнічних споруд визначається на рівні *нормативно-правових актів та державних стандартів*. Такими актами є частини Державних будівельних норм України [37, 38] та Державних стандартів України [39].

Відповідно до вищезазначених актів, ГТС поділяються відповідно до їхнього призначення на *загальні та спеціальні*. До загальних відносяться наступні споруди: греблі, дамби (себто ті, що затримують масиви води та створюють перепади рівнів води в створі споруди та прилягаючого б'єфа русла), водозабірні, водоводи, водоскидні, регуляційні (рис. 1.2.).



Рис. 1.2. Гідротехнічні споруди загального призначення

До ГТС спеціального призначення належать: будинки ГЕС, напірні басейни, судноплавні шлюзи, причальні споруди, пірси та інші споруди водного транспорту, відстійники, шлюзи-регулятори зрошувальних та осушувальних систем, каптажі, насосні станції, очисні споруди, рибопідйомники, тощо (рис. 1.3.).



Рис. 1.3. Гідротехнічні споруди спеціального призначення

Тобто, різниця між загальними та спеціальними ГТС полягає переважно у масштабі та функціональному призначенні. Загальні споруди виконують

ключові функції у регулюванні стоку, управлінні водосховищами, забезпеченні водопостачання та захисті від шкідливої дії води на рівні великих водогосподарських систем, в той час, як спеціальні ГТС це скорше об'єкти, призначені для виконання більш вузьких, локальних або допоміжних завдань у конкретних галузях, дотично пов'язаних з регуляцією та загальним функціонуванням стоку.

Також гідротехнічні споруди поділяють за приналежністю до водного об'єкта, на якому вони побудовані: річкові, морські й озерні; наземні та підземні. У разі потреби їх об'єднують у гідровузли (комплекс ГТС, що об'єднані за розташуванням, призначенням й умовами роботи) (рис. 1.4.). Найчастіше вони приурочені до комплексних водних об'єктів, що використовується для декількох цілей, визначених у водогосподарському паспорті, окрім рекреаційних. Тобто, окрім зберігання води та регулювання її стоку, водойма призначена для промислового водопостачання, зрошення, риборозведення, або інших потреб (наприклад, гідровузли Дніпровського каскаду ГЕС).

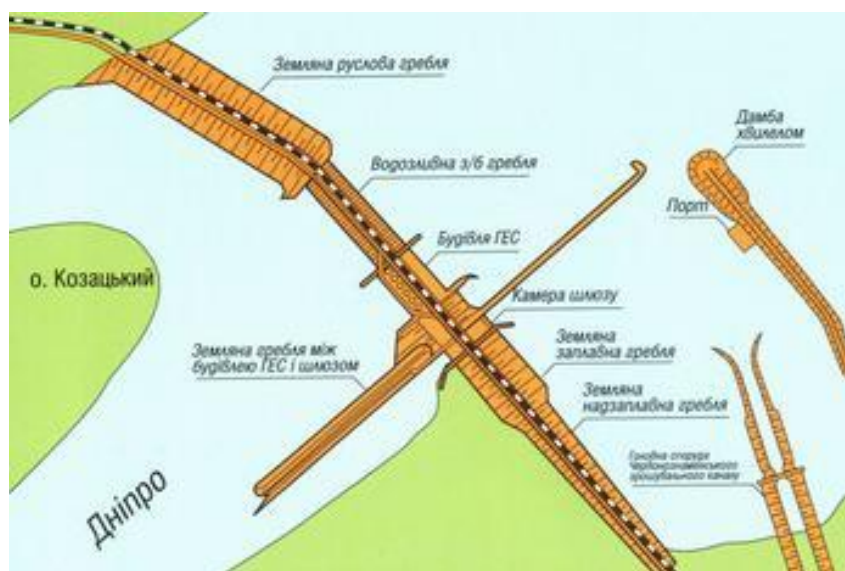


Рис. 1.4. План гідровузла Каховської ГЕС [40]

У контексті розрахунків характеристик проривної хвилі, структура та вид гідроспоруди відіграє не останню роль. Особливості ГТС не є простою класифікаційною характеристикою, а є одним із ключових вихідних факторів у побудові математичних та картографічних моделей проривної хвилі. Роль типу

гідротехнічної споруди в розрахунках є визначальною, оскільки саме конструктивні характеристики, функціональне призначення та параметри ГТС безпосередньо впливають на наступний перелік факторів:

1. *Обсяг та швидкість вивільнення води* прямопропорційно залежать від типу споруди, що утворює перепад висот у б'єфі. Наприклад, гребля великого й наповненого до нормального підпірного рівня (НПР) водосховища та дамба на маленькому водосховищі, будуть мати різні висоти проривної хвилі та різні характеристики подальшого потоку води (рис. 1.5, рис. 1.6.).



Рис. 1.5. Прорив (в наслідок повеней) дамби біля польського міста Пачкув, 2024 рік [41]



Рис. 1.6. Прорив (в наслідок підриву) частини греблі ДніпроГЕС, 1941 рік [42]

2. *Гідравлічні характеристики проривної хвилі* (висота, швидкість та тривалість хвилі) різняться залежно від висоти споруди, ширини прориву та режиму експлуатації ГТС.

3. *Масштаб зони затоплення.* Для великих енергетичних та водорегулюючих споруд наслідки поширюються на десятки кілометрів, тоді як аварія на локальній меліоративній системі має обмежений вплив.

4. *Особливості моделювання.* Для різних типів ГТС застосовуються різні гідродинамічні моделі, в яких закладаються різні вхідні параметри (тип греблі, конструкційні матеріали, коефіцієнти фільтрації тощо). Подібна характеристика буде доцільною в побудові просторової моделі в HEC-RAS.

5. *Оцінку часу реагування.* Споруди з великою площею водосховища створюють більш потужну і швидку хвилю, що вимагає іншої стратегії попередження та евакуації.

Тобто, роль типу гідроспоруди має враховуватися під час проведення розрахунків та подальшого картографічного моделювання, адже дана характеристика є однією з визначальних для початкових масивів води проривної хвилі.

Гідротехнічні споруди, окрім свого основного господарського призначення, мають вагомe значення у сфері національної та регіональної безпеки. Їхній стан, режим експлуатації та потенційні аварійні ризики прямо впливають на захист населення, інфраструктури та природних ресурсів. Руйнування або умисне пошкодження ГТС може призвести до масштабних затоплень, втрати контролю над водними ресурсами та виникнення кризових ситуацій як техногенного, так і воєнного характеру. Саме тому у сучасних гідродинамічних розрахунках та системах моніторингу ГТС враховується не лише технічна надійність споруд, але й стратегічний потенціал у контексті безпекових викликів та можливих *водних конфліктів*.

Кількість зруйнованих у воєнних цілях гідротехнічних споруд охоплює різні регіони світу й налічує десятки задокументованих випадків, що свідчить про системний характер цього явища. Використання ГТС як інструменту тиску під час збройних конфліктів зумовлює масштабні екологічні, економічні та соціальні наслідки, перетворюючи їх на об'єкти стратегічного, подекуди критичного, значення. Явище водних конфліктів, тобто суперечок, пов'язаних з доступом до водних ресурсів, їхнім розподілом або контрольованим використанням, є широко поширеним у світі. Якщо казати виключно за Україну, то лише за період між 2014 та 2023 роками зафіксовано понад 300 випадків. Подібний часовий проміжок дає змогу простежити неопосередкований зв'язок між загостренням проблеми водних конфліктів та збройною агресією росії проти України (рис. 1.7.) [43].

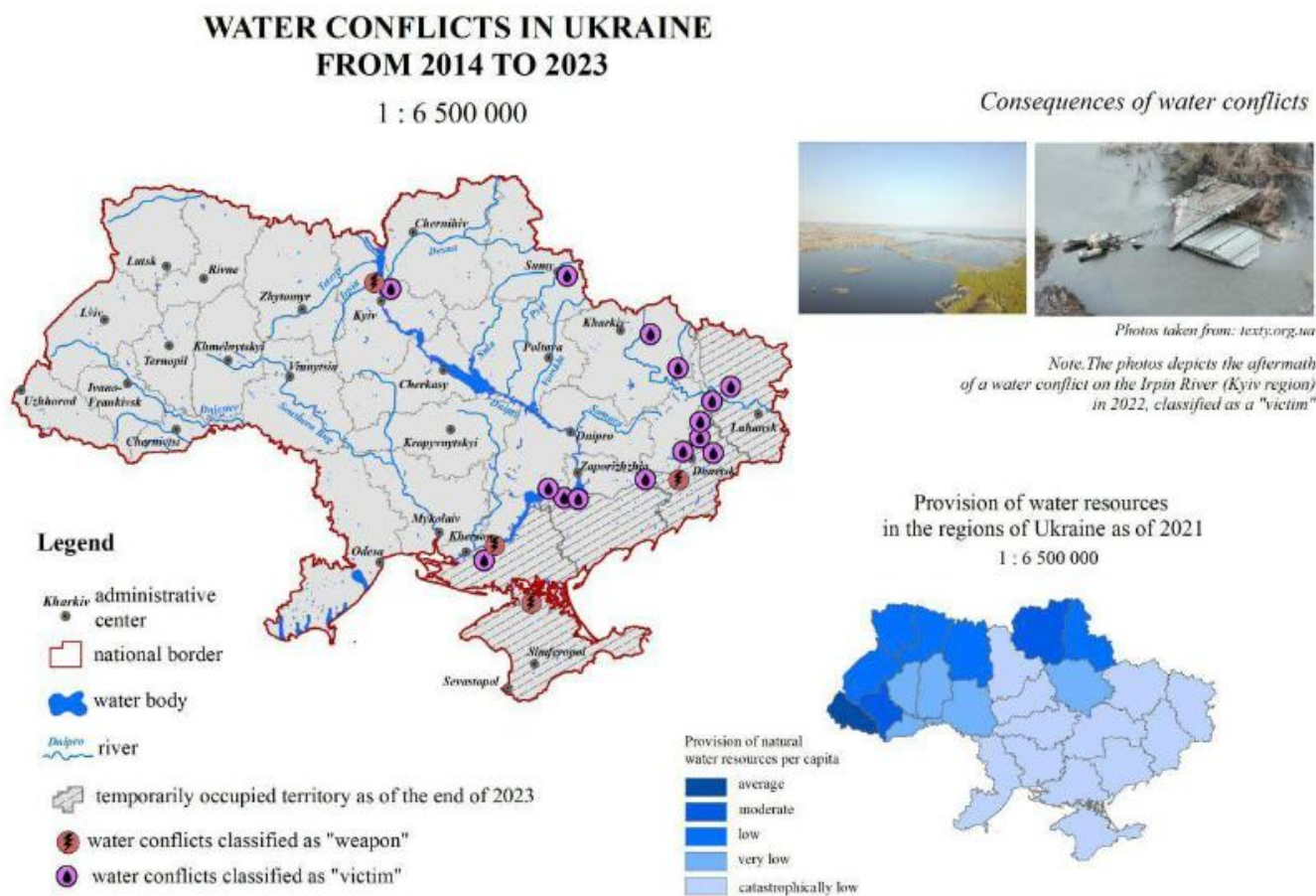


Рис. 1.7. Водні конфлікти в Україні у період з 2014 по 2023 рік [43]

У цьому контексті прогнозування наслідків аварій на гідротехнічних спорудах набуває подвійного значення: з одного боку, як інструмент цивільного захисту та мінімізації можливих втрат, з іншого, як елемент національної безпеки в умовах військових загроз. Саме тут особливої ваги набувають геоінформаційні технології, що дозволяють здійснювати просторовий аналіз, будувати моделі зон затоплення та виявляти найбільш уразливі території.

#### 1.4. Зарубіжні ГІС-портали прогнозу й моніторингу затоплень

Європейський досвід дослідження подібної проблематики майже не репрезентує ймовірність насильницького руйнування ГТС, і відповідно моделювання неконтрольованого затоплення територій в разі підриву. Хоча окремі джерела містять інформацію про наслідки таких подій, переважна

більшість досвіду сфокусована на паводкових процесах природного походження. Саме тому акцент європейських досліджень зміщується у напрямі гідрологічного моделювання повеней, аналізу водного балансу, визначення зон ризику та оптимізації систем раннього попередження. У цьому контексті такі матеріали все ще залишаються цінними, оскільки дозволяють порівняти методи картографування, оцінити точність різних моделей прогнозування та адаптувати їх до сценаріїв аварійного характеру, зокрема у випадках руйнування гідротехнічних споруд унаслідок зовнішнього впливу.

Відповідно, огляд зарубіжних ГІС-порталів, присвячених моделюванню паводків, дає змогу виявити загальні принципи просторового аналізу, що можуть бути перенесені на сценарії техногенного затоплення, а саме: способи побудови гідродинамічних моделей, підходи до класифікації ризиків, методи валідації даних та тому подібне. Огляд подібних ГІС-порталів забезпечує підґрунтя для розробки власної концептуальної моделі прогнозування наслідків аварії на Трав'янському водосховищі, інтегруючи здобутки європейських систем з урахуванням специфіки воєнних загроз та потенційно неконтрольованих сценаріїв руйнування ГТС.

Найбільш відомим та містким європейським ГІС-порталом можна назвати Європейську систему оповіщення про повені (European Flood Awareness System (EFAS)). EFAS розробляється у власній науковій службі Європейської Комісії, Спільному дослідницькому центрі починаючи з 2002 року у тісній співпраці з національними гідрологічними та метеорологічними службами, європейськими організаціями цивільного захисту, такими як Центр моніторингу та інформації (MIC), та іншими дослідницькими інституціями [54].

З 2011 року EFAS є частиною служби управління надзвичайними ситуаціями Copernicus. Її впроваджує Спільний дослідницький центр (JRC) Генерального директорату Європейської Комісії. EFAS також являє собою першу операційну гідрологічну мережу в Європі (рис. 1.8).

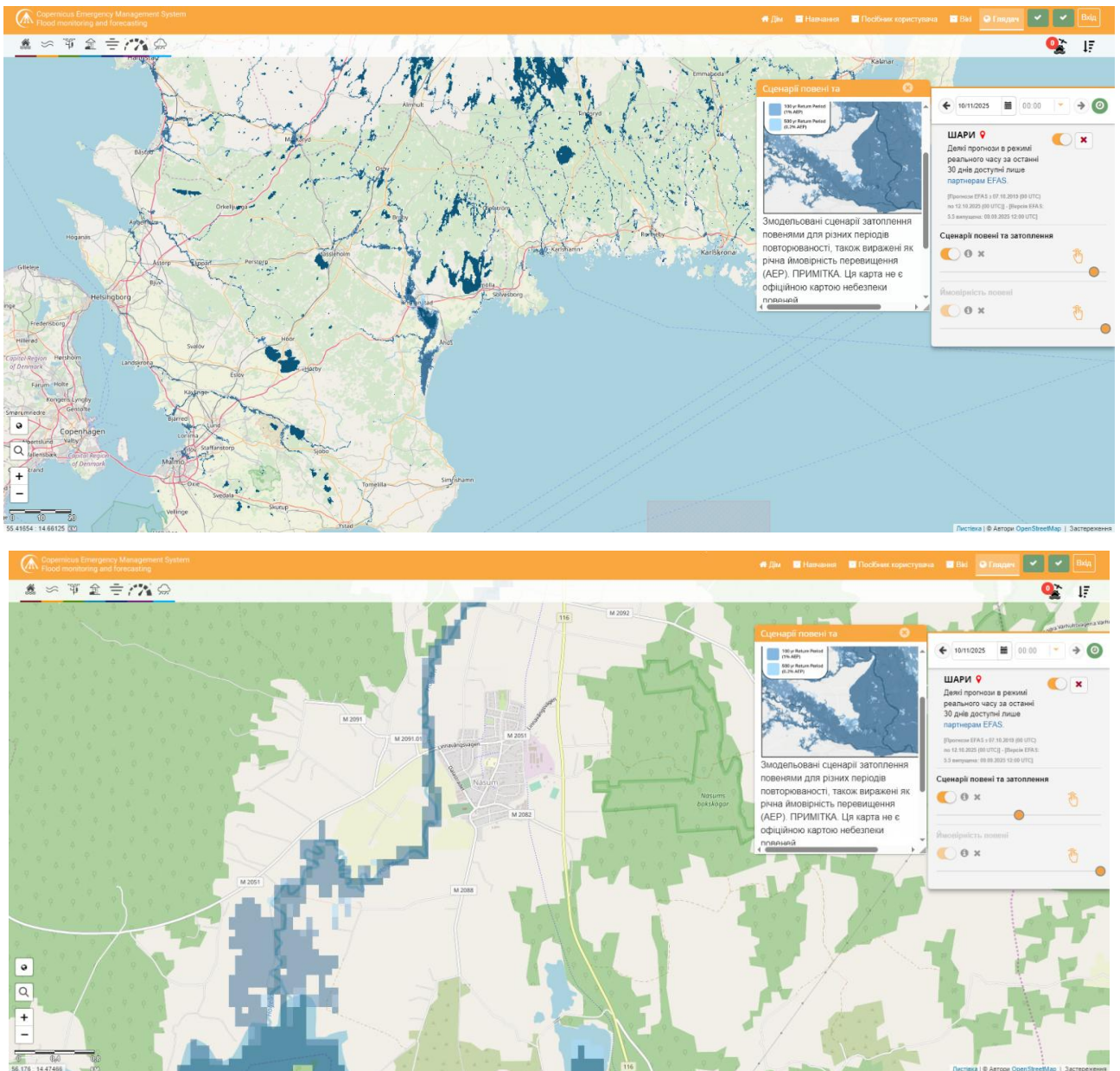


Рис. 1.8. Зображення фрагменту сторінки EFAS з змодельованими сценаріями затоплення в наслідок повеней [54].

EFAS містить міжнародні дані для країн Європи. Якщо казати про ГІС-системи національного рівня, то в приклад можна привести німецький Geoportals Deutschland, а саме розділ з повенями [48]. У порталі присутні карти “Hochwasser-Gefahrenkarten” (карти небезпеки затоплення) та “Hochwasser-Risikokarten” (карти ризику затоплення), що показують: межі можливого затоплення, глибину води, кількість населення і об’єктів, які можуть бути уражені, а також сценарії з високою, середньою та низькою ймовірністю. Дані карти охоплюють як державний рівень (федеральні землі), так і локальний рівень

(землі, муніципалітети). Можна переглянути матеріали для різних земель з різною детальністю (рис. 1.9). Матеріали порталу використовуються зокрема Федеральним агентством технічної допомоги (THW) Німеччини для моніторингу та підготовки до реагування у випадку з паводками.

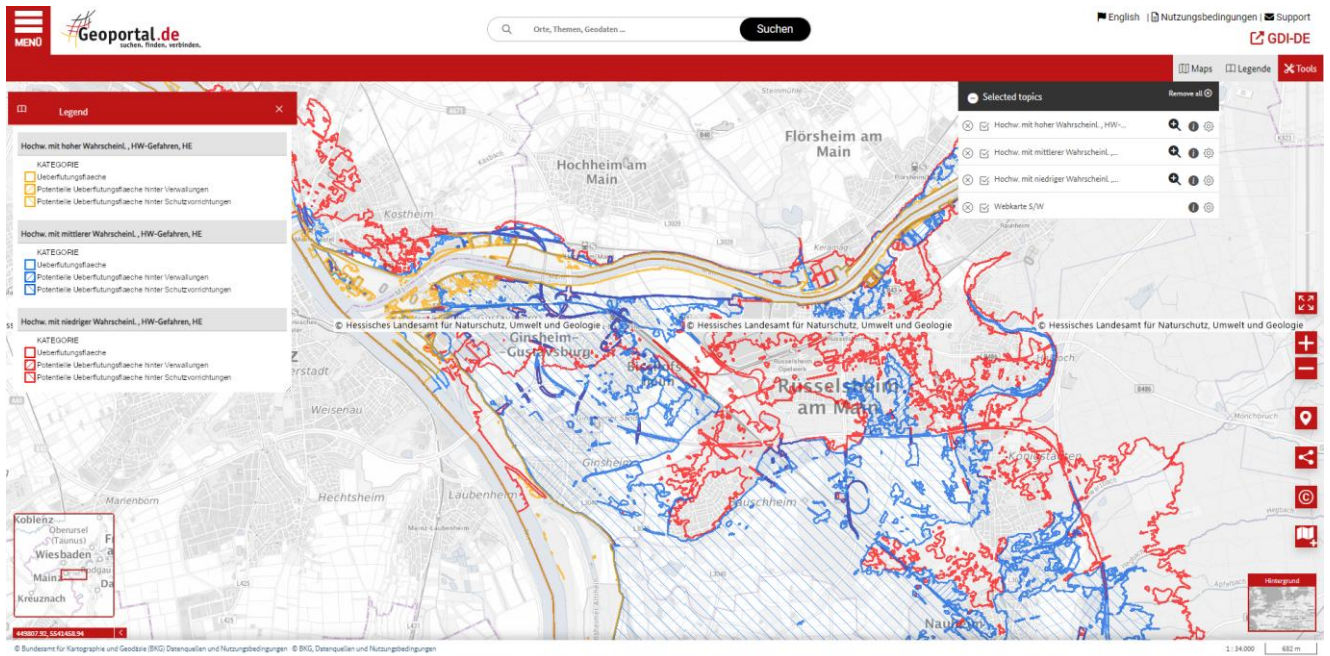


Рис. 1.9. Фрагмент карти небезпеки повеней для земель Гессен [48]

Не менш цікавою системою є французький портал Géorisques, який надає доступ до карт зон затоплення (Zones Inondables) та планів попередження паводкових ризиків (PPRI) [55]. Система містить інформацію про рівні небезпеки, побудовані на основі гідродинамічних моделей різної небезпеки (малі, середні та екстремальні паводки), а також дані про історичні випадки катастрофічного розливу води. Для кожної ділянки території доступні карти затоплення відповідно до класів небезпеки, що дозволяє оцінювати вплив паводкових подій на населені пункти, інфраструктуру та потенційно небезпечні об'єкти. Хоча французький портал орієнтований переважно на природні паводки, його підхід до класифікації зон небезпеки та представлення геопросторових даних є цікавим та щонайменше нестандартним. Користувач може обрати певну адресу та отримати звіт щодо потенційних стихійних лих, зокрема повеней, на ділянці, що його цікавить.



Рис. 1.10. Фрагмент карти небезпеки повеней для 15 муніципалітету Парижа [56]

Узагальнюючи, європейські геопортали демонструють різні підходи до картографування паводкових ризиків, утім всі вони ґрунтуються на поєднанні високоточної цифрової моделі рельєфу, гідродинамічного моделювання та інтеграції соціально-економічних показників. Хоча їхня головна увага зосереджена на природних паводках, ці системи містять інструментарій і прийоми, релевантні до аналізу наслідків аварій на ГТС, зокрема методи побудови сценарних карт, структурування рівнів небезпеки та стандартизовані закономірності візуалізації зон ризику. Використання європейських підходів може істотно підвищити якість та достовірність моделювання для Трав'янського водосховища, забезпечивши його відповідність високим стандартам управління водними ризиками.

## РОЗДІЛ II

### ГЕОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТРАВ'ЯНСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ТА ТЕРИТОРІЇ МОЖЛИВОГО ЗАТОПЛЕННЯ

#### 2.1. Фізико-географічна характеристика території

Аналіз наукових напрацювань свідчить, що питання картографічного моделювання зон потенційного затоплення при аваріях на гідротехнічних спорудах потребує подальшої деталізації та комплексного підходу. Для забезпечення коректності та обґрунтованості моделювання необхідним є ґрунтовний аналіз географічних особливостей території, адже саме природні умови та антропогенне навантаження визначають масштаби та наслідки можливих затоплень.

З огляду на сучасні гібридні конфлікти, де використовуються як звичайні засоби ураження, так і цілеспрямоване руйнування гідротехнічних споруд, картографування потенційних зон підтоплення дозволяє передбачити масштаби вторинних катастрофічних наслідків. В основному, воно сприяє оцінці ризиків для населених пунктів та логістичних маршрутів, що, у свою чергу, знижує втрати та підвищує ефективність дій як військових, так і гуманітарних структур. Окрім цього, карти зон затоплення є важливим інструментом для моделювання сценаріїв розвитку подій у разі повторного застосування водної зброї. Створення подібних картографічних зображень на основі актуальних супутникових знімків, цифрових моделей рельєфу та даних дистанційного зондування дає змогу оперативно реагувати на динамічні зміни у зоні конфлікту.

Досліджуваний водний об'єкт розташований на півночі Харківської області, Харківського району на межі Дергачівської та Липецької територіальних громад (рис. 2.1). Побудоване в каскаді на річці Харків. Відповідно, оптимальною та комплексною ділянкою для дослідження стала долина річки Харків (в межах Харківської області) до її місця впадіння в річку Лопань.

## ПОЛОЖЕННЯ ТРАВ'ЯНСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

1 : 150 000

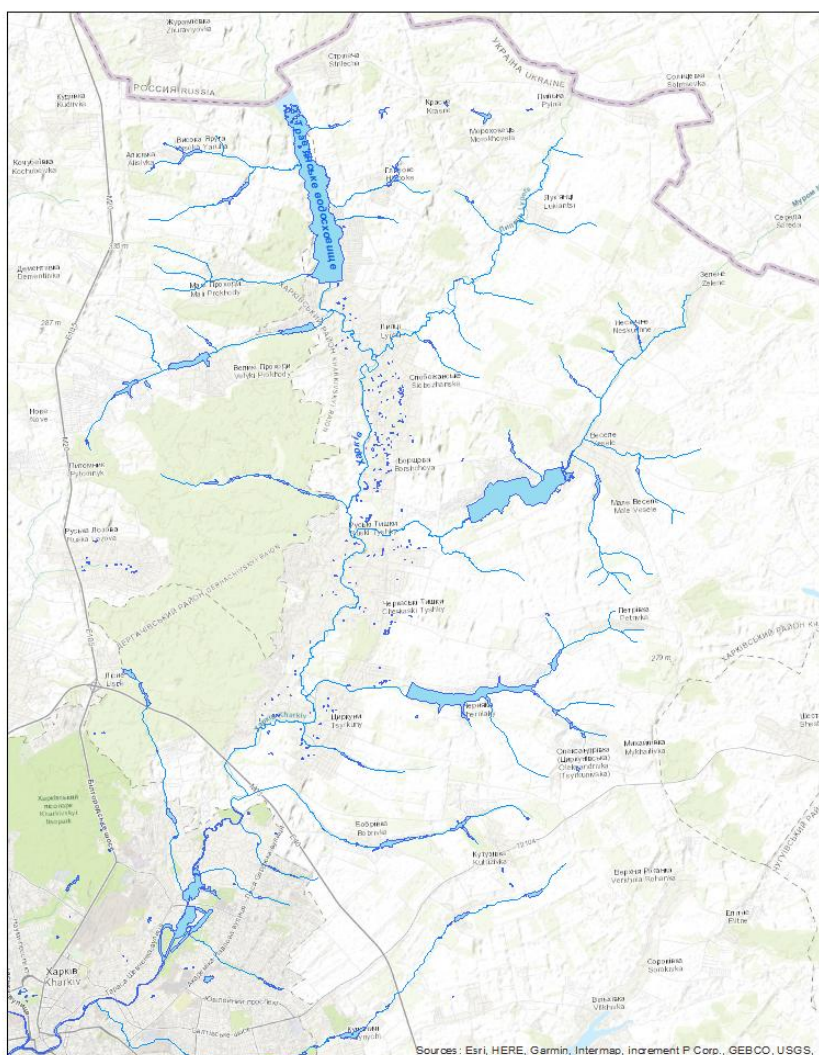
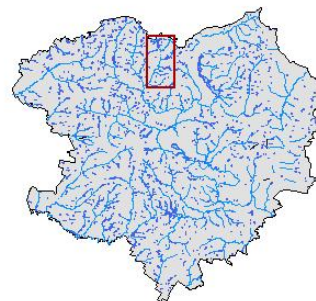


Схема розташування ділянки



Умовні позначення

водні об'єкти

річки

циркуни назви населених пунктів

Рис. 2.1. Просторове положення Трав'янського водосховища

Головними населеними пунктами, що знаходяться у зоні впливу є: Липці, Малі Проходи, Великі Проходи, Слобожанське, Борщова, Руські Тишки, Черкаські Тишки, Циркуни, Веселе.

Рельєф ділянки переважно рівнинний. Абсолютні висоти змінюються в межах від 47 до 236 метрів, що зумовлює значну різноманітність вертикального рочленування (рис. 2.2.).

РЕЛЬЄФ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ДІЛЯНКИ  
В ЗОНІ ВПЛИВУ ТРАВ'ЯНСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

1 : 150 000

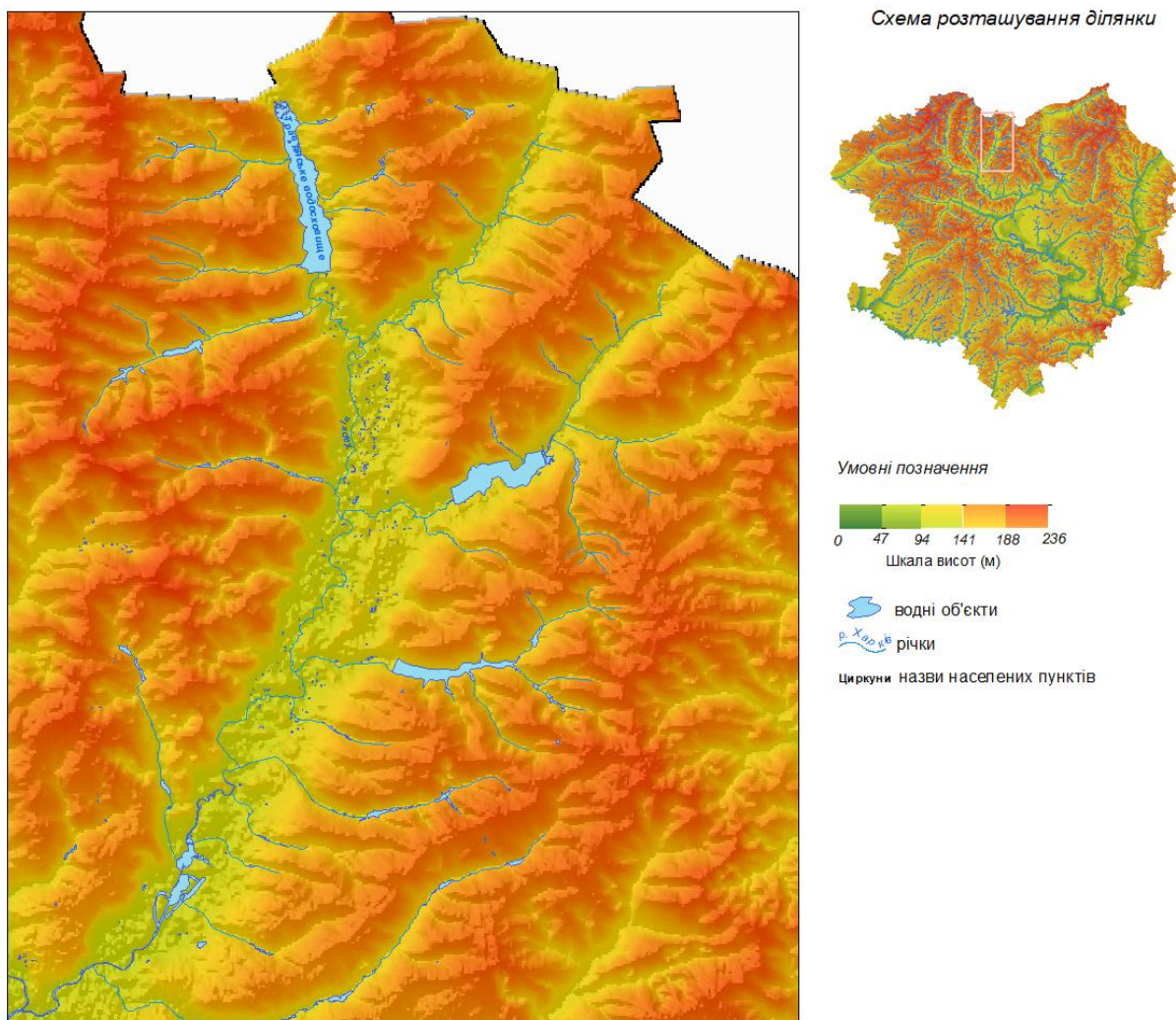


Рис. 2.2. Рельєф досліджуваної ділянки в зоні впливу Трав'янського водосховища

Характерною особливістю території є розвинена ерозійно-балкова мережа, яка надає рельєфу розчленованості. Долини річок і тимчасових водотоків мають здебільшого вузьке V-подібне обрисовання з перепадами висот між тальвегом та вододілом. Пологі схили поєднуються з крутими ділянками, що сприяє формуванню яружно-балкових систем. Водночас у межах вододілів зберігаються відносно вирівняні поверхні, придатні для господарського освоєння. Загалом рельєф території можна охарактеризувати як хвилясту підвищену рівнину з елементами середнього ступеня ерозійної розчленованості.

Геоморфологічна будова досліджуваної ділянки представлена пластово-денудаційними рівнинами та горбогір'ями, що формуються в умовах переважно помірних піднять. Це зумовлено поєднанням літологічного складу корінних порід та тектонічних рухів, які спричинили чергування вирівняних і піднятих ділянок. Внаслідок цього відбувається поступове розчленування рельєфу на східчасто горбисто-увалисті рівнини, які розвинуті на крейдових та палеоген-неогенових відкладах (N1–P). Саме крейдові та палеогенні породи, завдяки своїй відносній м'якій зруйнованості, інтенсивно піддаються денудаційним процесам, що сприяє утворенню пологих схилів. Субгоризонтальні увалисті та горбисто-увалисті рівнини, що поширені на крейдових, палеогенових і неогенових відкладах, формуються внаслідок тривалої денудації. Місцями спостерігаються відклади різної стійкості до вивітрювання (наприклад, крейда й піски палеогену протиставлені більш стійким до руйнування неогеновим мергелям та вапнякам), що зумовлюють різнорівневу дисекцію рельєфу.

Таким чином, сучасний геоморфологічний стан території є наслідком взаємодії літологічної неоднорідності крейдових і палеоген-неогенових відкладів із процесами денудації. Горбогірні форми тут виступають результатом як ерозійного розчленування, так і диференціації порід за стійкістю до вивітрювання, тоді як пластово-денудаційні рівнини є свідченням давніх вирівнюючих процесів рельєфоутворення.

Ґрунтове покриття досліджуваної ділянки строкате, що пояснюється як різноманітністю геоморфологічних умов, так і неоднорідністю материнських порід, на яких сформувалися сучасні ґрунти (рис. 2.3).

ГРУНТИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ДІЛЯНКИ  
В ЗОНІ ВПЛИВУ ТРАВ'ЯНСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

1 : 150 000

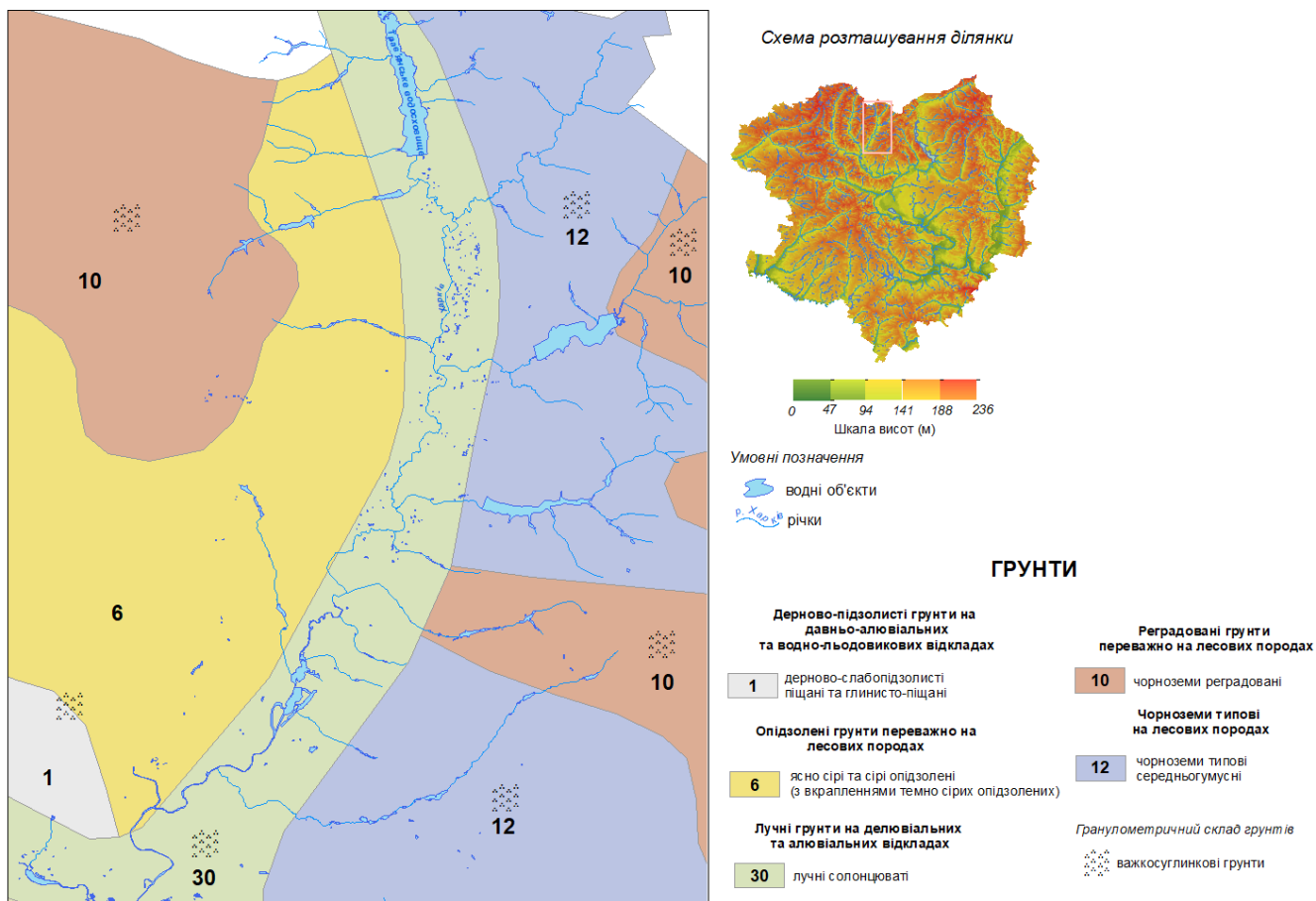


Рис. 2.3. Ґрунти досліджуваної ділянки в зоні впливу Трав'янського водосховища

Для заплави та першої надзаплавної тераси річки Харків типовими є лучні солонцюваті ґрунти, сформовані на делювіальних і алювіальних відкладах. В умовах періодичного перезволоження заплави й наявності дрібнозернистого матеріалу алювіального походження створюються передумови для утворення солонцюватості. Рельєф долини з пониженнями, де відбувається застій вологи й нагромадження розчинних солей, безпосередньо зумовлює формування такого типу ґрунтів.

На вищих рівнях терас поширені дерново-слабопідзолисті ґрунти, які розвинулись на давньо-алювіальних і водно-алювіальних відкладах. Їхнє формування пов'язане з відносно добрим дренажем і більш піщаним чи супіщаним складом відкладів, що сприяє вимиванню легкорозчинних сполук і

формуванню підзолистого горизонту. Опідзолені ґрунти переважно приурочені до лесових відкладів, які залягають на вирівняних чи слабохвилястих ділянках рельєфу. Завдяки середньосуглинковому складу лесу й доброму дренажу, з одного боку, відбувається вилуговування основ, а з іншого боку зберігається достатній вміст карбонатів у глибших горизонтах.

Найродючішими в межах території є чорноземи (реградовані та типові), що також формуються на лесових породах, переважно на рівнинних і слаборозчленованих ділянках. На більш дренованих схилах зустрічаються реградовані чорноземи, тоді як типові чорноземи зберігаються на відносно стабільних і вирівняних ділянках.

Для досліджуваної ділянки характерні рівнинні широколистянолісові ландшафти. Переважають пагорби та схили височин з антропогеновим покривом, виникнення яких зумовлене тривалим господарським освоєнням території. Розорювання земель (реградовані чорноземи) та їхнє інтенсивне використання під сільськогосподарські культури призвело до суттєвих трансформацій природних комплексів.

Долині річки Харків властиві піщані погорбовані тераси, які сформувалися в процесі акумулятивної діяльності водотоку та відкладання алювіальних пісків у різні геологічні етапи розвитку долини. У межах вододілів між річками Харків та Лопань, а також Харків та Сіверський Дінець простежуються лесові височини. Лесові відклади відзначаються високою родючістю та придатністю для землеробства, що зумовило їхнє активне сільськогосподарське освоєння. Проте розчленованість рельєфу ярами і балками, врізаними в крейдові відклади, є наслідком як природних ерозійних процесів, так і антропогенного впливу, зокрема вирубуванням лісів та порушенням рослинного покриву. В умовах посиленої ерозії формуються мікроландшафти, де поряд із деградованими ґрунтами трапляються острівні ділянки дібров. Ці діброви є залишками корінних лісових формацій, які виконують важливу роль у стабілізації схилових процесів, запобігаючи подальшому розвитку яружно-балкових систем.

## 2.2. Характеристика Трав'янського водосховища

Для укладання карти затоплень території було обране *Трав'янське водосховище*. Водний об'єкт знаходиться неподалік державного кордону на півночі Харківської області. Станом на 10 червня 2025 року, неподалік водойми відбуваються бойові дії та періодичні наступальні операції (рис. 2.1).

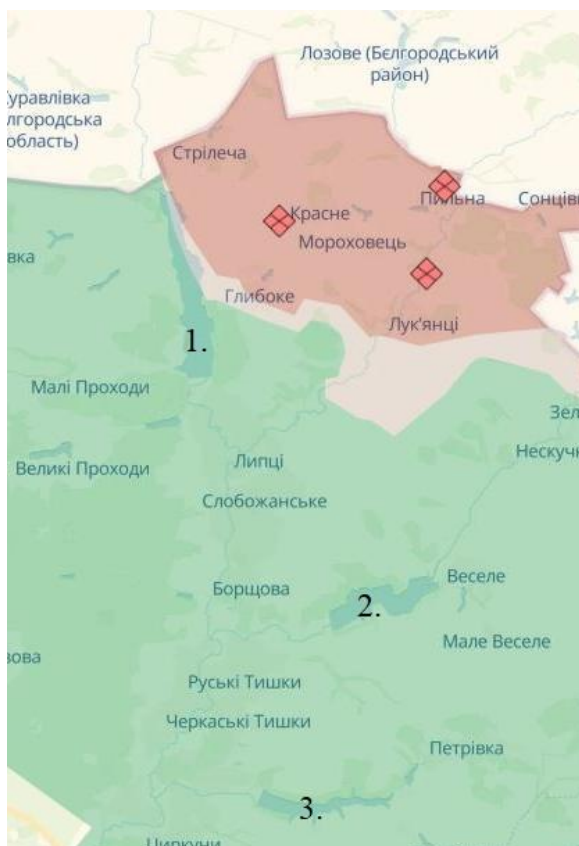


Рис. 2.4. Розташування Комплексу водосховищ р. Харків відносно бойових дій [59].  
Умовні позначення: 1. – Трав'янське водосховище, 2. – Муромське водосховище, 3. – В'ялівське водосховище

Виходячи з цього, загроза підриву гідроспоруди зростає, особливо враховуючи, що Трав'янське водосховище є найбільшим за повним наповненням (22,2 млн м<sup>3</sup>) штучною водоймою поблизу Харкова. У разі цілеспрямованого підриву або бойового ураження ГТС виникає загроза стрімкого підтоплення нижче розташованих населених пунктів, порушення систем водопостачання та каналізації, а також додаткового ускладнення логістичних і оборонних операцій на наближених ділянках фронту.

Трав'янське водосховище споруджено в 1972 році, як частина комплексу резервного запасу прісної води для Харкова. Побудоване на річці Харків (р. Лопань – р. Уди – р. Сіверський Дінець – р. Дон). Крім Трав'янського водосховища, в комплекс входять Муромське та В'ялівське водосховища, побудовані на притоках річки Харків. Гребля водосховища розташована у селі Липці за 47 км від гирла річки Харків. За призначенням, водосховище є комплексним: риборозведення та зрошення [44].

Живлення водосховища здійснюється переважно за рахунок снігових і дощових опадів, що визначає його сезонний режим наповнення та значні коливання рівнів води протягом року. Гідрологічні параметри характеризуються наступними показниками: середня глибина становить 3,8 м, максимальна – 9,0 м; площа водного дзеркала при нормальному підпірному рівні (НПР) сягає 5,92 км<sup>2</sup>. НПР водосховища становить 128,0 м, рівень мертвого об'єму (РМО) – 122,6 м, тоді як форсований підпірний рівень перевищує НПР на 1,5 м (129,5 м). Залежність між площею дзеркала водосховища, його об'ємом та рівнями води є прямопропорційною: збільшення рівня супроводжується розширенням площі та зростанням акумульованого об'єму, що характерно для штучних водойм улоговинного типу.

Тіло гідроспоруди складає ГТС загального типу (глуха земляна гребля з монолітним залізобетонним кріпленням), що забезпечує стійкість до фільтраційних процесів і ерозійного руйнування. Конструктивні особливості греблі зумовлюють надійність експлуатації водосховища та його здатність виконувати регуляційні функції в межах басейну за умови відсутності насильницького втручання в роботу ГТС [44].

### 2.3. Аналіз геоморфонів як чинника просторової диференціації затоплення

Геоморфони, як узагальнені та спрощені морфологічні одиниці рельєфу, відображають орографічні особливості території та виступають визначальними

чинниками у формуванні напрямків і динаміки розповсюдження водних мас [36]. Застосування геоморфного підходу у гідрологічному аналізі дозволяє здійснити не лише якісну, а й кількісну оцінку морфометричної неоднорідності території. Порівняно з класичними методами інтерпретації рельєфу, автоматизований аналіз мінімізує суб'єктивність картографування, забезпечуючи відтворюваність результатів і можливість подальшої статистичної обробки. Крім того, геоморфони виступають ефективним індикатором потенційних шляхів поширення паводкових хвиль, оскільки їхні просторові конфігурації на пряму корелюють із гідравлічним градієнтом стоку. Просторове співвідношення різних морфологічних категорій визначає ступінь диференціації затопленої площі, що зумовлює необхідність інтеграції геоморфного аналізу в комплексні методики прогнозування наслідків руйнування гідротехнічних споруд.

Попередня фізико-географічна оцінка досліджуваної ділянки дозволяє зрозуміти, що територія відносно розчленована яружно-балковими системами. У цьому контексті, визначення локальних геоморфонів допоможе отримати більш повне зображення майбутньої карти затоплення та розуміння характеру потоку води. Геоморфони можуть успішно використовуватись для прогнозування напрямків накопичення поверхневих вод, моделювання зсувних небезпек, а також визначення зон акумуляції наносів у річкових долинах. Інтеграція геоморфного аналізу у загальну концепцію оцінки наслідків аварій на гідротехнічних спорудах забезпечує перехід від описового до аналітичного рівня прогнозування ризиків.

Для побудови зображення геоморфологічних форм (геоморфонів) було використано інструмент *r.geomorphon*, реалізований у модулі GRASS GIS через середовище QGIS. Вхідними даними слугувала цифрова модель висот (DEM), на основі якої проведено морфометричний аналіз локальних форм рельєфу. Алгоритм класифікації геоморфонів здійснював автоматичне розпізнавання топографічних патернів у межах заданого радіуса пошуку, що дозволило

ідентифікувати десять типових морфогенетичних форм, включно з вершинами, схилами, долинами, улоговинами, вододілами, рівнинами тощо.

Отриманий результат представлено у вигляді тематичного растрового шару, який відображає просторову диференціацію мікрорельєфу досліджуваної території (рис. 2.5.).

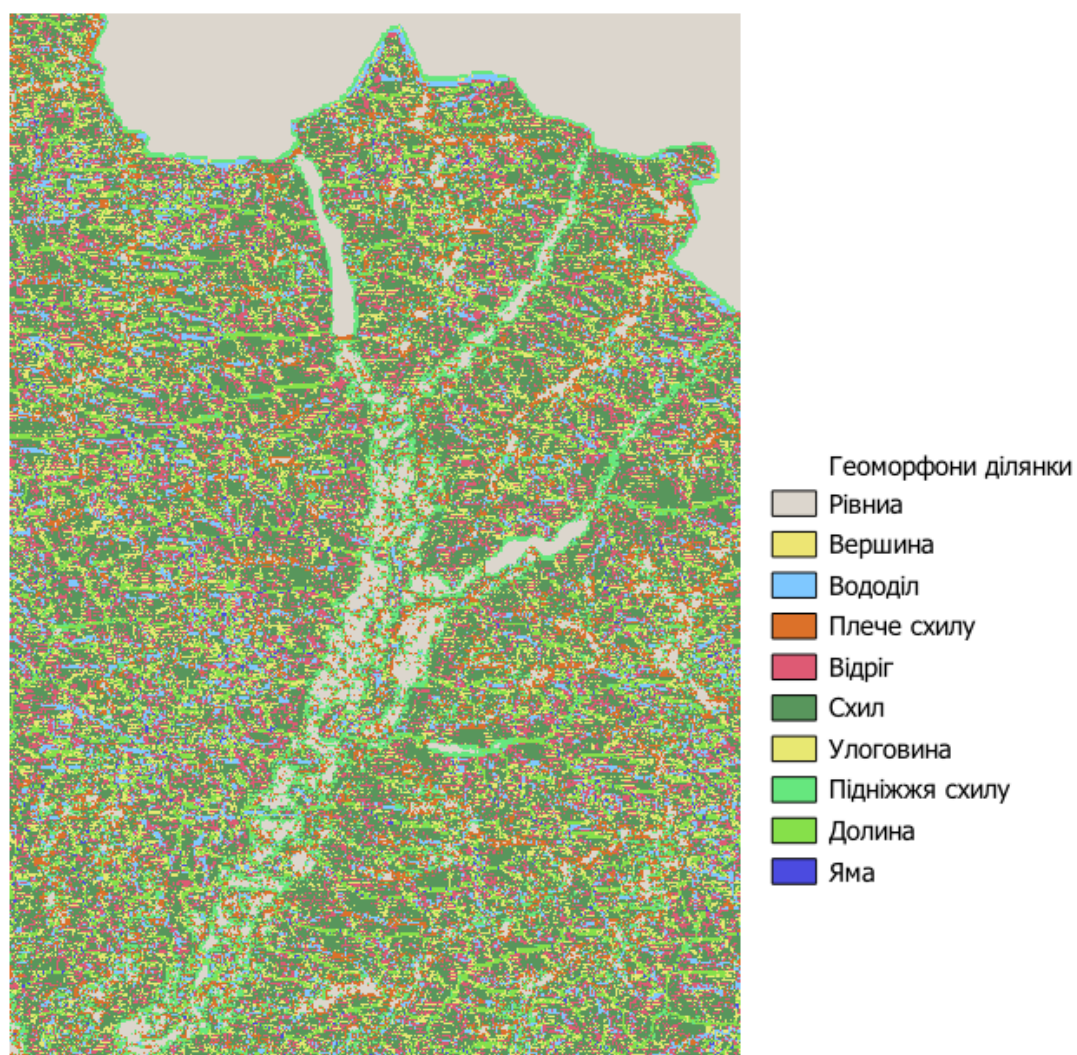


Рис. 2.5. Геоморфони досліджуваної території

Зображення показує просторовий розподіл геоморфонів. У даному випадку, оскільки затоплення очікується в межах долини річки, основна увага в аналізі зосереджується саме на локалізації та конфігурації долинних форм рельєфу, як найбільш вразливих до паводкових процесів різного виникнення. У межах досліджуваної території спостерігається переважання схилових та долинних форм рельєфу, які становлять близько 60 % її площі. Плоскі поверхні

та вершини займають менше 15 %, що свідчить про значну розчленованість території. У структурі геоморфонів домінують долини середньої глибини та широкі днища балок, які мають чітко виражену асиметрію (більш круті схили орієнтовані на південь). Це впливає на напрямок розтікання води при аварійному прориві, спричиняючи зміщення головного потоку у південному напрямку. Окремі фрагменти улоговин та понижень, зафіксовані у середній частині долини, можуть виступати як тимчасові акумуляційні ємності, у яких вода затримуватиметься довше.

Долини чітко виділяються як витягнуті пониження, які формують основне річище та прилеглі заплавні зони. Саме ці ділянки виконують роль природного акумулятора поверхневого стоку, і в умовах надмірного зволоження чи розливу річки вони першими піддаються затопленню. Наявність улоговин і підніжжів схилів у безпосередній близькості до долини вказує на можливе розширення зони підтоплення у випадку високого рівня води або перевищення водоносної здатності річища. Також характерна перевага відкритих долинно-балкових форм із вираженою асиметрією схилів, що створює умови для нерівномірного поширення хвилі затоплення. Це означає, що при однаковому об'ємі води глибина затоплення на різних ділянках може відрізнятись в кілька разів.

Отримані результати морфометричного аналізу демонструють високу інформативність геоморфонного підходу для просторової інтерпретації потенційних зон затоплення. Водночас сам по собі аналіз геоморфонів має переважно якісний характер і не дозволяє здійснити кількісну оцінку ступеня морфологічної схильності території до гідрологічних ризиків.

З метою переходу до аналітично-картографічного рівня оцінювання морфологічних характеристик рельєфу, геоморфонний підхід доцільно доповнити розрахунком індексу *морфологічної вразливості території* (Morphological Vulnerability Index, MVI). Даний індекс є інтегральним показником, що поєднує основні морфометричні параметри рельєфу, такі як

крутість схилів, глибину долин, кривизну поверхні та орієнтацію схилів, також враховуючи геоморфони.

Побудова зображення індексу MVI складається з кількох послідовних етапів. На першому етапі з вихідної цифрової моделі висот було витягнуто основні морфометричні шари: крутість схилів (Slope), профільна кривизна (Profile Curvature) та класифікація морфологічних форм рельєфу (геоморфони) за допомогою вищеописаного алгоритму `r.geomorphon`. Наступним кроком стала нормалізація значень шарів шляхом стандартизації до діапазону від 0 до 1, що дозволило уніфікувати шкали параметрів і підготувати їх до подальшого агрегування в індекс морфологічної вразливості території. Далі кожному показнику був присвоєний коефіцієнт вагової значущості. У цьому випадку для крутості схилів він становив 0,4, для кривизни – 0,3, для геоморфонів – 0,3. Коефіцієнти призначені із урахуванням того, що крутість варіює швидкість поверхневого стоку, кривизна визначає акумуляцію чи подальше розтікання води, а геоморфони формують топологічні умови потенційної вразливості.

Індекс розраховувався за формулою:

$$MVI = (w_S \times \text{Slope}_{norm}) + (w_C \times \text{Curvature}_{norm}) + (w_G \times \text{Geomorphon}_{norm}),$$

де  $w_S, w_C, w_G$  – коефіцієнт вагової значущості

У результаті проведених розрахунків отримано просторове зображення інтегрального індексу морфологічної вразливості (рис. 2.6), яке відображає диференціацію території за ступенем потенційної схильності до поверхневого стоку та ерозійних процесів, яке дозволяє виявити найбільш проблемні ділянки рельєфу та слугує основою для подальшого аналізу територіальних ризиків.

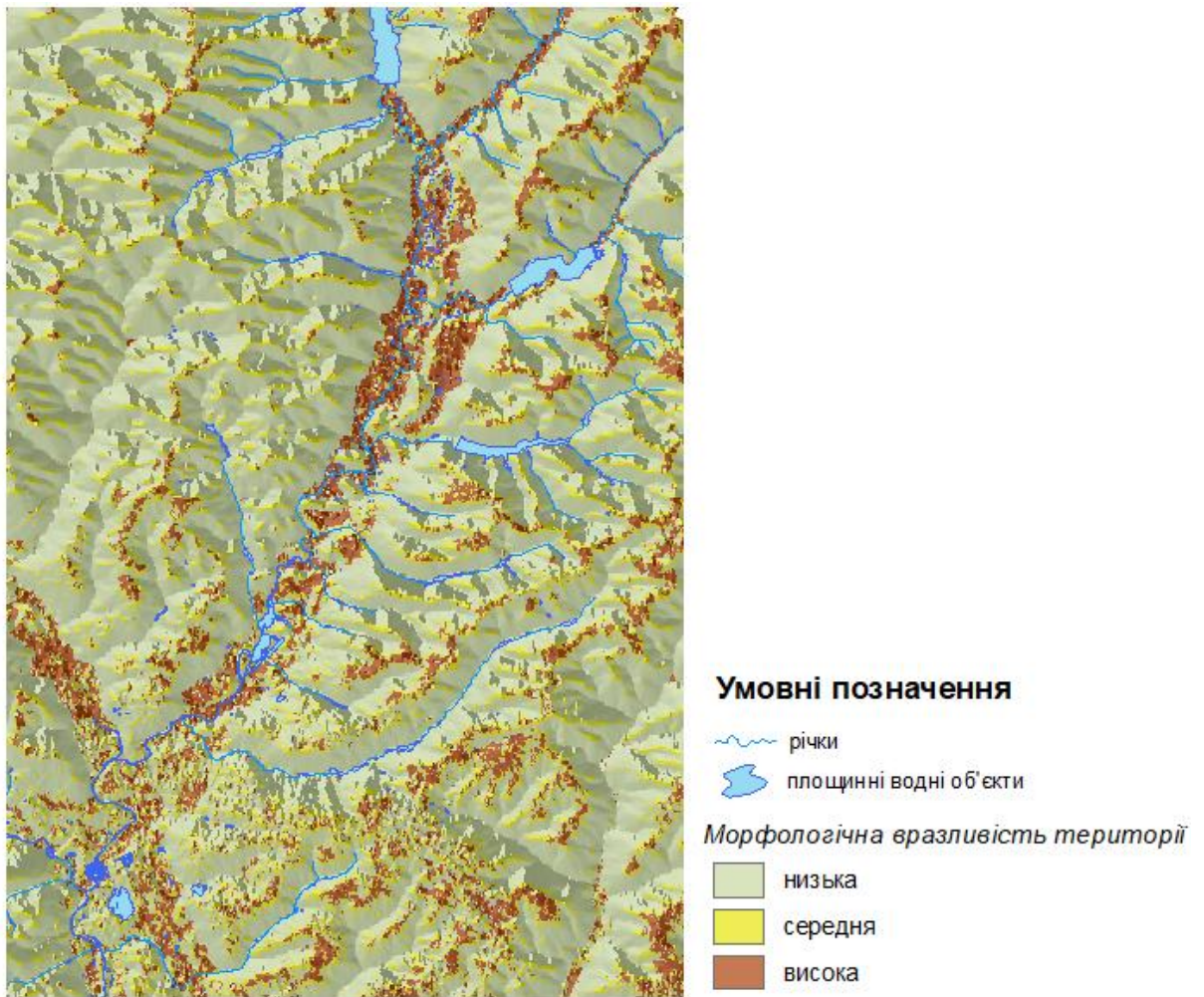


Рис. 2.6. Морфологічна вразливість досліджуваної території

Візуальний аналіз карти свідчить про чітку кореляцію зон високої вразливості (коричневі відтінки) із долинами річки Харків та її приток, зокрема в районі населених пунктів Борщова, Руські Тишки, Черкаські Тишки та Слобожанське. Саме ці ділянки характеризуються низькими відмітками рельєфу, наявністю заплав і терас, що створюють природні депресії для накопичення води. Такі морфологічні умови посилюють імовірність вторинного затоплення.

Зони середньої вразливості (жовтий колір) простежуються на схилах, які формують межі долинно-балкових систем. Ці території відзначаються незначним ухилом і більш стійкими морфометричними характеристиками. Вони потенційно можуть зазнавати підтоплення лише за умови порушення природного дренажу або ж надмірного соку води зі схилів внаслідок опадів.

Ділянки низької вразливості (світло-зелений колір) приурочені до стабільних елементів рельєфу. Ці території, як правило, мають найбільші ухили, добре розвинену систему поверхневого стоку та не критичні умови для акумуляції води. Водночас вони можуть відігравати важливу роль у напрямленні потоків під час катастрофічного прориву, виступаючи як природні межі затоплення.

Просторове співвідношення між зонами вразливості відображає морфологічну структуру долинного рельєфу та підкреслює взаємозв'язок геоморфонів з отриманими характеристиками вразливості.

#### 2.4. Соціальні особливості території, що потрапляє в зону можливого затоплення

Під час опису фізико-географічних характеристик потенційної зони затоплення, було зазначено, що в межі впливу Трав'янського водосховища потрапляють 9 населених пунктів, а саме Липці, Малі Проходи, Великі Проходи, Слобожанське, Борщова, Руські Тишки, Черкаські Тишки, Циркуни та Веселе (рис. 2.7).

Усі населені пункти можна віднести до селищ. Відповідно, територія характеризується високою щільністю саме сільського розселення та розвиненою сільськогосподарською спеціалізацією. Більшість сіл мають лінійний тип забудови вздовж русла річки Харків та її приток, що значно підвищує ризик прямого затоплення житлових масивів. Демографічна структура населення має типові для сільських територій риси: переважання осіб похилого віку, поступове зменшення частки працездатного населення. Це посилює соціальну вразливість регіону, особливо у питаннях евакуації, медичного забезпечення та реагування на надзвичайні ситуації.

### НАСЕЛЕНІ ПУНКТИ В ЗОНІ ВПЛИВУ ТРАВ'ЯНСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

1 : 90 000

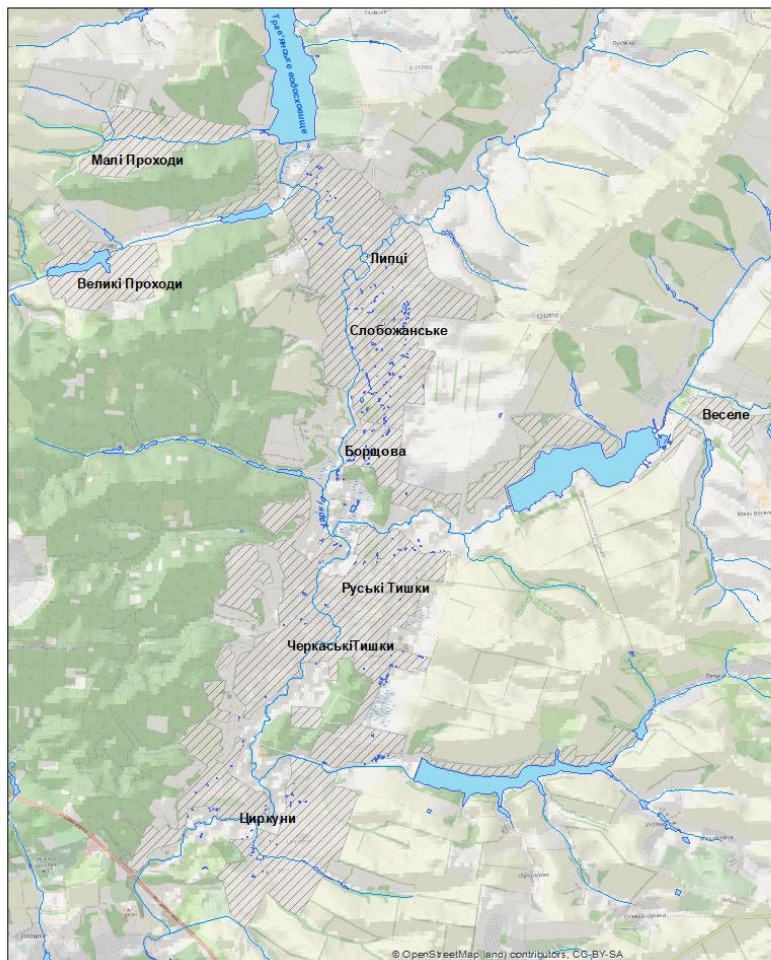


Схема розташування ділянки



#### Умовні позначення




- Руські Тишки назви населених пунктів
-  населені пункти
-  водні об'єкти
-  річки

Рис. 2.7. Населені пункти в зоні впливу Трав'янського водосховища

Звісно, що подібна характеристика була актуальною в період до повномасштабного вторгнення. Станом на 2021 рік сукупно в населених пунктах, що потрапляють в зону впливу, проживало понад 25-30 тисяч осіб [47]. Станом на січень 2025 року кількість цивільного населення орієнтовно становить менше 150 осіб, що пов'язано з евакуацією, окупацією частини територій у 2022 році та подальшими бойовими діями, які істотно змінили соціально-економічний ландшафт ділянки [45].

Частина населених пунктів, зокрема Циркуни, Черкаські Тишки, Руські Тишки та Великі Проходи, зазнали руйнувань від артилерійських обстрілів і бойових дій, унаслідок чого житловий фонд зруйновано частково або повністю. Більшість мешканців була евакуйована. Демографічне навантаження на

територію зменшилося майже в сотні разів, що свідчить про практично повну депопуляцію.

Територія потенційного затоплення характеризується не лише зменшенням кількості населення, але й підвищенням рівня техногенної вразливості, що обумовлено сукупністю воєнних руйнувань, деградацією інженерних систем, відсутністю належного контролю за станом земельних та гідротехнічних споруд. За таких умов навіть локальна аварія на ГТС може мати неприємно великі екологічні та економічні наслідки, поширюючись не лише у межах безпосереднього затоплення, а й по всьому руслу річки Харків та її приток.

Попри низьку густоту цивільного населення, територія залишається об'єктом стратегічної інфраструктури, не тільки через наближене розташування до північних околиць Харкова, але й зокрема через наявність транспортних комунікацій, ліній електропередач, залишків складів сільськогосподарської техніки, резервуарів для зберігання питної води. Наприклад, Липці є стратегічно важливим об'єктом для росіян, адже, захопивши їх, вони матимуть змогу завдати артилерійських ударів по околицях Харкова [46]. Левова частка цивільної інфраструктури не підлягає відновленню. Це видно за космічними знімками композиту урбанізованих територій в штучних кольорах, зокрема у прорідженні та загальному візуальному зменшенню кольору, що відповідає інфраструктурі (рис. 2.8). Подібне «вицвітання» урбаністичної сигнатури на знімках є індикатором не лише фізичного руйнування об'єктів, але й повного їхнього зникнення як відбивальних поверхонь. На значній частині території урбанізовані структури заміщуються спектрально однорідними плямами зеленого, характерними для оголеного ґрунту або ж рослинності. Така трансформація спектральної структури вказує на те, що колишні житлові квартали, промислові об'єкти та об'єкти соціальної інфраструктури втратили свою цілісність і більше не формують типову для поселення спектральну «міську текстуру».



Рис. 2.8. Космічні знімки території селища Липці за 14.07.2024 та відповідно – 14.07.2025 [51]

З огляду на це, в сучасних умовах акцент зміщується з демографічної складової на ризики екологічного та інфраструктурного характеру. У зоні можливого затоплення розташовані елементи меліоративної та дорожньої інфраструктури, що мають міжрайонне значення, а також сільськогосподарські угіддя, частина з яких залишилася необробленою після 2022 року. Зниження господарської активності та відсутність постійного технічного контролю над земельними і гідротехнічними об'єктами призводять до деградації дренажних систем, що може збільшити швидкість і глибину затоплення у разі прориву.

## РОЗДІЛ III

### ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ НАСЛІДКІВ АВАРІЇ НА ТРАВ'ЯНСЬКОМУ ВОДОСХОВИЩІ

#### 3.1. Концептуальна модель геоінформаційного моделювання наслідків аварій на ГТС

У сучасних обставинах посилення воєнних ризиків і збільшення частоти техногенних катастроф особливої актуальності набуває формування цілісної концептуальної моделі прогнозування наслідків аварій на ГТС. Така модель має забезпечувати поєднання аналітичних, картографічних та геоінформаційних методів для виявлення потенційно небезпечних зон, оцінки масштабів затоплення та визначення ступеня ризику для природних і соціально-економічних систем.

У межах дослідження поставленої проблематики щодо Трав'янського водосховища концептуальна модель виконує функцію методологічного каркасу, що забезпечує узгодженість усіх наступних етапів робіт. Концептуальна модель у цьому контексті виступає як теоретико-методологічна основа побудови алгоритму просторового моделювання, що визначає взаємозв'язки між вхідними параметрами, наборами геоданих та отриманими результатами.

Метою створення концептуальної моделі геоінформаційного моделювання є розроблення єдиної системи опису процесів, які відбуваються у разі руйнування ГТС, з урахуванням просторових характеристик ландшафту, морфології долини та параметрів водного об'єкта.

Основними принципами є:



Рис. 3.1. Принципи побудови концептуальної моделі

Сам процес підготовки, подальшого укладання карти та географічної оцінки наслідків доцільно поділити на декілька блоків:

### *Інформаційний блок*

включає систему вхідних даних, що використовуються для побудови моделі

### *Аналітичний блок*

спрямований на визначення закономірностей поширення водного потоку в межах потенційної зони затоплення.

### *Моделювання*

забезпечує інтеграцію результатів попередніх етапів у просторову модель сценарію аварії. На цьому етапі створюються карти потенційного затоплення, визначаються межі впливу прориву

### *Візуально-аналітичний блок*

дозволяє узагальнити результати аналізу й представити їх у доступній формі для подальшого прийняття управлінських рішень

Рис. 3.2. Етапи укладання моделі

Створена концептуальна модель інтегрує різномірну інформацію в уніфіковану систему просторового аналізу, забезпечуючи її універсальність при моделюванні наслідків надзвичайних ситуацій на ГТС будь-якого виду. Завдяки її застосуванню можливе підвищення точності прогнозування зон затоплення через повний облік місцевих фізико-географічних параметрів; значне прискорення процесу підготовки та розробки сценаріїв реагування на ризики; детальна оцінка ймовірних наслідків для природнього середовища та населення.

У даному випадку необхідно наголосити, що запропонована концепція моделювання не є ізольованою і повністю відповідає актуальним напрямкам просторового аналізу загроз, пов'язаних з надзвичайними ситуаціями. Її фундаментом став глобальний досвід створення карт потенційних зон затоплення, а також вона використовує апробовані методики, які вже успішно впроваджені у функціонування світових та національних геоінформаційних платформ. Подібна орієнтація на успішні прецеденти дозволяє, по-перше, гарантувати методологічну сумісність процесу розробки, а по-друге, перенести найрезультативніші алгоритми моделювання.

### 3.2 Розрахунки для укладання карти зон затоплення

Для проведення розрахунків прориву ГТС Трав'янського водосховища буде використовуватися методика, описана в роботі В. Коцюрцби та І. Прощина [2].

Вихідною змодельованою ситуацією, що складеться навколо об'єкта дослідження стане прорив греблі з шириною прорану 40 метрів (ширина гідроспоруди, що потенційно знищується) за умови повного наповнення водойми. Відповідно, розрахунки орієнтовно та теоретично показують найгірший сценарій розвитку. Важливою деталлю при визначенні об'єму водойми, що буде використовуватися у розрахунках є врахування НІР та РМО. Умовно кажучи, РМО – це гранично можливий рівень води у водосховищі, закладений під час технічного проєктування. Відповідно, цей об'єм не зможе

втекти. У випадку з Трав'янським водосховищем, об'єм при НПР становить 22,2 млн м<sup>3</sup>, для РМО – 2,0 млн м<sup>3</sup>. Отже, масивом води що витече стане різниця об'єму НПР та РМО.

Вихідними даними, для розрахунків є:

- 1) об'єм водосховища ( $W_B$ , млн м<sup>3</sup>);
- 2) ширина водосховища перед ГТС ( $B$ , м);
- 3) глибина водосховища перед ГТС ( $H$ , м);
- 4) глибина річки нижче ГТС ( $h$ , м);
- 5) параметри форми долини у створі гідровузла.

Перераховані дані будуть використовуватися з паспорта Трав'янського водосховища та доступних літературних джерел з необхідними характеристиками р. Харків.

Першим етапом розрахунків є визначення ділянок та виокремлення так званих створів – меж ділянок. Створи виокремлюються на основі певних ландшафтних особливостей ділянок та русла. Тобто, обирається певна межа ділянки, що відрізняє її від попередньої, адже потік води буде відрізнятись (наприклад, частина русла біля греблі або ж в межах населеного пункту може бути каналізованою, тоді як наступна матиме звивисте русло з широкою заплавою та меандрами). Відповідно, після ознайомлення з частиною долини річки Харків, вийшло 3 ділянки та IV створи (рис. 3.3.). Далі починаються почергові розрахунки для створів, а після – ділянок між ними, згідно наведених у [2] формул.

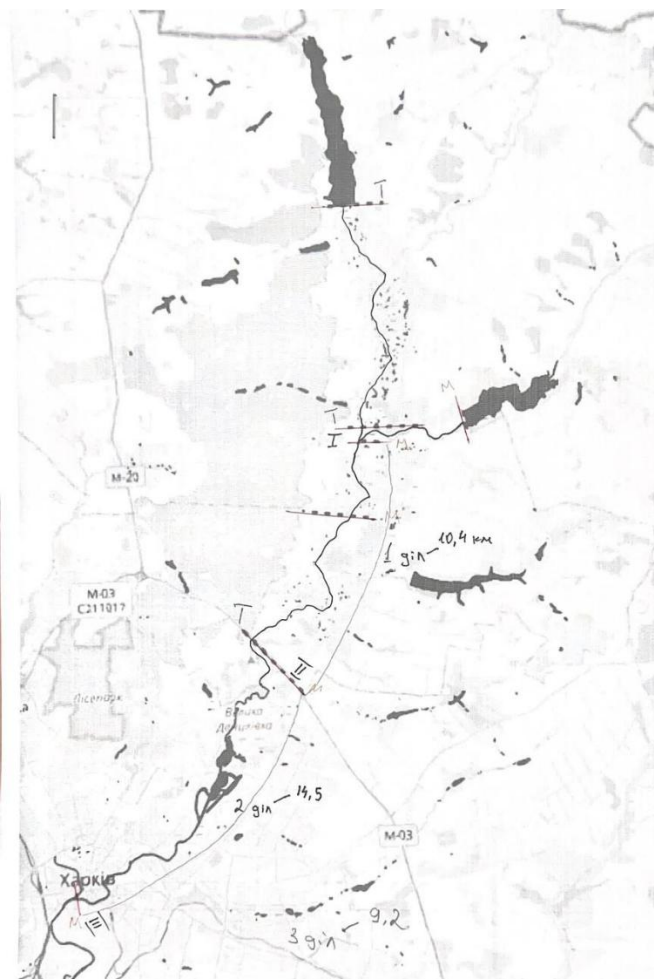


Рис. 3.3. Схема поділу території на створи та ділянки

Спочатку розраховуються саме показники для створів, адже значення ділянок залежать від отриманих характеристик пропускної хвилі у створах. Утім, не можна сказати, що показники для ділянок є середніми значеннями між створами. Після розрахунків межових показників, отримуються нові ввідні, важливі для обчислення поведження руху води на ділянках.

Результати описаних вище розрахунків наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Результати розрахунків характеристик проривної хвилі

I СТВОР		
Показник	Результат	Величина
Висота хвилі прориву $H_{VI}$	5.00	м
Час проходження хвилі через I створ $T_I$	6.64	год

Продовження таблиці 3.1

I ДІЛЯНКА		
Час добігання гребня хвилі від I до II створу $t_I$	0.80	год
II СТВОР		
Відносний коефіцієнт $K_I^*$	0.10	-
коефіцієнт $K_H^*$	0.35	-
Висота хвилі прориву $H_{VII}$	1.75	м
коефіцієнт $K_T^*$	2.05	-
Час проходження хвилі через II створ $T_{II}$	13.60	год
II ДІЛЯНКА		
Час добігання гребня хвилі від II до III створу $t_{II}$	1.30	год
III СТВОР		
Висота хвилі прориву $H_{VIII}$	0.60	м
Відносний коефіцієнт $K_I$	0.10	-
коефіцієнт $K_H$	0.35	-
коефіцієнт $K_T$	2.05	-
Час проходження хвилі через III створ $T_{III}$	27.90	год
III ДІЛЯНКА		
Час добігання гребня хвилі від III до IV створу $t_{III}$	3.3	год
IV СТВОР		
Висота хвилі прориву $H_{VIII}$	0.60	м
Відносний коефіцієнт $K_I$	0.1	-
коефіцієнт $K_H$	0.9	-
коефіцієнт $K_T$	1.1	-
Час проходження хвилі через IV створ $T_{III}$	30.7	год

\* коефіцієнти  $K_H$  та  $K_T$  беруться з відповідних таблиць в результаті розрахунку відносного коефіцієнту  $K_I$

Після розрахунків характеристик проривної хвилі, отримуємо основні показники, а саме висоту хвилі прориву та час проходження хвилі через створи, що будуть використовуватися в подальших розрахунках параметрів зони затоплення. До параметрів зони затоплення відносяться:

- 1) максимальна відмітка гребня хвилі прориву ( $H_{cp}$ , м);
- 2) відмітка рівня води затоплюваної ділянки ( $H_{cep}$ , м);
- 3) ширина затоплюваної ділянки ( $B_p$ , м).

Параметри, знову ж таки, розраховуються спочатку для створів, а потім для ділянок. Результати розрахунків наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

## Результати розрахунків параметрів зони затоплення

Показник	Результат	Величина
У СТВОРАХ		
Максимальна відмітка гребня хвилі прориву $H_{cp1}$	5.40	м
Максимальна відмітка гребня хвилі прориву $H_{cp2}$	1.9	
Максимальна відмітка гребня хвилі прориву $H_{cp3}$	0.7	
Максимальна відмітка гребня хвилі прориву $H_{cp4}$	0.6	
Відмітка рівня води затоплюваної ділянки $H_{cepI}$	3.2	м
Відмітка рівня води затоплюваної ділянки $H_{cepII}$	1.4	
Відмітка рівня води затоплюваної ділянки $H_{cepIII}$	0.6	
Відмітка рівня води затоплюваної ділянки $H_{cepIV}$	0.5	

## Продовження таблиці 3.2

Ширина затоплюваної ділянки $B_{pI}^{**}$	860	М
Ширина затоплюваної ділянки $B_{pII}$	580	
Ширина затоплюваної ділянки $B_{pIII}$	260	
Ширина затоплюваної ділянки $B_{pIV}$	100	
НА ДІЛЯНКАХ		
$B_{сер\ д\ I}$	720	М
$B_{сер\ д\ II}$	420	
$B_{сер\ д\ III}$	180	
$H_{сер\ д\ I}$	2.3	М
$H_{сер\ д\ II}$	1.0	
$H_{сер\ д\ III}$	0.5	

\* ширина затоплюваної ділянки визначається графічно. Поперечні графіки будуються для кожного зі створів, після чого наноситься показник відмітки рівня води. У місцях, де відмітка рівня води перетинається з горизонталлями (відмітки висоти, на графіку вісь  $Y$ ), спускають уявні прямі до осі  $X$  (довжина повздовжнього перерізу). Приклад одного зі створів, побудованого за допомогою програмного забезпечення ArcGIS та додатково відмасштабованого по осях у AutoCAD, наведено на рис.3.4. Саме завдяки роботі в AutoCAD було виміряно ширину затоплення (фіолетова лінія). Альтернативою AutoCAD може бути ручна побудова графіку на міліметровому папері. Утім, цей метод не такий автоматизований та швидкий, як в програмному забезпеченні ГІС та AutoCAD.

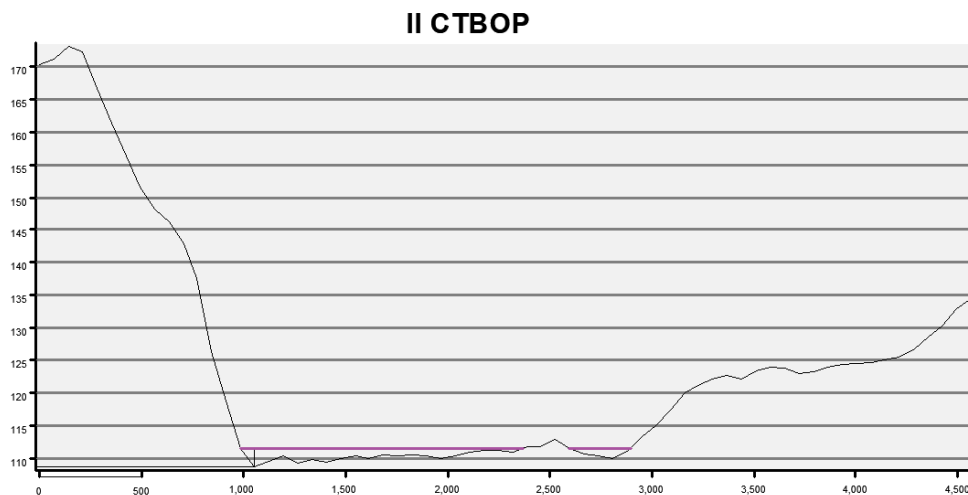


Рис.3.4 Приклад поперечного перерізу II створу

Далі розраховується побутова витрата води на ділянках ( $W$ , м<sup>3</sup>). Результати розрахунків:

$W_I$	13,413,600.0 м <sup>3</sup>
$W_{II}$	4,226,985.0 м <sup>3</sup>
$W_{III}$	1,928,934.0 м <sup>3</sup>

Сумарно, побутова витрата води становить 19,57 млн м<sup>3</sup>, що є менше за показник об'єму НІР. Остаточним параметром зони затоплення стає сумарна площа затоплення, що у випадку з Трав'янським водосховищем становить приблизно 505 га.

У результаті проведених розрахунків, було отримано основні показники, які в подальшому будуть піддаватися картографуванню, а саме *відмітка рівня води* (в цьому контексті на скільки метрів підніметься вода по горизонталях у площині поперечного перерізу) та *ширину зони затоплення*.

### 3.3. Картографічна інтерпретація отриманих розрахунків

Укладання карти ймовірних зон затоплення є одним із ключових етапів просторового аналізу ризиків, пов'язаних із руйнуванням гідротехнічних споруд. Така карта слугує основою для оперативного планування заходів цивільного захисту, прогнозування техногенно-екологічних наслідків та підтримки прийняття рішень у надзвичайних ситуаціях. З огляду на складність гідрологічних процесів і багатофакторність впливу різних факторів, методика побудови карти має спиратися на інтеграцію геопросторових даних, цифрових моделей рельєфу та гідрологічних розрахунків. У цьому підпункті буде запропоновано методику укладання такої карти, із врахуванням географічних особливостей території дослідження.

Підготовка просторових даних, їхнє опрацювання та побудова фінальної карти затоплення здійснюватиметься із залученням двох програмних середовищ геоінформаційного аналізу – QGIS та ArcGIS. Таке поєднання дозволяє

оптимізувати як етап попередньої підготовки даних (обрізка, проектування, генерація масок, побудова моделей), так і етап візуалізації результатів на фінальній карті. Основою для моделювання зон затоплення слугуватиме цифрова модель рельєфу, яка є ключовим джерелом висотної інформації для розрахунків можливого поширення води при піднятті рівня внаслідок прориву ГТС.

Серед доступних у відкритому доступі джерел цифрових моделей рельєфу, для цілей цього дослідження використовується DEM із просторовою роздільною здатністю 30 метрів (дані SRTM). Попри обмежену деталізацію, така модель залишається прийнятною для побудови орієнтовних (скринінгових) карт зон затоплення, особливо для великих територій. Однак варто зазначити, що точність визначення висотних відміток прямо залежить від роздільної здатності DEM, тому моделі з більш високою деталізацією (наприклад, 10 м або 1 м, зібрані за допомогою LiDAR або фотограмметричних методів) можуть істотно зменшити похибку при визначенні меж потенційного затоплення, зокрема в урбанізованих або малорельєфних районах. З огляду на це, застосування DEM із 30-метровою роздільністю є компромісним рішенням, яке забезпечує базовий рівень надійності за обмеженості вхідних даних.

Отже, розробка карти скрадатиметься з наступних етапів:

- 1.** Підготовка та завантаження необхідних векторних об'єктів (лінійні річки, площинні водні об'єкти) та DEM до осередку QGIS. Після опрацювання необхідних даних, приводимо їх до належного вигляду (обрізаємо DEM, перепроєктуємо у потрібну локальну проєкцію, змінюємо стилізацію шкали висот, вивантажуємо горизонталі з DEM) (рис. 2.3).

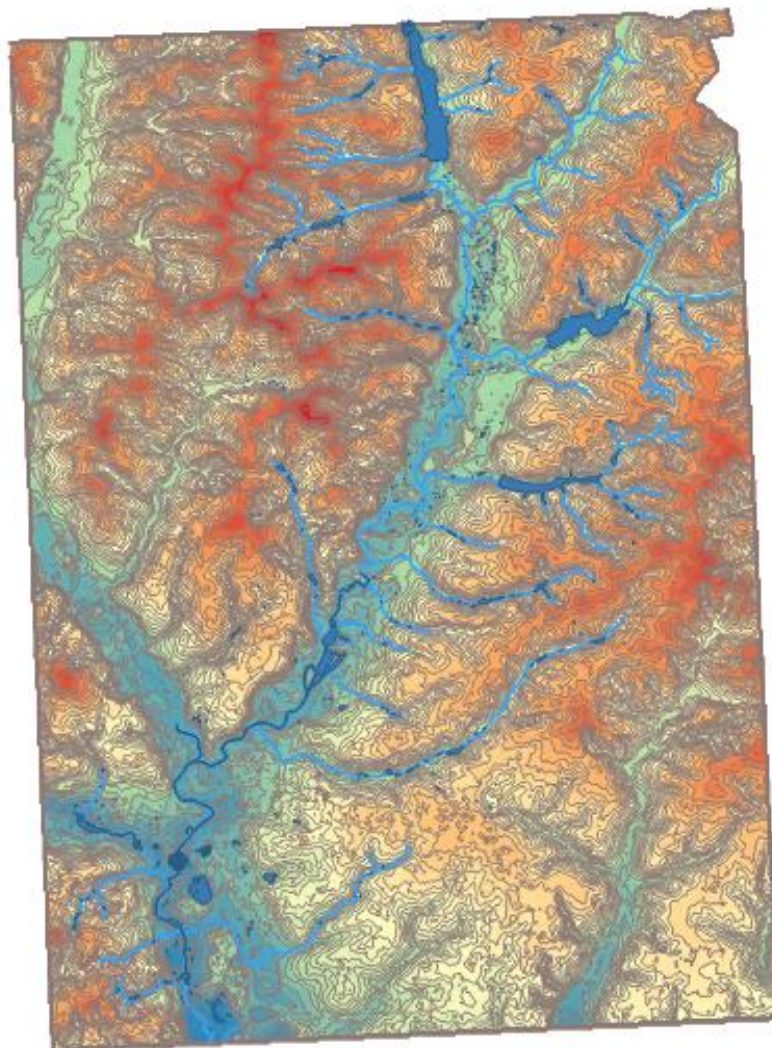


Рис. 3.5. Проміжний результат 1 етапу

2. Далі необхідно вирішити питання нанесення зони затоплення, враховуючи її ширину та висоту підняття рівня води. Попередні необхідні розрахунки були підготовані, тепер варто поєднати їх з висотами місцевості. Отримуємо значення, що відповідають ізолініям, які будуть затоплені або ж підтоплені. Отримуємо наступне:

<i>Ділянка</i>	<i>Відмітка рівня води, м</i>	<i>Значення ізолінії, м</i>
I	3,3	123,2
II	1,0	110
III	0,5	95,5

Для автоматизації побудови зони затоплення буде використовуватися Raster Calculator на основі DEM. Також корисно було б мати растр глибин затоплення,

якого в цьому випадку, на жаль, немає. Отриманий вище растр (рис.3.5) відображає висотну ситуацію не лише в межах потенційного затоплення. На основі цього шару варто встановити порогове значення висоти, нижче якого територія вважається затопленою.

У Raster Calculator задається логічна та доволі проста умова:

$$\text{"clipped\_dem@1"} < X,$$

де clipped\_dem@1 – назва підготовленої DEM,

X – обране критичне значення висоти.

У результаті виконання операції порогової класифікації формується бінарний растр, у якому кожен піксель із висотним значенням, що не перевищує встановлений критичний поріг, отримує значення 1, тоді як решта – 0 (рис. 3.6). Такий підхід дає змогу чітко виокремити потенційно затоплювані ділянки та забезпечити їх подальший аналіз та гідрофізичне редагування у межах моделювання сценаріїв аварійного розливу води. Відповідно до цього алгоритму було згенеровано три окремі растрові масиви, кожен із яких відповідає кожній модельній ділянці та відображає локальні особливості рельєфу й можливого поширення потоку

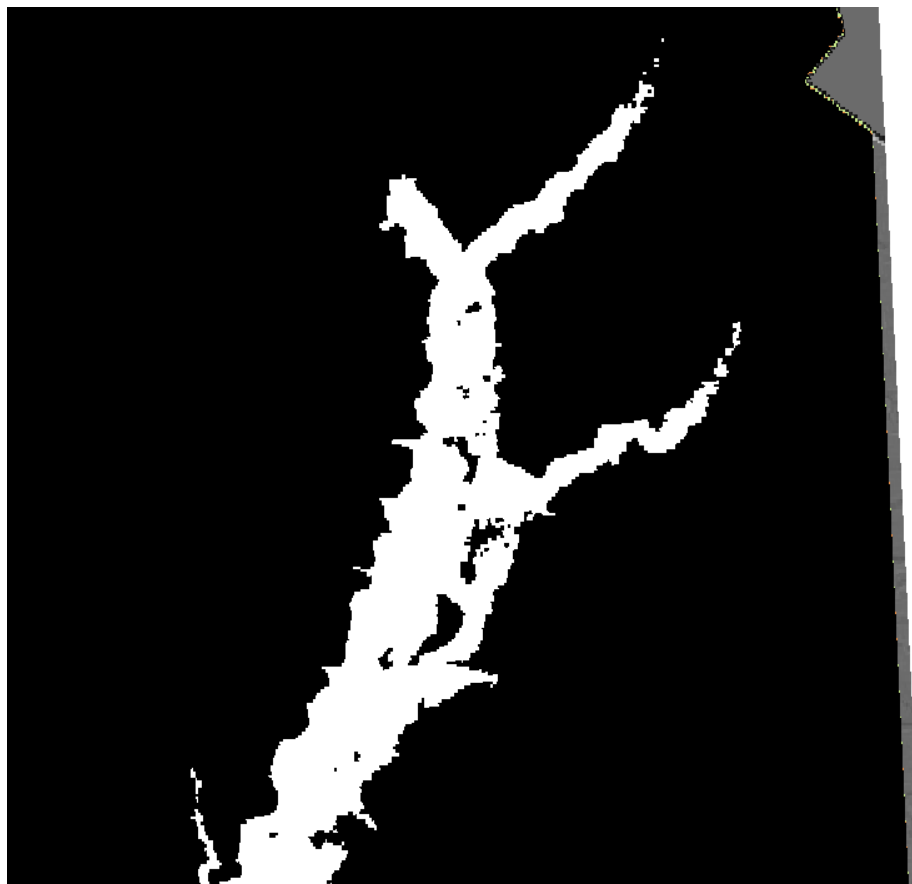


Рис. 3.6. Проміжний результат 2 етапу

3. Для забезпечення більш наочної й картографічно коректної візуалізації результатів просторового аналізу, отримані растрові шари доцільно перетворити у векторний формат. Це здійснюється за допомогою стандартного інструмента Raster to Polygon. У процесі векторизації пікселі з однаковим значенням об'єднуються в полігональні об'єкти, що дозволяє представити зони затоплення у вигляді контурів або площ із чітко заданими межами. Такий формат є значно зручнішим для подальшої стилізації, просторових обчислень та створення фінальних карт. Після завершення процедури векторизації, всі полігони, що репрезентують окремі ділянки зон затоплення, об'єднуються в один суцільний векторний шар (рис. 3.7.).

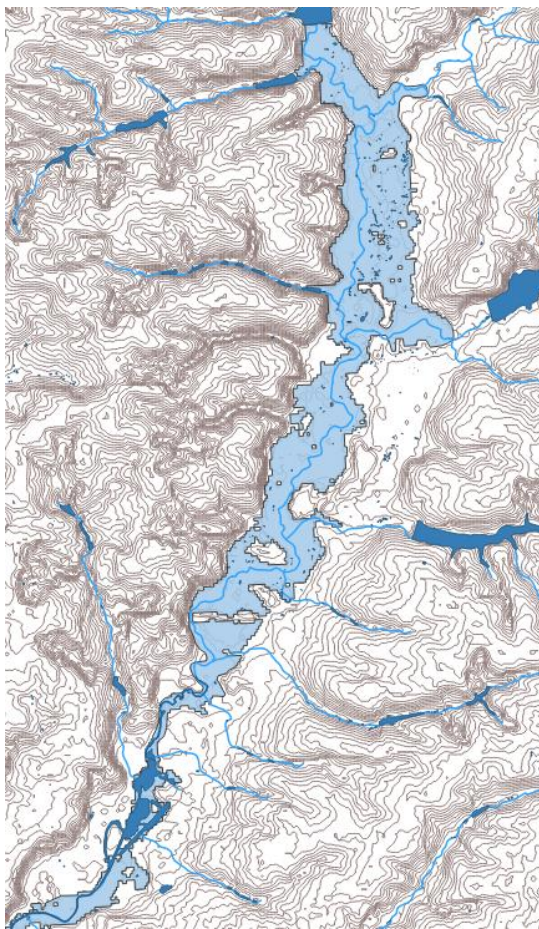
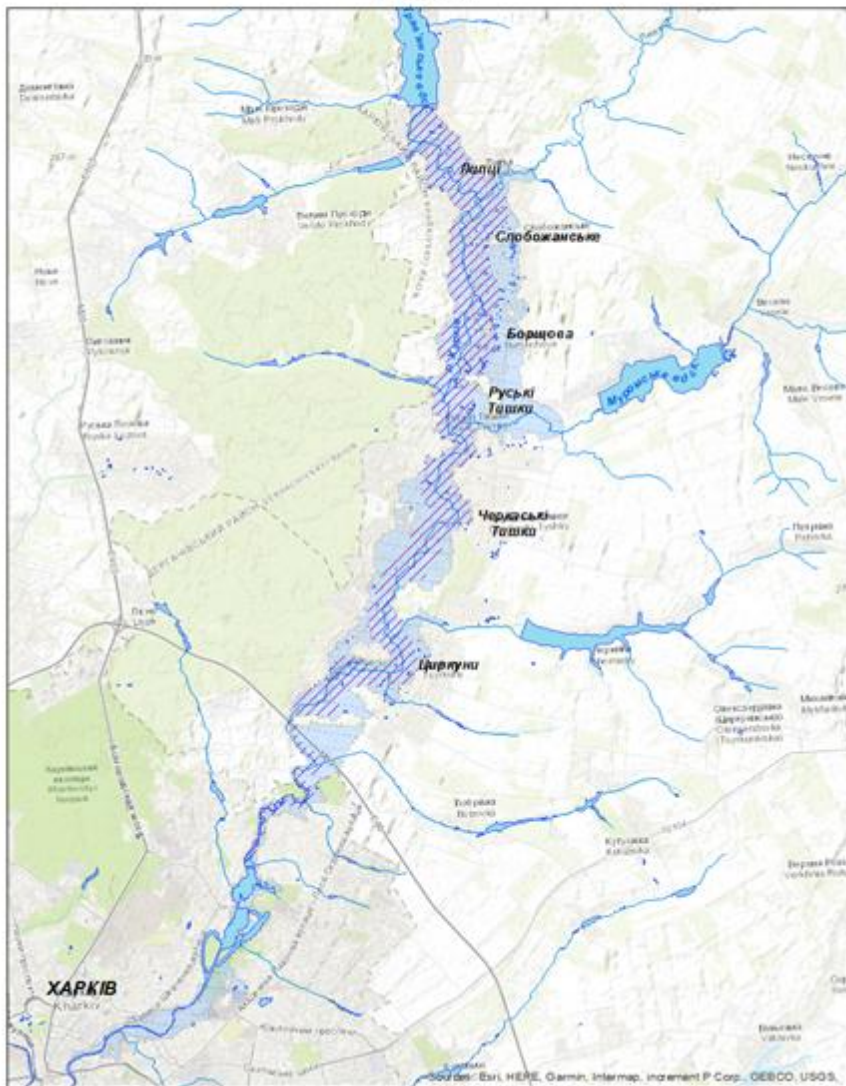


Рис. 3.7. Проміжний результат 3 етапу

4. Далі процес укладання фінального картографічного твору переходить у середовище ArcGIS. На цьому етапі підключаються всі підготовлені векторні та растрові шари. Для зручності орієнтації та покращення читабельності фінальної карти, як підкладка використовується Base Map – базовий шар, що відображає основну адміністративну інформацію (наприклад, OpenStreetMap або Topographic Map з каталогу ESRI). Основною логічною вимогою до побудови фінальної карти є наочне представлення масштабів затоплення в межах населених пунктів, що дозволяє виявити ступінь потенційної загрози для житлової забудови, об'єктів критичної інфраструктури та соціальних установ.

У результаті проробленої роботи отримуємо наступний картографічний твір (рис. 3.8.).

**ЙМОВІРНА ЗОНА ЗАТОПЛЕННЯ  
ПРИ ПРОРИВІ ГТС ТРАВ'ЯНСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА**  
1 : 120 000



**РЕЛЬЄФ ДІЛЯНКИ ЗАТОПЛЕННЯ**  
1 : 250 000

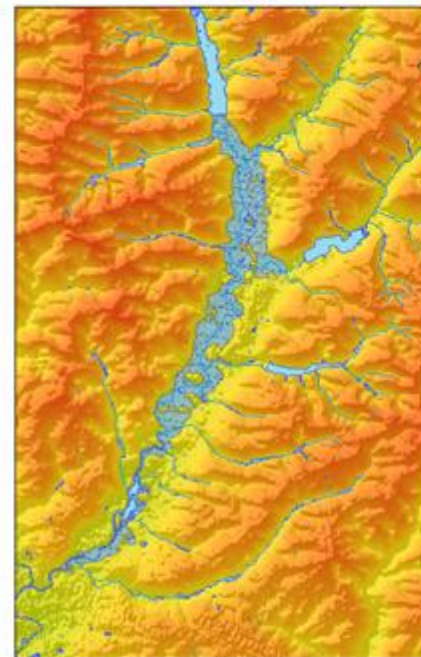


Схема розташування ділянки



**Характеристики водосховища**

Об'єм	22,2	млн. метрів кубічних
Середня глибина	3,8	метрів
Максимальна глибина	9,0	метрів
Нормальний підпірний рівень	128,0	метрів
Рівень мертвого об'єму	122,6	метрів

**Основні параметри затоплення**

Час спорожнення	7,0	годин
Тривалість затоплення	79,0	годин
Максимальна висота гребня хвилі	5,4	метрів
Середня висота гребня хвилі	2,1	метрів
Середня ширина затоплення	440,0	метрів

Рис. 3.8. Карта ймовірних затоплень при прориві гідропороди Трав'янського водосховища

Метод визначення зон надзвичайного затоплення за допомогою Raster Calculator є доцільним завдяки його простоті, прозорості й гнучкості налаштувань. На відміну від складних гідродинамічних моделей (наприклад, HEC-RAS), цей підхід дає змогу оперативно виділити найуразливіші ділянки території, використовуючи лише ЦМР та розрахунки характеристик проривної хвилі. Цінність цього методу полягає у можливості адаптувати порогові значення під конкретну ситуацію або сценарій затоплення, а також швидко оновлювати результати при зміні вихідних даних.

Цей метод рідко описується в літературі як окрема самостійна процедура для виділення зони надзвичайного затоплення. Хоча Raster Calculator активно застосовується в багатьох ГІС-аналізах, здебільшого це стосується більш простіших тематичних задач. У контексті формування критичних ділянок затоплення цей підхід можна вважати інноваційним або щонайменше слабо репрезентованим у наукових та прикладних дослідженнях. Таким чином, описана методика перебуває на стику методологічного експерименту та практичного рішення, а по суті, розширює можливості існуючих інструментів ГІС для задач просторового ризик-аналізу.

У перспективі подальшого розвитку дослідження та підвищення точності моделювання зон затоплення можливим є перенесення картографічного аналізу в гідродинамічне програмне середовище HEC-RAS, зокрема в його останні версії, які підтримують 2D-моделювання поверхневого стоку. Візуалізація зони затоплення, представлена на рис. 3.8., може бути перебудована з урахуванням реальних гідравлічних параметрів течії, що дасть змогу порівняти результати аналітичного підходу в ГІС із гідродинамічним моделюванням у HEC-RAS. Проте для повноцінного використання HEC-RAS потрібні більш точні вхідні дані, а саме: високо деталізовані цифрові моделі рельєфу (бажано з роздільною здатністю 10 м або менше), гідрологічні характеристики водотоків, а також геометрія русла та заплави (створи, обмежувальні структури). Крім того, модель вимагає комплексної підготовки геометрії потоку в координатному середовищі HEC-GeoRAS або

безпосередньо в ArcGIS/HEC-RAS Mapper. Незважаючи на складність, впровадження такого підходу дозволить не лише верифікувати попередні результати, отримані засобами ГІС-аналізу, а й розширити достовірність прогнозування глибини та динаміки затоплення в умовах різних сценаріїв паводків чи аварійних ситуацій на гідротехнічних спорудах.

#### 3.4. Оцінка відповідності результатів моделювання реальним наслідкам аварії

Створене картографічне зображення моделює найгірший сценарій розвитку при аварії на ГТС, але в реальності ситуація з Трав'янським водосховищем мала більш помірний характер, що утім, не зменшує наслідків подібної аварії. Влітку 2025 року ГТС Трав'янського водосховища була пошкоджена, в наслідок чого відбувся нерегульований спуск води (рис. 3.9., 3.10.). російські загарбники пошкодили шахтний водоскид та водоскидний тунель, завдавши по ньому цілеспрямованого удару [49]. В липні 2025 року, майже весь масив води, окрім РМО, витік з водосховища.



Рис. 3.9. Стан ГТС Трав'янського водосховища після руйнування [50]

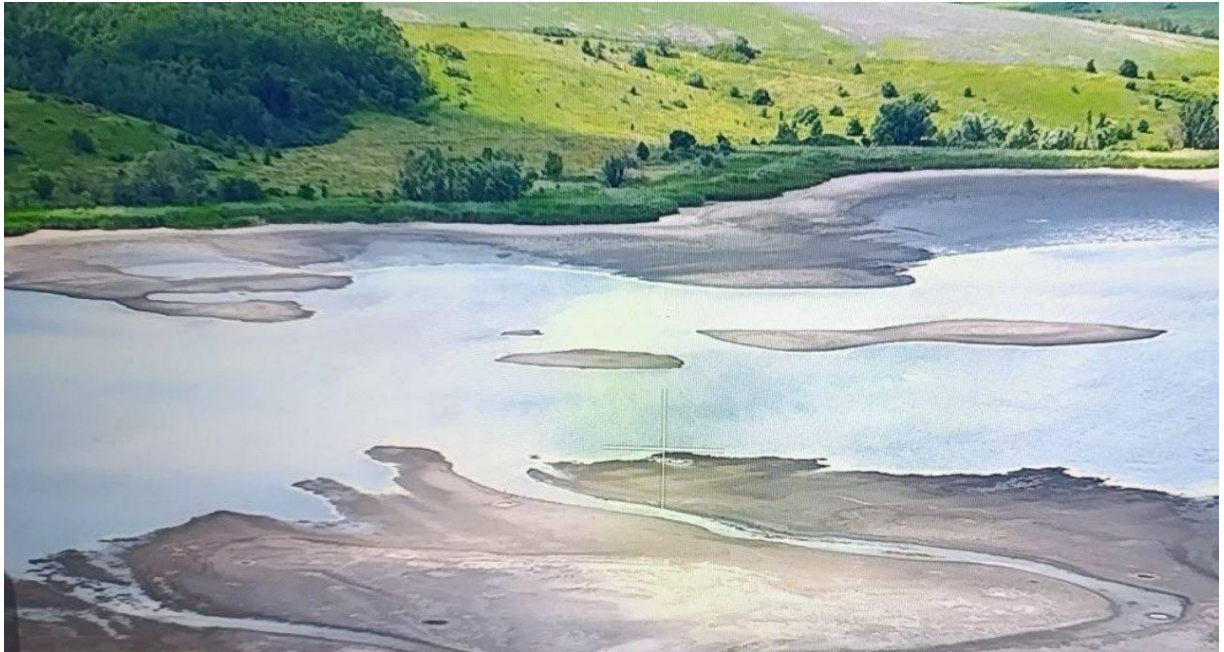


Рис. 3.10. Стан Трав'янського водосховища після спуску води [58]

Карта затоплення територій при прориві ГТС Трав'янського водосховища була укладена в червні 2025 року, до удару загарбників по цій гідроспоруді. Подібна ситуація дозволяє порівняти та унаочнити отримані результати з реальною ситуацією на місцевості. Для цього будуть використовуватися космічні знімки водойми за період до руйнування та після в різних спектрах.

Станом на квітень 2025 року, водойма мала повний об'єм. На жаль, автору не вдалося знайти знімків в період неконтрольованого спуску води через відсутність даних за серпень 2025 року. В липні того ж року водойма не має об'єму для подальшого функціонування навіть на найменших можливостях (рис. 3.11).

Представлені нижче знімки зняті в спектрі NDWI (нормалізований диференційний індекс води). Цей індекс використовується для моніторингу змін, пов'язаних з вмістом води у водоймах, що ідеально підходить для представлення наслідків втрат масивів води у Трав'янському водосховищі.

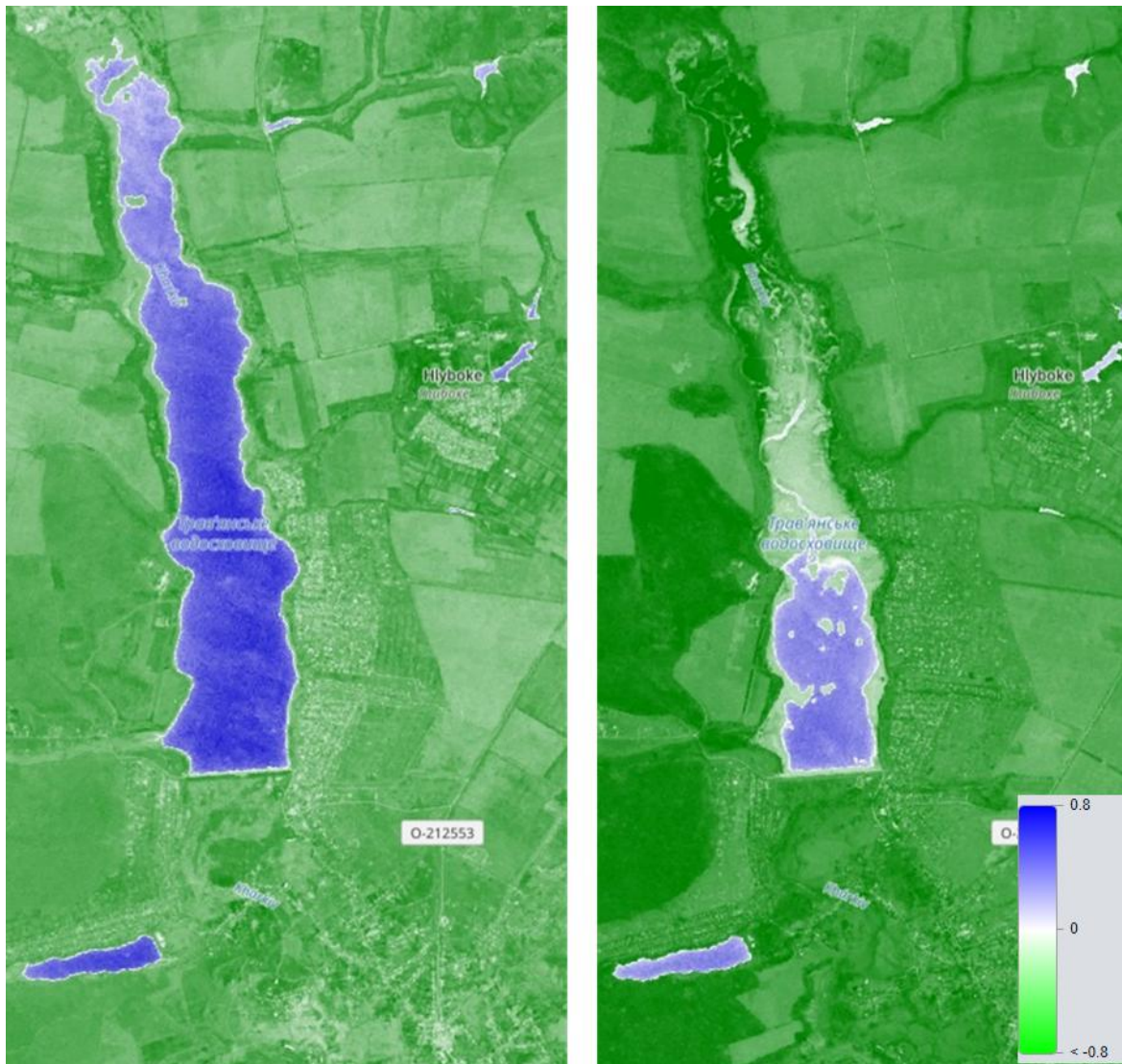


Рис. 3.11. Космічні знімки Трав'янського водосховища [51].  
Перше зображення – стан водойми на 20.04.2025, друге – 28.08.2025

Шкала варіюється від 0 до 0,8 та відповідно -0,8. В даному випадку, водні об'єкти мають додатне значення вище 0 і позначаються синім кольором, зелений колір відповідає рослинності, світло зелений колір з другого знімку позначає зневоднену ділянку.

Розглянуті зміни наповнення Трав'янського водосховища, дають наочну картину ситуації, що склалася навколо об'єкту. Одначе, у випадку співставлення результатів, необхідні зміни в долині річки Харків від нижнього б'єфу. Для цього будуть використовуватися космічні знімки, зняті в ті самі проміжки часу, що й попередні, утім у спектрі NDMI (нормалізований диференційний індекс вологості).

Перед аналізом змін у долині, а саме заплаві, передусім варто розуміти гідрологічні особливості річки Харків. Максимальне водопілля або повінь на річці Харків припадає на весняний період, коли відбувається поповнення води за рахунок снігів, що тануть (рис. 3.12). Відповідно, збільшується і поверхневий стік [57].

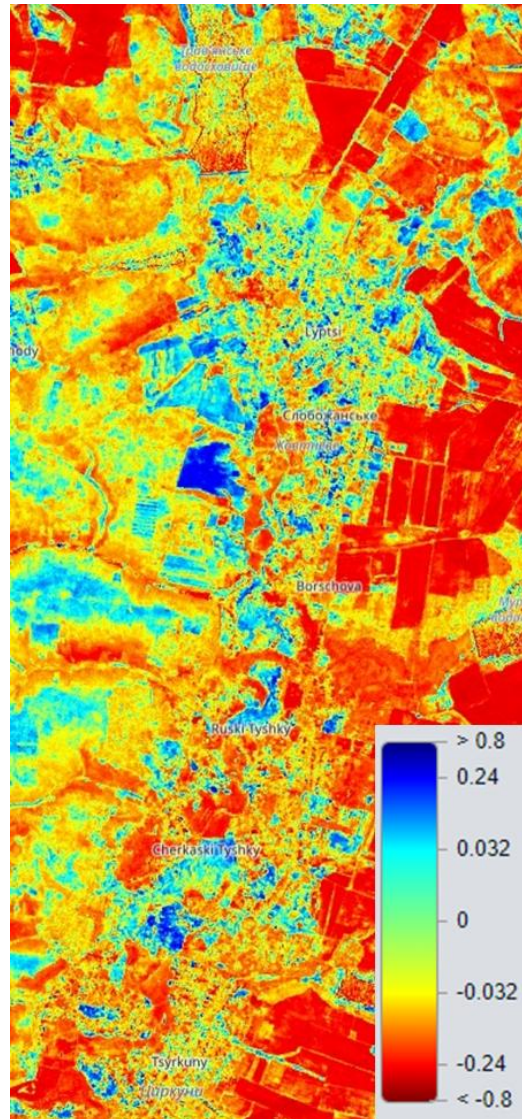


Рис. 3.12. Космічний знімок долини річки Харків нижче Трав'янського водосховища за 20.04.2025 [51].

Оскільки зима 2025 року не характеризувалася надмірною кількістю опадів, гідрологічний режим річки Харків протягом весняного періоду залишався у межах середньобогаторічних значень, без проявів істотного розливу у заплаві. Аналіз супутніх кліматичних показників засвідчує, що сніговий покрив був незначним, а його танення поступовим, що

унеможливило формування повені природного походження. У літні місяці спостерігалася стійка тенденція до зниження рівнів води в більшості малих річок басейну Сіверського Дінця, зокрема у руслі річки Харків. Станом на липень 2025 року територія Харківської області загалом відзначалася ознаками гідрологічної посухи. Зменшувалася водність малих річок, знижувався рівень води у ставках і водосховищах, подекуди пересихали заплавні водойми.

На цьому фоні аномально високі показники вологості, зафіксовані у долині річки на супутниковому знімку серпня 2025 року (рис. 3.13), не можуть бути пояснені природними причинами, що дає змогу ідентифікувати подібні показники як наслідок витоку води з водосховища.

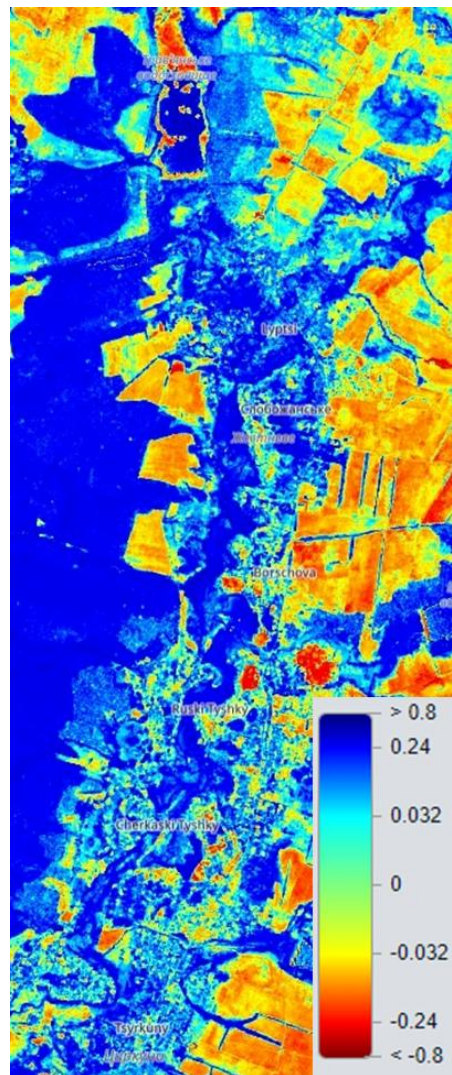


Рис. 3.13. Космічний знімок долини річки Харків нижче Трав'янського водосховища за 28.08.2025 [51].

Аналіз нормалізованого диференційного індексу вологості показав локальне підвищення вологості у межах долини річки Харків між квітнем і серпнем 2025 року. Якщо на більшій частині досліджуваної території NDMI знизився (що відповідає сезонному висиханню ґрунтів у літній період), то в межах заплави річки зафіксовано аномальне збільшення індексу до значень в межах від 0.3 до 0.6, що характерно для вологих або частково затоплених ділянок. Просторове поширення ділянок з високими значеннями NDMI узгоджується з формою долини та напрямком стоку від Трав'янського водосховища, що все ж таки дозволяє припустити підтоплення внаслідок нештатного витоку або скиду води.

Тепер, маючи загальну картинку ситуації, можна порівняти результати укладеної карти з наявним станом речей (рис. 3.14). Зона надзвичайного затоплення позначена штрихуванням і відображає граничну межу поширення водного потоку у разі реалізації катастрофічного сценарію руйнування греблі. На відміну від потенційної зони затоплення, яка враховує гідрологічні та морфометричні параметри заплави в межах нормальної експлуатації ГТС, надзвичайна зона базується на повному руйнуванні водоутримуючих елементів і миттєвого вивільнення об'єму води з водосховища.

Порівняння цієї межі з показниками вологи на супутниковому знімку демонструє, що найбільш насичені вологою ділянки просторово збігаються з центральною частиною прогнозованої зони надзвичайного затоплення, зокрема в межах заплави між селами Борщова, Руські Тишки та Черкаські Тишки. Це вказує на коректність напрямку поширення потоку.

Водночас площа ймовірного затоплення є істотно більшою за розрахункову зону надзвичайного затоплення, що пояснюється характером події: витік води мав інакший характер і не досяг повної потужності гідродинамічного руйнування, закладеної в моделі. Таким чином, межі надзвичайного затоплення мають розглядатися не як фактичні, а як прогнозні для подібних подій у майбутньому.

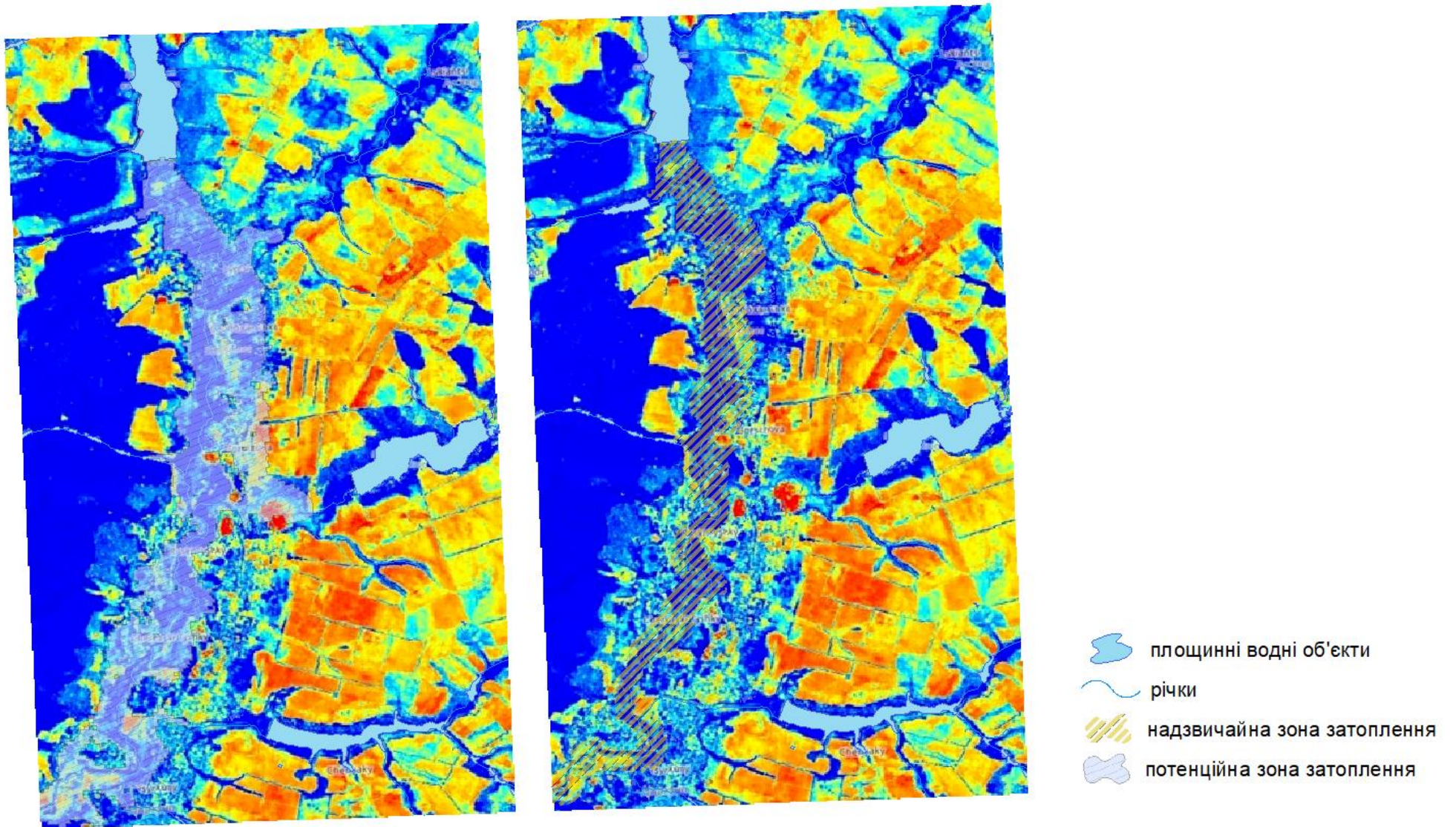


Рис. 3.14. Співставлення отриманих зон затоплення з космічними знімками за 28.08.2025

### 3.5. Аналіз наслідків аварії на Трав'янському водосховищі згідно розробленої моделі

Географічний аналіз просторових наслідків аварії на ГТС Трав'янського водосховища ґрунтується на поєднанні результатів моделювання зон затоплення, морфологічної вразливості території та супутникових індикаторів зміни поверхневих характеристик місцевості. Такий інтегрований підхід дозволяє дослідити не лише площу й напрямок поширення водної маси, але й просторову структуру впливу аварії на природні ландшафти та інфраструктуру.

У межах долини річки Харків, яка є основним водоприймачем Трав'янського водосховища, хвиля аварійного затоплення поширюється переважно вздовж природного руслового зниження. Долина має витягнутий характер із чітко вираженою заплавою, яка виступає природним коридором для руху води. У місцях, де долина розширюється (район М. Проходів, Слобожанського), потенційна зона затоплення набуває ширшої конфігурації, що підтверджено результатами моделювання. Натомість у сегментах зі звуженням русла, сформованих балково-яружними системами (Черкаські Тишки, Руські Тишки), поширення хвилі звужується та подовжується, що створює більший гідродинамічний тиск у пониженнях. Основними напрямками руху водної маси виступають заплавні лінійні пониження, староріччя, тальвеги балок та ділянки локального стоку, які були ідентифіковані як геоморфони типу «долина», «улоговина», «поєднані улоговини». Саме ці морфологічні форми визначили конфігурацію первинного та вторинного розтікання води.

Рельєф є ключовим чинником просторової диференціації руху водних мас. Високі тераси та бортові ділянки долини, представлені геоморфонами типу «схил» та «вершина», формують природні бар'єри, які обмежують розширення зони затоплення і запобігають поширенню води у напрямку міжбалкових систем. Натомість заплавні ділянки та нижні тераси, де ухили є

мінімальними, виступають зонами акумуляції водної маси. Саме в таких ділянках потенційна глибина затоплення найбільша, що корелює з високими значеннями індексу морфологічної вразливості.

Особливо вразливими є замкнені пониження (локальні улоговини). У цих сегментах вода може затримуватися найдовше, формуючи застійні ділянки та спричиняючи вторинне підтоплення навіть після спаду основної хвилі.

Через відсутність у відкритих джерелах точних деталей аварії на Трав'янському водосховищі та складну безпекову ситуацію, визначення шкоди витоку води для ландшафтів можливо окреслити лише з наявних уявлень про можливі негативні наслідки впливу надмірної кількості води на них. Спектральний аналіз супутникових даних (NDMI, NDWI) свідчить про суттєве збільшення вологості ґрунтів у межах заплави у період, коли природне повноводдя річки є мінімальним (липень 2025 р.). Це підтверджує техногенний характер надмірного зволоження території, як було описано в попередньому підпункті. Потенційно, така висока водонасиченість могла призвести до оглеєння поверхневих горизонтів ґрунту, руйнування структури лучних комплексів (особливо біля нижнього б'єфу) та деградації заплавної рослинності. Також у місцях концентрації потоку можливе підмиття схилів, що ймовірно може спричинити додаткові ерозійні процеси, особливо на схилах правобережжя долини.

Серед наслідків, що стосуються гідрологічних аспектів, можна виокремити локальне розширення русла внаслідок штучного розлиття, формування тимчасових водних об'єктів у пониженнях та тимчасову зміну характеру поверхневого стоку. Для порівняння станів будувати використовуватися космічні знімки в композиті короткохвильового інфрачервоного діапазону (SWIR) (рис. 3.15). Дані, отримані в цьому композиті, наочно показують вміст води в рослинності та ґрунті, адже вода добре поглинає ці хвилі. У побудованому композиті рослинність позначається

відтінками зеленого, ґрунт і штучні об'єкти – різними відтінками коричневого, тоді як вода показується чорною.

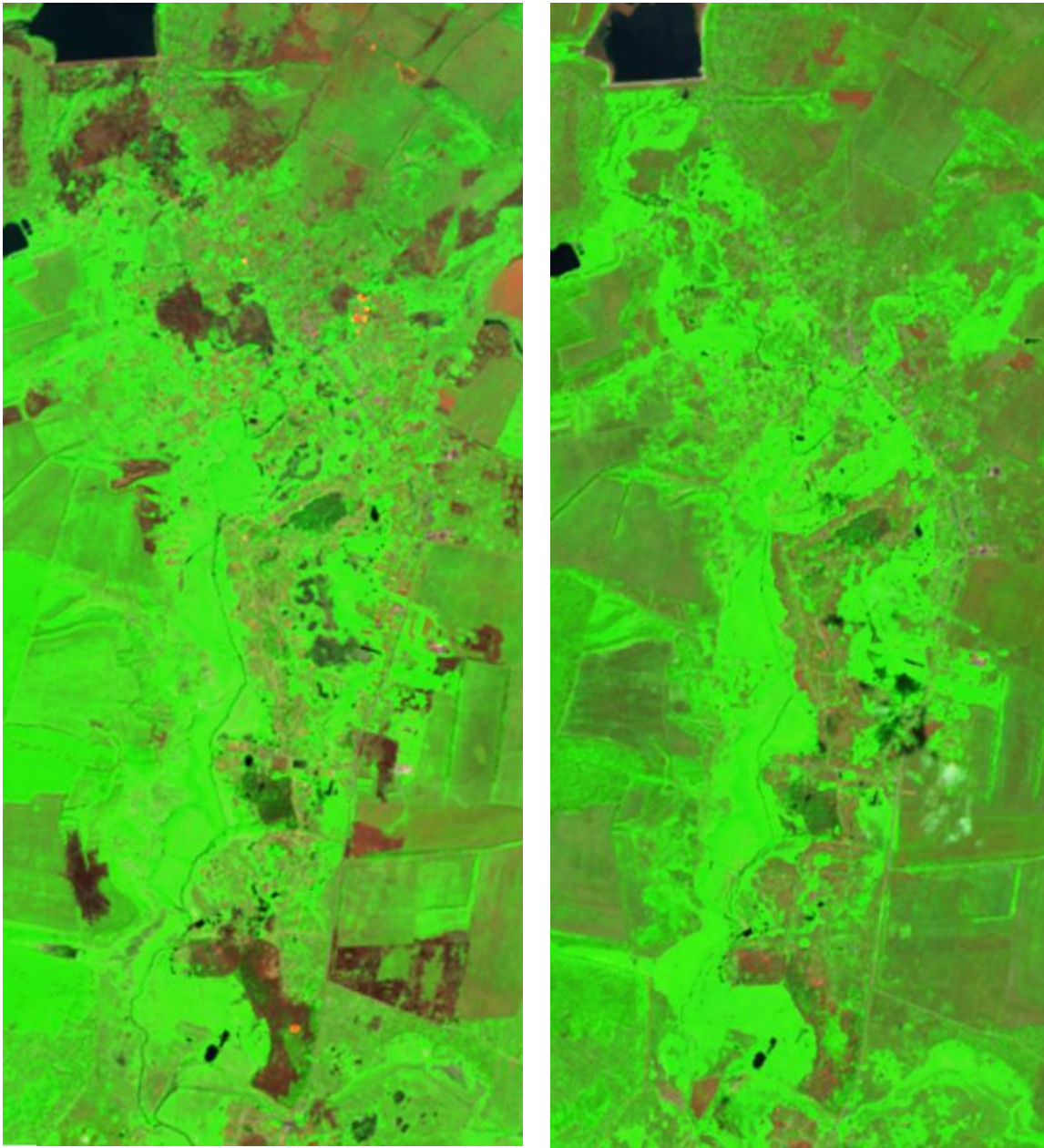


Рис. 3.15. Космічні знімки частини долини річки Харків за 14.07.2024 та відповідно другий – за 14.07.2025 [51].

У 2024 році заплава демонструє однорідні тони, характерні для сухого літнього періоду та низької водності річки. Зображення за 2025 рік відзначається різким збільшенням світло зелених ділянок та формуванням чіткої форми, що спектрально можна приурочити перезволоженим ґрунтам, застійним водним площам та пригніченій рослинності. У пониженнях та тальвегах простежується поява нових плям вологи та локальних водойм,

повністю відсутніх на знімку попереднього року, що вказує на порушення природного гідрологічного режиму.

Зміни мають чітко просторово організований характер: зона підвищеної вологості у 2025 році значно розширилася вздовж заплави та набула чіткої форми, що узгоджується з напрямом потенційної хвилі аварійного затоплення. З огляду на те, що 2025 рік характеризувався вираженою літньою посухою, а в дданому випадку липень став періодом мінімальної водності, зафіксовані спектральні аномалії не можуть бути пояснені природними чинниками й вчергове підтверджують часткову достовірність розрахунків та карти.

Щодо інфраструктури населених пунктів, розташованих в межах долини, то можна сказати, що вона зазнає нерівномірного ризику. Найбільшій потенційній небезпеці піддаються логістичні шляхи в межах заплави, відповідно це мости та ділянки автомобільних доріг, лінії електропередач та забудова. Результати моделювання показують, що у районах Черкаських Тишок та Слобожанського інфраструктурні об'єкти розташовані в межах зон середньої та високої морфологічної вразливості, що збільшує ризик їхнього пошкодження та ускладнює логістику в умовах надзвичайної ситуації. Отже, найбільший ризик затоплення існує для селищ, розташованих безпосередньо у долині або на її схилах, а саме:

- Черкаські Тишки та Руські Тишки, що розташовані у зоні розширеної заплави;

- Великі та Малі Проходи частково вразливі на периферійних ділянках;

- Слобожанське має високий ризик підтоплення з боку балкової системи;

- Борщова потенційно стикнеться з тривалим застійним затопленням.

Усі ці населені пункти демонструють збіг зон ризику з результатами MVI, що підтверджує коректність морфологічного моделювання.

Територія долини річки Харків виступає ядром морфологічно обумовленої небезпеки, тоді як прилеглі схили та тераси відіграють роль природних меж формування затоплення. Просторова конфігурація наслідків

аварії підтверджує, що рельєф і мікроморфологія є визначальними чинниками у формуванні характеру та масштабу негативних процесів.

## ВИСНОВКИ

У межах проведеного дослідження були комплексно розглянуті теоретичні, методичні та практичні аспекти прогнозування наслідків аварій гідротехнічних споруд, а також здійснено просторову оцінку можливих зон затоплення у разі руйнування Трав'янського водосховища. У ході дослідження було:

1. Проаналізовано наукові підходи до моделювання катастрофічних гідрологічних процесів, включно з гідродинамічними, морфометричними та картографічними методами. Визначено роль цифрових моделей рельєфу та дистанційного зондування в оцінці потенційних наслідків аварій ГТС. Показано, що європейські моделі традиційно орієнтовані на паводкові сценарії, тоді як моделювання підривів або неконтрольованих проривів у контексті антропогенних загроз залишається менш представленим. Це підкреслює необхідність адаптації класичних підходів до умов зростання техногенно-воєнних ризиків в Україні.

2. Охарактеризовано геолого-геоморфологічні, гідрологічні та ґрунтово-рослинні умови долини річки Харків. Також було складено основні технічні та гідрологічні характеристики Трав'янського водосховища. Встановлено, що територія має добре розвинену яружно-балкову мережу та виразну долинну систему, яка здатна спрямовувати потоки води у випадку аварії ГТС. Заплавні та лучно-солонцюваті ґрунти демонструють підвищену екологічну вразливість до тривалого затоплення, що може призвести до деградації верхнього горизонту, засолення та втрати біогенності.

3. Укладено карту геоморфонів досліджуваної території. За допомогою інструмента *r.geomorphon* у GRASS GIS виявлено десять типів локальних форм рельєфу, що формують морфоструктуру всієї досліджуваної ділянки. Отримана карта геоморфонів дозволила встановити просторове співвідношення долин, улоговин, схилів та вододілів, які визначають напрямки руху паводкових і проривних хвиль. Результати стали основою для

подальшого моделювання зон затоплення та розрахунку морфологічного індексу вразливості території.

4. Розроблено алгоритм картографічного моделювання зон затоплення на основі морфометричних даних. Завдяки ГС-інструментів було створено покрокову модель, що включає ряд певних кроків. Створений алгоритм на прикладі Трав'янського водосховища демонструє високу ефективність у визначенні ймовірних напрямків руху води та меж зон впливу.

5. Укладено карту затоплення територій при прориві ГТС Трав'янського водосховища. За результатами моделювання визначено, що основний простір затоплення зосереджений у межах долини р. Харків, де ширина паводкової хвилі може досягати значних значень у зоні запливи. Аналіз свідчить про істотне поширення води на урбанізовані ділянки, сільськогосподарські землі та техногенні території. Уточнено рівні ризику для різних типів інфраструктури. На основі супутникових знімків за 2024-2025 років виявлено певні зміни, що відображено у деградації відбитку урбанізованих територій та ландшафтних угруповань у різноспектральних космічних знімках. Також була проаналізована шкода розливу води для території зони впливу Трав'янського водосховища.

Розроблені матеріали отримали найвищу оцінку від керівництва Регіонального офісу водних ресурсів у Харківській області, зокрема була відзначена професійність та оперативність виконання поставленого завдання. Матеріали були взяті до подальшої роботи Харківською обласною військовою адміністрацією для моніторингу та оперативного реагування вразі аварійних ситуацій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мурасов Р., Тертишний Б. Методика розрахунку наслідків при проривах (руйнування) гідротехнічних споруд критичної інфраструктури. *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security»*. 2022. Vol. 12. № 6. С. 140-152. DOI: 10.33445/sds.2022.12.6.12.
2. Kotsyuruba, Volodymir & Proshchyn, Ihor. (2024). Удосконалена методика визначення параметрів руху хвилі прориву та затоплень під час зруйнування гідротехнічних споруд. *Journal of Scientific Papers Social development & Security*. 14. 127-137. DOI:10.33445/sds.2024.14.6.13.
3. Коцюруба В. І., Михайловський Д. В., Черевко Р. М., Камалов Є. В., Прощин І. В. Моделювання затоплення місцевості в наслідок зруйнування гідротехнічних споруд. Опір матеріалів і теорія споруд/*Strength of Materials and Theory of Structures*. 2023. № 111. DOI: 10.32347/2410- 2547.2023.111.87-101.
4. Стародуб Ю., Багнюк В. Моделювання та методика оцінки небезпеки інженерної обстановки при прориві греблі Середньодніпровської ГЕС. *Вісник ЛДУБЖД*. 2019. № 20. С. 96-100. DOI: 10.32447/20784643.20.2019.14.
5. Kaktins, Uldis & Todd, Carrie & Wojno, Stephanie & Coleman, Neil. (2013). Revisiting the Timing and Events Leading to and Causing the Johnstown Flood of 1889. *Pennsylvania History*. 80. 335-363. DOI: 10.5325/pennhistory.80.3.0335.
6. "The Malpasset Dam Disaster – could the Var suffer again? – *Riviera Reporter*. URL: [www.rivierareporter.com](http://www.rivierareporter.com). Retrieved 2018-04-23 (дата звернення 20.07.2025).
7. Release of 50,000,000 cubic metres of water at the Vajont Dam [on] 9 October 1963 [in] Erto e Casso (PN), Italy," *French Ministry for Sustainable Development*, November 2010, pp. 1-2.

8. "No Finger in the Dike Could Have Stopped It!". Idaho State Journal. Pocatello, Idaho. June 5, 1977. p. A7. Retrieved September 21, 2018. URL: Newspapers.com. (дата звернення 20.07.2025)
9. Outland, Charles F. (2002). *Man-Made Disaster: The Story of St Francis Dam* (revised ed.). The Arthur H. Clark Company. ISBN 0-87062-322-2.
10. Remembering the Baldwin Hills Dam Rupture «Community Development». Archived from the original on September 14, 2022.
11. «New Park Will Ease Squeeze in Inglewood». Los Angeles Times. May 6, 1976. p. CS1.
12. I-hui Ting, *Monsoons over China*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994, ISBN: 0-7923-1757-2, OCLC 25631301.
13. J. Schlosberg. "California's 'trillion dollar' mega disaster no one is talking about". ABC 7 Chicago. Archived from the original on December 7, 2020. Retrieved September 20, 2021.
14. Sahin, A. & Özkaya, Arzu. (2023). Multi-Criteria Decision Analyses for the Selection of Hydrological Flood Routing Models. *Water*. 15. DOI: 10.3390/w15142588.
15. Öztop, Abdullah & Özkaya, Arzu. (2025). The Development of a Flood Inundation Map: A Case Study of Karamustafa Village, Çankırı. 198-210. DOI: 10.29137/ijerad.1500097.
16. Adıgüzel, Nihal & İnce, Muhammed & Özkaya, Arzu. (2025). Determination and seasonal analysis of water levels in Seyhan Dam: A 30-year study using remote sensing techniques. *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 16. 235. DOI: 10.24012/dumf.1586135.
17. Shrestha S, Dahal D, Poudel B, Banjara M, Kalra A. Flood Susceptibility Analysis with Integrated Geographic Information System and Analytical Hierarchy Process: A Multi-Criteria Framework for Risk Assessment and Mitigation. *Water*. 2025; 17(7):937. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17070937>
18. Dahal, D.; Magar, B.A.; Aryal, A.; Poudel, B.; Banjara, M.; Kalra, A. Analyzing Climate Dynamics and Developing Machine Learning Models for Flood

Prediction in Sacramento, California. *Hydroecol. Eng.* 2024. DOI: <https://doi.org/10.70322/hee.2024.10003>

19. Poudel, B.; Dahal, D.; Banjara, M.; Kalra, A. Assessing Meteorological Drought Patterns and Forecasting Accuracy with SPI and SPEI Using Machine Learning Models. *Forecasting* 2024, 6, 1026-1044. DOI: <https://doi.org/10.3390/forecast6040051>

20. Vojtek, M.; Vojteková, J. Flood Susceptibility Mapping on a National Scale in Slovakia Using the Analytical Hierarchy Process. *Water* 2019, 11, 364. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11020364>

21. Коваленко П.І. та ін. Дослідження руслових процесів гірських річок// Меліорація і водне господарство. Київ: Аграрна наука, 2004. Вип. 90. С.183-190.

22. Vasyliuk, Oleksii & Kolodezhna, Valeriia & Demchenko, Viktor & Kuzemko, Anna & Marushchak, Oleksii & Moysiyenko, Ivan & Nekrasova, O. & Пархоменко, Віктор & Rusin, Mikhail & Son, Mikhail & O., Sploditel & Temchenko, Yelyzaveta & Filiuta, Kateryna & Khodosovtsev, Alexander (Oleksandr) & Shevchenko, Ivan. (2025). Знищення Каховського водосховища: наслідки для довкілля.

23. Екологічні наслідки теракту на Каховській ГЕС перевищують прогнози експертів – Українська природоохоронна група. *Українська природоохоронна група*. – URL: <https://uncg.org.ua/ekolohichni-naslidky-teraktu-na-kakhovskij> (дата звернення 12.08.2025).

24. Науковці Академії спрогнозували характер затоплення територій Київщини, спричиненого російським вторгненням. *Сторінки – Домашня сторінка*. – URL: <https://old.nas.gov.ua/UA/Messages/news> (дата звернення 12.08.2025).

25. F. Liu et al. Physically based simulation of dam breach development for Tangjiashan Quake Dam, China / *Environmental Earth Sciences*. Vol. 65. P. 1081-1094. URL: <https://link.springer.com/article>.

26. K. Chinnarasri, T. Chaiyuth, et al. "Flow patterns and damage of dike overtopping." *International Journal of Sediment Research* 18.4 (2003): 301-309. URL: <https://www.researchgate.net/profile/Sutat-Weesakul> (дата звернення 11.08.2025).
27. Chow, Ven Te. "Open-channel hydraulics, classical textbook reissue." (1988).
28. D. Fread. L.Danny. The NWS dam-break flood forecasting model. Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA, 1980.
29. D. Fread, L.Danny BREACH, an erosion model for earthen dam failures. Vol. 855. MD, United States: Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA, 1988.
30. D. Fread, L.Danny. BREACH, an erosion model for earthen dam failures. Vol. 855. MD, United States: Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA, 1988.
31. Sanina I. V., Lyuta N. G. Екологічні наслідки підриву греблі Каховської ГЕС і шляхи вдосконалення водопостачання населення. *Мінеральні ресурси України*. 2023. № 2. С. 50-55. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.50-55>
32. Лопушинський і. П., Проніна О. В. Підрив Каховської гес: наслідки для екологічної безпеки України. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 1(88). С. 372-377. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.52>
33. Про затвердження Методики обстеження і паспортизації гідротехнічних споруд систем гідравлічного вилучення та складування промислових відходів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0466-95#Text> (дата звернення 10.08.2025).
34. ЗОНА ЗАТОПЛЕННЯ. *ДБНУ – Державні будівельні норми України – норми: ДБН, ДСТУ, ГОСТ, СН, ВБН*. URL: [https://dbn.co.ua/blog/zona\\_zatoplennja/2016-11-11-1744](https://dbn.co.ua/blog/zona_zatoplennja/2016-11-11-1744) (дата звернення 10.08.2025).

35. ЗОНА КАТАСТРОФІЧНОГО ЗАТОПЛЕННЯ. ДБНУ – Державні будівельні норми України – норми: ДБН, ДСТУ, ГОСТ, СН, ВБН. URL: [https://dbn.co.ua/blog/zona\\_katastrofichnogo\\_zatoplennja](https://dbn.co.ua/blog/zona_katastrofichnogo_zatoplennja) (дата звернення 10.08.2025).

36. Jasiewicz J., Stepinski T. F. Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*. 2013. Vol. 182. P. 147-156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>

37. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні споруди. ДБНУ – Державні будівельні норми України – норми: ДБН, ДСТУ, СНиП, ГОСТ, СН, ВБН. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-802> (дата звернення 19.07.2025).

38. ДБН В.2.4-20:2014 Греблі з ґрунтових матеріалів. ДБНУ – Державні будівельні норми України - норми: ДБН, ДСТУ, СНиП, ГОСТ, СН, ВБН. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn> (дата звернення 19.07.2025).

39. ДСТУ Б А.2.4-17:2008 Система проектної документації для будівництва. Правила виконання робочих креслень гідротехнічних споруд. URL: <https://online.budstandart.com/ua/catalog> (дата звернення 20.07.2025).

40. Учасники проектів Вікімедіа. Гідровузол. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki> (дата звернення 20.07.2025).

41. У Польщі прорвало ще одну дамбу: уряд країни оголосив стан стихійного лиха. Новини України - останні новини України сьогодні – УНІАН. URL: <https://www.unian.ua/world/proriv-dambi> (дата звернення 11.08.2025).

42. Підрив дамби на Дніпрі. Як і навіщо це зробили за наказом Кремля в 1941 році – BBC News Україна. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-65823210> (дата звернення 15.07.2025).

43. Борисенко К., Хатчінсон С.М., Сінчук Д. Прояви та наслідки водних конфліктів: на прикладі Печенізького водосховища, Харківська область Україна // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія». 2024. № 60. С. 173-187. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-12>

44. Водогосподарський паспорт Трав'янського водосховища, 1976 р.

45. У Липцях лишуються жити чотири людини: який вигляд має село після російських авіаударів. Суспільне Харків. URL: <https://suspilne.media/kharkiv/935791-u-lipcah-lisautsa-ziti-cotiri-ludini-akij-vigliad-mae-selo-pisla-rosijskih-aviaudariv-fotoreportaz/> (дата звернення 11.07.2025).

46. «Людей немає»: який вигляд має село Липці сьогодні. Гвара Медіа. URL: <https://gwaramedia.com/liudey-nemaie-iakyu-vyhliad-maie-selo-lyptsi-sohodni/> (дата звернення 15.07.2025).

47. Статистична інформація. Головне управління статистики у Харківській області. URL: <https://kh.ukrstat.gov.ua/stat-informatsiya> (дата звернення 15.07.2025).

48. Geoportal.de. URL: [https://www.geoportal.de/Info/tk\\_04-hochwasser-gefahrenkarten-he](https://www.geoportal.de/Info/tk_04-hochwasser-gefahrenkarten-he). (дата звернення 15.08.2025).

49. Трав'янське водосховище повільно витекло: що відомо. Останні новини Харкова і України – Громада Харків. URL: <https://gromada.group/news/all/travyanske-vodoshovishe-povilno-viteklo-sho-vidomo>

50. За матеріалами, наданими Регіональним офісом водних ресурсів у Харківській області.

51. Copernicus Browser. URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/> (дата звернення 21.10.2025).

52. Coleman, Neil M.; Kaktins, Uldis; Wojno, Stephanie (2016). "Dam-Breach hydrology of the Johnstown flood of 1889—challenging the findings of the 1891 investigation report". *Heliyon*. 2 (6). DOI: 10.1016/j.heliyon.2016.e00120

53. Scott, RF (1987). "Baldwin Hills reservoir failure in review". *Engineering Geology*. 24 (1-4): 103-25. DOI: 10.1016/0013-7952(87)90054-8

54. Efas-IS. *Home. Copernicus EMS - European Flood Awareness System*. URL: <https://european-flood.emergency.copernicus.eu>

55. Accueil – Particulier. Géorisques. URL: <https://www.georisques.gouv.fr/> (дата звернення 14.07.2025).

56. Risque d'inondation sur PARIS. *Géorisques*. URL: <https://www.georisques.gouv.fr/mes-risques/> (дата звернення 15.07.2025).
57. Каталог річок України : підручник / ред. В. Мокляк ; уклад.: Н. Дрозд, С. Левченко ; упоряд. Г. Швець. Київ : Вид-во АН УРСР, 1957. – 198 с.
58. У Харківській області через війну знищено три водосховища. URL: <https://stroyobzor.ua/ua/kharkov/news-city/u-kharkivskiy-oblasti-cherez-viynu-znischeno-tri-vodoskhovischa> (дата звернення 15.07.2025).
59. DeepStateMAP. Map of the war in Ukraine. DeepStateMap. URL: <https://deepstatemap.live/en#10/50.1324636/38.4590149> (дата звернення 20.07.2025).
60. Hirano, Muneo. "River-bed degradation with armoring." Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers. Vol. 1971. No. 195. Japan Society of Civil Engineers, 1971

**ДОДАТОК А****ДОВІДКА**

Про впровадження результатів кваліфікаційної  
роботи магістра

**Сінчук Діани Олександрівни**

**«Географічний аналіз наслідків аварій на гідротехнічних спорудах на основі геоінформаційних технологій (на прикладі Трав'янського водосховища)»**  
зі спеціальності 106. Географія

Протягом травня-листопада 2025 року основні положення кваліфікаційної роботи магістра Сінчук Діани Олександрівни: «Географічний аналіз наслідків аварій на гідротехнічних спорудах на основі геоінформаційних технологій (на прикладі Трав'янського водосховища)» апробувалися в Регіональному офісі водних ресурсів у Харківській області.

Карти ймовірного затоплення територій, зокрема Трав'янського водосховища, укладені Д.О. Сінчук, були передані для подальшого використання до структурних підрозділів Харківської обласної військової адміністрації, а саме Департаменту захисту довкілля та природокористування та Департаменту цивільного захисту. Розроблені матеріали можуть використовуватися для оцінювання потенційних ризиків затоплення у разі часткового або повного руйнування гідротехнічних споруд, планування заходів із мінімізації наслідків можливих надзвичайних ситуацій та підтримки прийняття управлінських рішень щодо екологічної безпеки та цивільного захисту.

Довідка видана для подання за місцем захисту кваліфікаційної роботи.

Начальник Регіонального  
офісу водних ресурсів  
у Харківській області



Тетяна БОЖКО