

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально - науковий інститут екології
Кафедра екологічної безпеки та екологічної освіти

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ РУЙНУВАННЯ ГРЕБЛІ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Виконав: студент 2 курсу, групи ДЕ-64

спеціальності : 101 «Екологія»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Пі автора _____ / Леонід ЧОРНОГОР
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / проф. Алла НЕКОС
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / проф. Олег ЛАЗОРЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / проф. Алла НЕКОС
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / Марина ЩОКІНА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / Світлана БУРЧЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

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

Навчально-науковий інститут екології
Кафедра екологічної безпеки та екологічної освіти
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Спеціальність 101 Екологія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ / проф. Алла НЕКОС
підпис ім'я та прізвище
“05” травня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Чорногору Леоніду Леонідовичу
(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема роботи Екологічні наслідки руйнування греблі Каховського водосховища

керівник роботи _____ Алла НЕКОС, д-р географ. наук, проф. _____,
(ім'я, прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «12» листопада 2024 року №4301-5/3647

2. Строк подання студентом роботи _____ 27. 11. 2024 р.

3. Перелік питань, які потрібно розробити

1. Огляд літературних джерел щодо стану вивчення проблеми
2. Визначити методи досліджень.

3. Провести первинний аналіз параметрів водного потоку із зруйнованого водосховища та стану підтоплених територій,.
4. Проаналізувати екологічні наслідки на підтоплених територіях, провести обчислення.
5. Розробити рекомендації щодо усунення та оптимізації наслідків екологічної катастрофи на Каховському водосховищі.
6. Сформулювати висновки до кваліфікаційної роботи.
7. Оформити список літературних джерел.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Аналітичний огляд екологічних наслідків руйнування греблі Каховського водосховища
2	Обґрунтування використання засобів та методів дослідження
3	Моделювання потоку води з Каховського водосховища та екологічні наслідки підтоплення територій
4	Рекомендації щодо усунення та оптимізації наслідків екологічної катастрофи на Каховському водосховищі
5	Формулювання висновків
6	Підготовка списку використаних джерел

5. Дата видачі завдання 10.06.2024 р.

Студент

підпис

Леонід ЧОРНОГОР

ім'я і прізвище

Керівник роботи

підпис

зав. кафедри, проф. Алла НЕКОС

посада, ім'я і прізвище

АНОТАЦІЯ

**ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ РУЙНУВАННЯ ГРЕБЛІ
КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА**

Леонід ЧОРНОГОР

Кваліфікаційна робота «Екологічні наслідки руйнування греблі Каховського водосховища» містить 48 сторінки, 4 розділи, 3 таблиці, 21 формула, 13 рисунків, 12 використаних джерел.

Мета роботи. Визначення екологічних наслідків шляхом числового моделювання параметрів нерегульованого скиду надпотужного водного потоку, що стався внаслідок руйнування греблі Каховського водосховища.

Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю фізико-математичного моделювання для кількісної оцінки екологічних наслідків катастрофічного руйнування греблі Каховського водосховища 06 червня 2023 р.

Завдання. Кількісна оцінка екологічних наслідків катастрофічного руйнування греблі Каховського водосховища шляхом фізико-математичного моделювання та детальних обчислень.

Методи. Для досягнення мети використовувалися багатофакторний аналіз, математичне моделювання, аналітичні розв'язки рівнянь та числові розрахунки.

Результати. Для оцінки екологічних наслідків затоплених територій розроблено математичні моделі водного потоку з Каховського водосховища. Обчислено часові залежності параметрів водного потоку з водосховища. Встановлено, що екологічні наслідки найбільшої техногенної катастрофи за десятиліття були дуже значними. Певні наслідки будуть спостерігатися ~10 років і більше. Доведено, що екосистемам нанесено непоправну шкоду.

КАХОВСЬКЕ ВОДОСХОВИЩЕ, РУЙНУВАННЯ ГРЕБЛІ,
МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, ВОДНИЙ ПОТІК, ВИТРАТА ВОДИ, ШВИДКІСТЬ
ВИТІКАННЯ, ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ

ABSTRACT

**ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF THE DESTRUCTION OF THE
KAKHOVKA RESERVOIR DAM**

Leonid CHORNOHOR

Qualification work “Environmental consequences of the destruction of the Kakhovka reservoir dam” contains 48 pages, 4 sections, 3 tables, 21 formula, 13 figures, 12 references.

The purpose. Determination of environmental consequences by numerical modeling of the parameters of unregulated discharge of a high-powered water flow that occurred as a result of the destruction of the Kakhovka Reservoir dam.

The relevance of the research topic is due to the need for physical and mathematical modeling to quantify the environmental consequences of the catastrophic destruction of the Kakhovka Reservoir dam on June 06, 2023.

Objectives. Quantitative assessment of the environmental consequences of the catastrophic destruction of the Kakhovka Reservoir dam by means of physical and mathematical modeling and detailed calculations

Methods. To achieve the goal, we used multivariate analysis, mathematical modeling, analytical solutions of equations and numerical calculations.

Results. Mathematical models of water flow from the Kakhovka Reservoir were developed to assess the environmental consequences of flooded areas. The time dependencies of the parameters of the water flow from the reservoir were calculated. It was found that the environmental consequences of the largest man-made disaster in a decade were very significant. Certain consequences will be observed for ~10 years or more. It has been proven that ecosystems have suffered irreparable damage.

KAKHOVKA RESERVOIR, DAM DESTRUCTION, MATHEMATICAL MODELS, WATER FLOW, WATER CONSUMPTION, OUTFLOW RATE, ENERGY CHARACTERISTICS, ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES, ECOCIDE

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВИВЧЕННЯ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЩОДО РУЙНУВАННЯ ГРЕБЛІ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА.....	9
1.1. Сучасний стан вивчення питання про наслідки екологічної катастрофи.....	9
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАСЛІДКІВ ЕКОЛОГІЧНОЇ КАТАСТРОФИ.....	17
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКУ ВОДИ З КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ТА ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ КАТАСТРОФИ...	21
3.1. Обчислення головних параметрів води у водосховищі та водного потoku.....	21
3.2. Особливості моделювання потоку води з Каховського водосховища та екологічні наслідки підтоплення територій.....	24
3.3. Аналіз результатів моделювання потоку води з Каховського водосховища.....	35
3.4. Класифікація екологічних наслідків, що сталися після руйнування Каховського водосховища.....	36
РОЗДІЛ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО УСУНЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ЗАХОДІВ З ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ ЕКОЛОГІЧНОЇ КАТАСТРОФИ НА КАХОВСЬКОМУ ВОДОСХОВИЩІ.....	40
4.1. Основні шляхи оптимізації ліквідації наслідків на території підтоплення.....	40
4.2. Конструктивні підходи та превентивні заходи щодо відновлення території, що потерпає від наслідків екологічної катастрофи.....	42
ВИСНОВКИ.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	47

ВСТУП

Каховську гідроелектростанцію (ГЕС) побудовано в 1956 р. у руслі Дніпра. Її електрична потужність складала 335 МВт. Роботу ГЕС забезпечувало водосховище, що простягалося від Запорізької до Херсонської областей. Крім енергетичної функції, водосховище мало велике господарське значення. Воно вміщувало 40% прісної води України. Водосховище використовувалося для зрошування посушливих земель, водопостачання Кривого Рогу, Марганця та інших населених пунктів, охолодження устаткування Запорізької АЕС, рибного господарства, водного транспорту тощо.

06 червня 2023 р. внаслідок воєнної агресії на сході України відбулося руйнування греблі Каховського водосховища, чому передували два потужні вибухи о 02:35 і 02:54 за київським часом. Ці вибухи фіксувалися технічними засобами Головного центру спеціального контролю Державного космічного агентства України (ДКАУ) [1]. За нашими оцінками, енерговиділення другого, більш потужного, вибуху складало 0.5–15 т стандартної вибухівки (ТНТ – тринітротолуолу).

Вибухи призвели до миттєвого руйнування греблі, стрімкого водного потоку, затопленню значних територій, які знаходилися за течєю Дніпра нижче водосховища та жахливої екологічної катастрофи [2–9]. Окремі результати коротко описані в роботах Глейка П. та ін. [3], Вишневського В. та ін. [4], Дороша Й. М. та ін. [5], Саніної І. В. та Лютої Н. Г. [6], Новицького Д. [7], Лінник П. і Зубенко І. [8] та у роботі [9].

Для того, щоб можливо було у повній мірі оцінити екологічні наслідки катастрофи, необхідно кількісно змодельовати ситуацію, надати їй математичне обґрунтування і опис. Такого плану наукові дослідження не виконувались і відповідно дотепер відсутні моделі параметрів неврегульованого надпотужного водного потоку з величезного водосховища. На сьогодні ця катастрофа вважається найбільшою в Європі за останні часи. Результати моделювання закликані не тільки

пояснити жахливі наслідки катастрофи, а й оцінити можливі наслідки інших катастрофічних руйнувань гребель на великих ріках.

Мета роботи – визначення екологічних наслідків шляхом числового моделювання параметрів нерегульованого скиду надпотужного водного потоку, що стався внаслідок руйнування греблі Каховського водосховища.

Об'єкт дослідження – екологічні наслідки катастрофи, обумовленої руйнуванням Каховського водосховища.

Предмет дослідження – моделювання параметрів водного потоку, викликаного руйнуванням греблі Каховського водосховища.

Методи дослідження: огляд наукових публікацій, багатофакторний аналіз, математичне моделювання, аналітичні розв'язки рівнянь та числові розрахунки потоку води із зруйнованого Каховського водосховища й класифікація екологічних наслідків.

Робота написана за матеріалами аналізу наукової та науково-популярної літератури, довідкових видань, фондів матеріалів організацій і установ, даних гідрологічних станцій і постів, відкритих матеріалів і інтернет-ресурсів щодо наслідків екологічної катастрофи та особистих досліджень і розрахунків автора [10–12].

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВИВЧЕННЯ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЩОДО РУЙНУВАННЯ ГРЕБЛІ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

1.1. Сучасний стан вивчення питання про наслідки екологічної катастрофи

На сьогодні існує декілька наукових робіт, які пов'язані з руйнуванням греблі Каховського водосховища: Хільчевського В. та ін. [2], Глейка П. та ін. [3], Вишневського В. та ін. [4], Дороша Й. М. та ін. [5] та Саніної І. В. та Лютої Н. Г. [6], Новицького Д. [7], Лінник П. і Зубенко І. [8] та робота [9].

У роботі авторів Хільчевського В. та ін. [2] описані головні великі та малі водойми, що знаходилися на території України. Всього 1054 водосховища до найбільших з них відносяться водойми, що мають об'єм води більше 50 км³. Дуже великі водойми мають об'єм 10–50 км³. Великим водоймам властиві об'єми 1–10 км³.

На головній річці України Дніпрі є цілий каскад водойм: Київське, Канівське, Кременчуцьке, Кам'янське, Дніпровське та Каховське водосховища. Каховське водосховище є одним з найбільших: об'єм води сягає 18.2 км³, площа води складає 2155 км², середня глибина – 8.4 м, концентрація мінералів – 332 мг/дм³.

У роботі Саніної І. В. та Лютої Н. Г. [8] обговорюються питання водно-екологічної катастрофи, яка була обумовлена руйнуванням Каховського водосховища, затопленням великих земельних територій, загибеллю людей та тварин, втратою унікальних екосистем, забрудненням довкілля та значними економічними збитками. Обґрунтовано, що Херсонщина зазнала найбільших ресурсних, економічних, соціальних та екологічних втрат від руйнування Каховського водосховища. Цими ж авторами описано забезпеченість Херсонської області ресурсами та запасами води питної якості. Рекомендується для водопостачання використовувати підземні джерела. Перераховано заходи для

забезпечення області та міста Херсона водою із підземних джерел.

Роботу Лінника П. М. та Зубенка І. Б. [8] присвячено вивченню донних відкладів і наявності важких металів у великих резервуарах води. Ця стаття написана ще у 2002 р., тобто задовго до катастрофи на Каховському водосховищі. Проте результати досліджень, викладені в статті, є важливими для оцінки екологічних наслідків руйнування та осушення Каховського водосховища. Автори підкреслюють, що всі Дніпровські водосховища забрудненні такими важкими металами такими, як Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cr, Ca.

Вишневський В. та ін. [4] описують руйнування Каховської греблі та наслідки цього руйнування. В своїх дослідженнях вони використовували дані метеорологічних спостережень дистанційного зондування, вимірювання рівня води, результати аналізів проб води, відібраних у північно-західній частині Чорного моря та наземні спостереження. Спочатку автори наводять короткі відомості про річку Дніпро та Каховське водосховище, описують особливості використання Каховського водосховища. Далі вони розглядають наслідки, що сталися після вибуху на греблі водосховища. Підкреслюється, що у день вибуху Каховська гребля була під контролем російських збройних сил. Вибух мав місце 6 червня 2023 р. в інтервалі часу 02:30–03:00. Великий об'єм води обрушився на околиці. Якщо о 04:00 6 червня 2023 р. рівень води біля Херсона складав 0,31 м, то через 4 години, о 08:00 6 червня 2023 р. він досяг рівня 5,29 м. Пікові значення в 5,68 м спостерігалося о 03:00 8 червня 2023 р. Катастрофа призвела до затоплення не тільки околиць Дніпра, але й її правого притоку річки Інгулець. Найбільшої шкоди потік наніс м. Нова Каховка та селу Козацьке. Тут рівень води сягав 12 м.

За даними авторів Вишневського В. та інш. найвищий рівень води в морському порту Одеси спостерігався 10 червня 2023 р. і сягав 5–10 см [4]. Автори також описують забруднення води, як у Дніпро-Бузькому лимані так і в північно-західній частині Чорного моря. 17 червня 2023 р виявлено хімічні та біологічні домішки та забруднення від промислових об'єктів та АЗС (автозаправних станцій). Всього було забруднено площі у 7300 км². Солоність морської води у північно-

західній частині Чорного моря зменшилася 13–14 червня 2023 р. з 11 г/л до 4,2–4,4 г/л. Суттєво збільшилися концентрації Cu (мідь), Zn (цинк), As (арсеній) та інших хімічних речовин. У роботі наведено зміни рівня води на Каховському водосховищі. 20 червня 2023 р. рівень води стабілізувався на позначці 4,5 м. Наприкінці червня 2023 р. Каховське водосховище припинило своє існування [7].

Далі автори Вишневський В. та ін. обговорюють більш тривалі наслідки. Вони пов'язані з осушенням водосховища та загибеллю відповідної флори та фауни, що спостерігалась за високих температур літа 2023 р. Певна увага приділена економічним наслідкам. Окремо обговорюються наслідки для Чорного моря, а саме, забруднення нафтопродуктами та іншими токсичними речовинами, які можуть потрапити до живих організмів та вплинути через трофічні ланцюги на здоров'я людей. На завершення обговорюються перспективи стосовно долі Каховського водосховища [4].

Робота Глейка П. та ін. [3] обґрунтовує, що річки та водні системи є зброєю під час російсько-української війни. Автори оглянули українські річки та водні системи. Головна увага приділяється річці Дніпро. Дніпро – одна з найбільших річок у Європі. Вона протікає територіями Росії, Білорусії та України. Дніпро забезпечує водою міста, промисловість та сільське господарство у значному регіоні. Загальна довжина річки біля 2200 км, а площа водного дзеркала складає 504000 км². Середні витрати води складають 1690 м³/с, або 53 км³ за рік.

Каховська гребля побудована в 1956 р. Приблизно в 60 км вище Дніпром від Херсона. Таким чином було створено найбільший резервуар води на Дніпрі. В середньому рівень води сягав 16 м. Каховське водосховище забезпечувало водою значну частину півдня України. У 1980 р. було побудовано Запорізьку АС, яка є однією з найбільших у Європі. Каховське водосховище забезпечило водою також Запорізьку АС та місто Енергодар. Загальна довжина Каховської греблі складала 3,8 км [2]. Після пошкодження Каховської греблі потужний потік води став покривати околиці річки Дніпра. На рис. 1.1 представлені часові залежності рівня води поблизу Нікополя та Херсона.

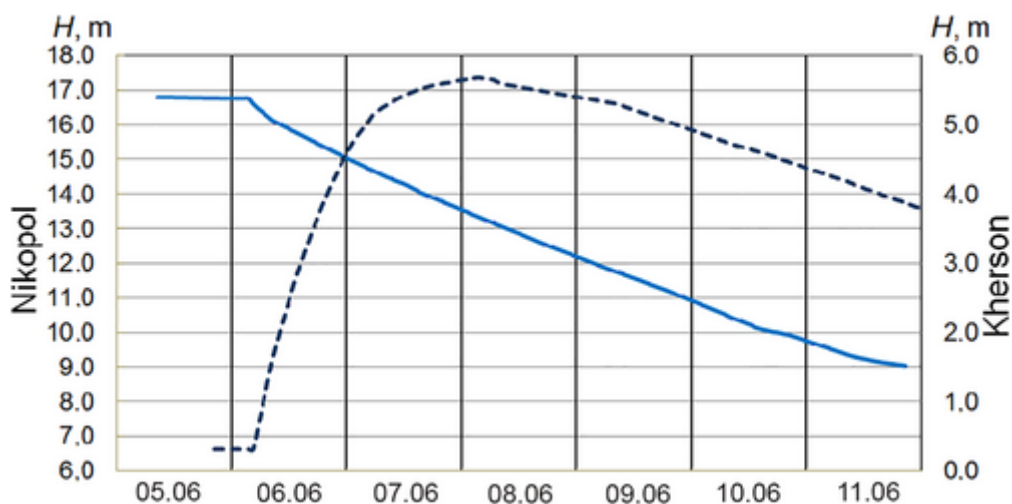


Рис. 1.1 Зміни рівнів води на Херсонському (пунктирна лінія) та Нікопольському гідрологічних постах (суцільна лінія) з 05 по 11 червня 2023 року, у метрах над середнім рівнем моря [3]

Рис. 1.1 демонструє, що рівень води поблизу Нікополя після вибуху зменшився з 18,8 м до 9 приблизно за 6 діб. Поблизу м. Херсон, навпаки, приблизно за 2 доби рівень води збільшився від 0,3 м до 5,6 м. Ці ж автори відмічають, що на 18 червня 2023 р. загинуло близько 50 людей. Рис. 1.2 та 1.3 ілюструють стан Каховського водосховища 3, 9, 20 червня та 5 липня 2023 р.

У роботі Дороша Й. М. та ін. [5] описується результати застосування геоінформаційних технологій з метою визначення площ підтоплених земель у наслідок руйнування Каховської греблі. Розроблено методологію визначення площ підтоплених земель внаслідок підриву Каховського водосховища. Автори проаналізували супутникові знімки станом на 9 червня 2023 р. та встановили, що загальна площа підтоплення сягала 65 тис. га або 650 км².

Авторами створена також база даних пошкоджених земель, встановлено, що кількість земельних ділянок складала більше 30 тис. Визначені частки площі підтоплених земельних ділянок складала: державної власності близько 57%, комунальної власності близько 22% та приватної більше 20%.

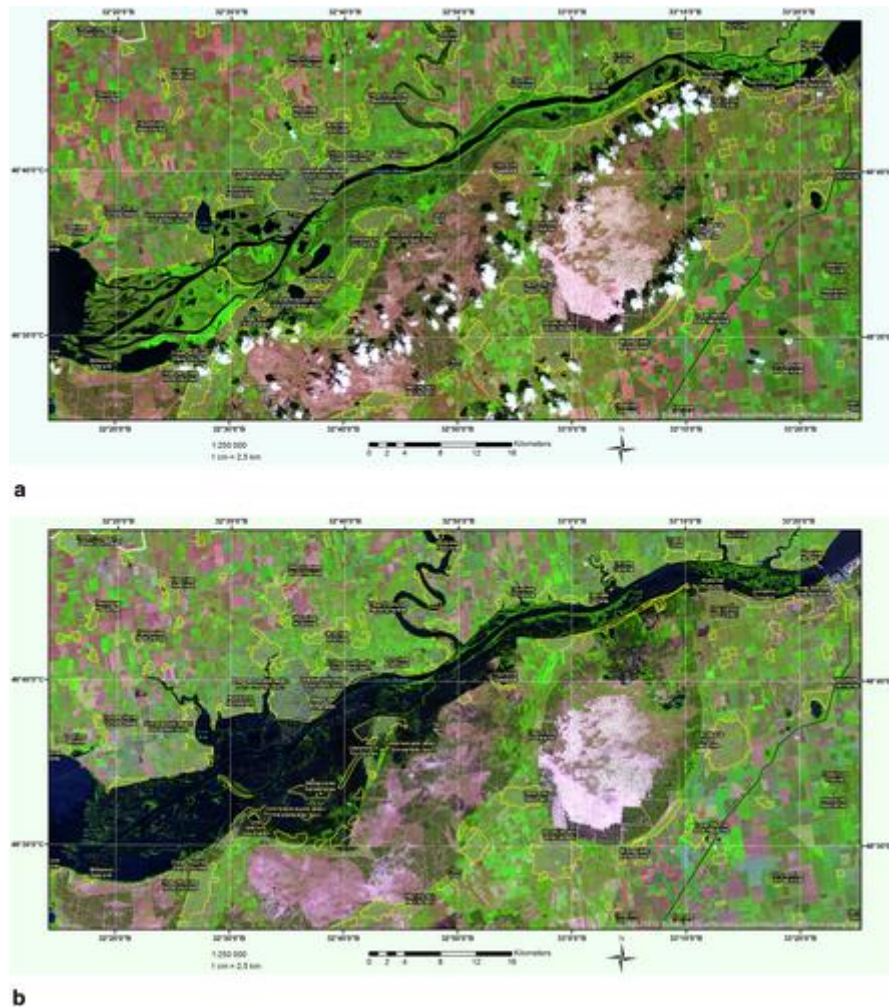


Рис. 1.2 Заплава під Каховською греблею в нижній течії Дніпра (а) 3 червня 2023 року (знімок із супутника Sentinel 2) та (б) після руйнування греблі, 9 червня 2023 року, що свідчить про значне затоплення (знімок із супутника Landsat 9) [3]

Важливими є дослідження, що викладені у статті Новицького Д. [7]. В ній описано чотири категорії безпрецедентних наслідків руйнування Каховського водосховища не тільки для південної частини України, але й для всієї країни. Рисунки 1.2 та 1.3 чітко простежуються наслідки екологічної катастрофи. Автор аналізує чотири категорії наслідків. До них належать: *гуманітарні, соціальні, економічні та екологічні наслідки* [7]. Гуманітарні наслідки пов'язані зі знищенням централізованого водопостачання та водовідведення в цілій низці населених пунктів Херсонської, Запорізької та Дніпропетровської областей.

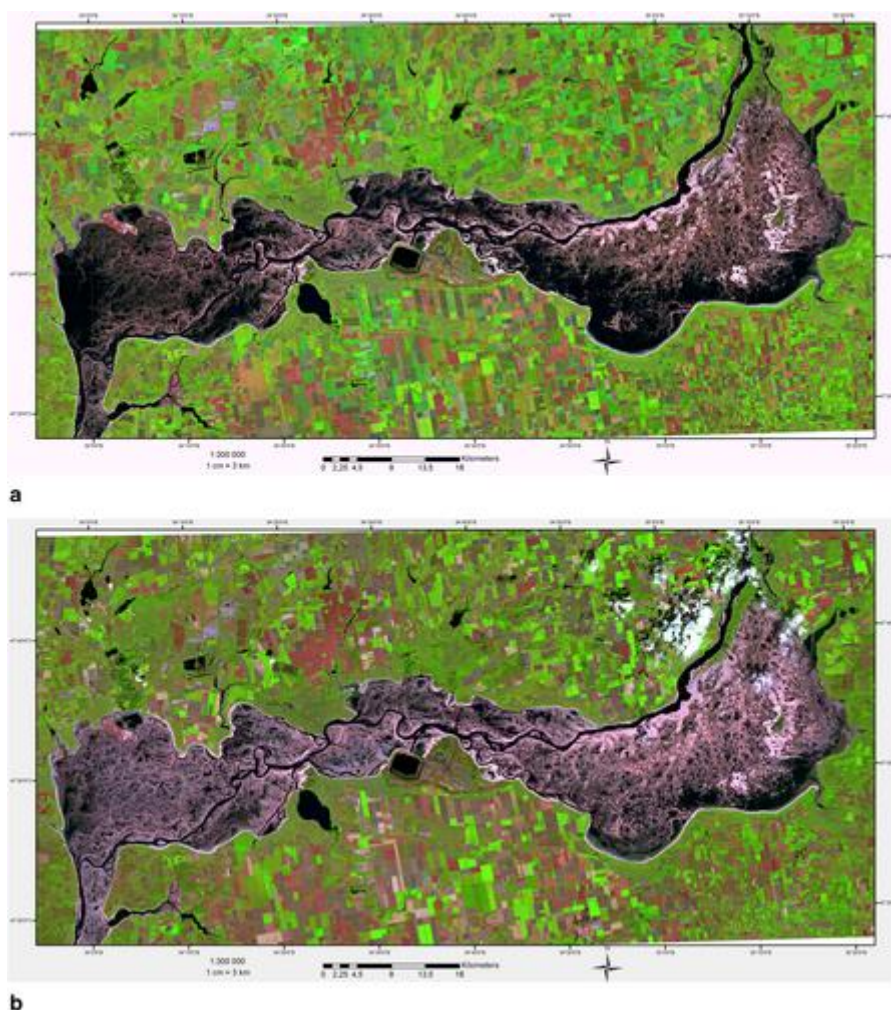


Рис. 1.3 Каховське водосховище (а) 20 червня 2023 року та (б) 05 липня 2023 року, де показано спуск води з водосховища. Знімки з супутника Sentinel 2. [3]

При цьому, більше 80 тис. громадян України втратили доступ до централізованого водопостачання та водовідведення. Виникла реальна загроза здоров'ю людей та їхньому життю.

Що стосується економічних наслідків, то їх ще потрібно дослідити та обчислити. Треба мати на увазі, що великі промислові центри вимагають значних об'ємів води і без них працювати просто не можуть. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України вважає, що економічні збитки перевищили 55 млрд. грн. Нестача води може призвести до соціального напруження та навіть до змін у демографічній картині великих регіонів півдня України.

Екологічні наслідки Новицький Д. назвав "екологічною катастрофою, трагедією в світового масштабу". На його думку зона впливу займає не менше 5000

км². Такі площі були затоплені, або, навпаки, осушені. До екологічних наслідків автор відніс критичну ситуацію у національних парках півдня України. Під загрозою зникнення виявилось 30% природно-заповідного фонду Херсонської області.

До екологічних наслідків також віднесено зменшення солоності Чорного моря поблизу м. Одеса, при визначенні показників після катастрофи нижче норми практично в три рази. Зменшення солоності, безумовно, вплине на морську екосистему, призведе до масової загибелі окремих видів флори та фауни у Чорному морі. На Херсонщині екологічні наслідки пов'язані з затопленням систем водопостачання, каналізаційних систем, насосних станцій та свердловин для добування питної води.

Суттєво постраждав рівень підземних вод. На Миколаївщині екологічна ситуація в цілому схожа на екологічну ситуацію в Херсонській області.

Дуже значні екологічні наслідки для Дніпропетровщини. Там зникла вода в джерелах, виник дефіцит води для населення, промисловості, підприємств у цілому. Від дефіциту води на Дніпропетровщині найбільш постраждали населені пункти Марганець, Нікополь, Покров, Грушівка, Покровське.

Припинили своє існування Каховський магістральний канал та Північно-Кримський канал. Вони були побудовані для водопостачання сільських населених пунктів Запорізької та Херсонської областей, а також АР Крим, зрошування сільськогосподарських угідь. Дуже загострилася ситуація з водопостачанням АР Крим. Прогнозується, що суттєво погіршиться екологічна ситуація на Кримському півострові. Його очікує посуха та інші жахливі наслідки.

Далі Новицький аналізує короткострокові та довгострокові технічні рішення, які б забезпечили водою постраждалі території. За даними міжнародних експертів для відновлення зруйнованої інфраструктури та усунення наслідків екологічної катастрофи потрібно не менше 2,2 млрд. доларів. Для мінімального відновлення інфраструктури потрібні не місяці, а роки. Новицький робить висновок, що підлив Каховської ГЕС – це жахлива трагедія з довготривалими наслідками [7].

У роботі [9] обговорюються чотири категорії наслідків Каховської катастрофи.

Таким чином, усі публікації, що пов'язані з катастрофою, викликану руйнуванням Каховської греблі, є описовими і мають аналітично-ситуативний характер. Нагальною задачею є кількісна оцінка параметрів процесів, що супроводжували цю катастрофу, та системний аналіз її екологічних наслідків.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАСЛІДКІВ ЕКОЛОГІЧНОЇ КАТАСТРОФИ

Під час досліджень було опрацьовано значну кількість наукових публікацій, зроблено аналіз відкритих опублікованих матеріалів за темою кваліфікаційної роботи. Для розв'язання поставленої задачі використовувалися системний підхід, багатофакторний аналіз основних фізичних процесів, їхнє одно-, дво- та тривимірне моделювання, аналітичний розв'язок рівнянь гідродинаміки, детальні числові розрахунки, аналіз екологічних наслідків руйнування Каховського водосховища. У якості вихідних використовувалися відомі дані про параметри ще існуючого незруйнованого Каховського водосховища, світлини і схеми зруйнованого Каховського водосховища, дані гідрологічних станцій про рівень води у водосховищі, дані про час настання катастрофічних явищ та площі підтоплень.

Системність підходу полягала у розгляді системи водосховище – зруйнована гребля – потік води – затоплені прилеглі території – рівень води у Дніпрі нижче за течією та у річці Інгулець – північно-західна частина Чорного моря. Аналіз екологічних наслідків також був всебічним, а значить, і системним.

Багатофакторність полягала в том, що треба було розв'язати задачу, коли одночасно змінюється багато взаємопов'язаних параметрів, таких як висота стовпа води, ширина та довжина водного дзеркала, швидкість потоку води, його потенціальна та кінетична енергії, витрати води, площа затоплень тощо. Саме ці параметри водного потоку призвели до великомасштабної катастрофи та жахливих екологічних наслідків.

Для кількісної оцінки неврегульованого потоку води із зруйнованого Каховського водосховища та відповідних екологічних наслідків необхідно розробити математичну модель водосховища, процесів витікання води, сформулювати постановку задачі у вигляді рівнянь, знайти їхні розв'язки та

провести необхідні обчислення.

При розробці математичної моделі водосховища та процесу витікання води було враховано, що товщина стовпа води (16 – 17 м) набагато менша за ширину водосховища (5 – 30 км), а ширина водосховища набагато менша за його довжину (230 км). Це означає, як буде показано у розділі 3, що при зменшенні висоти стовпа води вдвічі ширина водосховища зменшиться не більше ніж на 19%, а його довжина скоротиться не більше ніж на 7%. Такі обставини дозволяють розробити наступні наближені моделі водосховища та неврегульованого потоку води з нього.

1. Одномірна (1 D-) модель. Всі параметри потоку залежать лише від висоти стовпа води, а ширина та довжина у цьому наближенні залишаються незмінними. Така модель є найбільш простою, але й найменш точною. Похибка обчислень параметрів потоку при цьому знаходиться в межах 10 – 20%.

2. Двовимірна (2 D-) модель. Всі параметри потоку залежать від висоти стовпа води та ширини водного дзеркала, а його довжина залишається незмінною.

3. Тривимірна (3 D-) модель. Всі параметри потоку визначаються висотою стовпа води, шириною та довжиною водного дзеркала. Така модель є най більш складною та найбільш точною.

Для попередньої оцінки загроз та їхніх екологічних наслідків були розраховані наступні параметри водосховища та початкові параметри потоку:

- початкова потенціальна енергія води у водосховищі;
- початкова швидкість водного потоку;
- поперечна площа S_{10} водного потоку;
- початкова потужність водного потоку;
- початкові витрати води.

Для дослідження динаміки водного потоку із зруйнованого Каховського водосховища використовувалися відомі рівняння гідродинаміки, а саме рівняння для швидкості потоку $v(h)$, що має наступний вигляд:

$$v = \sqrt{gh};$$

поточна маса m або поточний об'єм води $V(h)$ у водосховищі

$$m = \int_V \rho dV = \rho \int_0^L dL \int_0^l dl \int_0^{h_0} dh$$

та витрати води $dm(h)/dt$ в результаті витікання:

$$\frac{dm}{dt} = -\rho S_1 v.$$

Профіль дна водосховища описувався залежністю

$$h = h_0 \left(\frac{l}{l_0} \right)^\alpha.$$

Обчисленню та аналізу підлягали наступні основні динамічні параметри водного потоку:

- швидкість потоку

$$v = v_0 H^{1/2},$$

- відносна маса води у водосховищі

$$\frac{m}{m_0} = H^{1+1/\alpha},$$

- витрати води у водосховищі

$$\frac{dm}{dt} = -\rho S_{10} v_0 H^{3/2},$$

- потенціальна енергія води у водосховищі

$$E_p = \frac{1}{2} mgh = E_{p0} H^{2+1/\alpha},$$

- потужність водного потоку

$$P_k = \frac{1}{2} \rho S_{10} v_0^3 H^{5/2} = P_{k0} H^{5/2},$$

- дефіцит води у водосховищі

$$\Delta m = m_0 - m = m_0 (1 - H^{1+1/\alpha}),$$

- залежність об'єму води від висоти стовпа води

$$V = V_0 H^{1+\gamma},$$

- потенціальна енергія маси води у водосховищі.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКУ ВОДИ З КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ТА
ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ КАТАСТРОФИ

3.1. Обчислення головних параметрів води водосховищі та водного потоку

Каховське водосховище найкрупніший штучний гідрологічний об'єкт у центральній частині України. Воно до руйнування виконувало багато господарських і рекреаційних функцій.

Згідно з проєктом до катастрофи, довжина Каховського водосховища становила $L \approx 230$ км, а ширина l змінювалася від ~ 5 до ~ 30 км [3]. Загальна площа водосховища $S_0 = 2155$ км². Початкова висота водного стовпа $h_0 \approx 16\text{--}17$ м. За початкового об'єму води $V_0 \approx 18.1$ км³ маса води складала $m_0 \approx 1.8 \cdot 10^{13}$ кг. Загальний вигляд Каховського водосховища до та після катастрофи показано на рис. 3.1.



Рис. 3.1 Каховське водосховище до (зверху) та після катастрофи [9]

Початкова потенціальна енергія води у водосховищі, що розраховувалася за формулою:

$$E_{p0} \approx \frac{1}{2} m_0 g h_0$$

сягала $E_{p0} \approx 1.4$ ПДж ≈ 337 кт ТНТ. Тут g – прискорення вільного падіння. Початкова швидкість водного потоку

$$v_0 \approx \sqrt{g h_0}$$

за $h_0 \approx 16.5$ м складала 12.7 м/с.

Після руйнування греблі, що мала довжину 447 м і максимальну висоту 29 м, у водосховищі, рівень води на початку зменшувався на $\Delta h \approx 0.15$ м щогодини. Це дозволяє за відомими значеннями $\Delta h / \Delta t$ та швидкості v_0 оцінити поперечну площу S_{10} водного потоку з наступного співвідношення:

$$\frac{dm}{dt} = \rho S_0 \frac{dh}{dt} = -\rho S_{10} v_0$$

або

$$\rho S_0 \frac{\Delta h}{\Delta t} \approx -\rho S_{10} v_0$$

Звідси за $\Delta h / \Delta t \approx -4.17 \cdot 10^{-5}$ м/с та $v_0 = 12.7$ м/с маємо $S_{10} = 7.1 \cdot 10^3$ м².

Головним показником для оцінки катастрофічних наслідків і впливу на екологічну ситуацію регіону треба вважати потужність водного потоку. Початкова потужність водного потоку була розрахована за формулою:

$$P_{k0} = \frac{1}{2} v_0^2 \left| \frac{dm}{dt} \right| \approx \frac{1}{2} v_0^2 \rho S_0 \left| \frac{\Delta h}{\Delta t} \right| \approx \frac{1}{2} \rho S_{10} v_0^3$$

Вона сягала приблизно 7.3 ГВт.

Для порівняння і оцінки сили та потужності визначеного потоку води можливо вказати, що така потужність відповідає потужності 7-8 енергоблоків типової АЕС.

Початкові витрати води можна оцінити так:

$$\left(\frac{dm}{dt} \right)_0 \approx \left(\frac{\Delta m}{\Delta t} \right)_0 = -\rho S_{10} v_0$$

Обчислення показали, що вони складали -90 кт/с, а об'ємні витрати води $\Delta V/\Delta t - 9 \cdot 10^4$ м³/с. В той же час відомі довідкові дані щодо середніх витрат води найбільших річок України такі: Дністер – $3.1 \cdot 10^2$ м³/с, Дніпро – $1.67 \cdot 10^3$ м³/с та Дунай – $6.43 \cdot 10^3$ м³/с.

Порівняння цих показників свідчить про те, що параметри водного потоку зі зруйнованого Каховського водосховища були практично катастрофічними та еколого-небезпечними для всього регіону, як суходолу, так і інших гідрографічних об'єктів, у тому числі Дніпро-Бузького лиману, Чорноморського узбережжя та самого Чорного моря (якості його води, чорноморської флори та фауни). Рівень води на затоплених територіях збільшувався до 09 червня 2023 р., у цей день досягнув максимуму, а потім поступово зменшувався. Ширина Дніпра місцями зросла до 10 км.

Наприклад, рівень води у Дніпрі у м. Херсон, що знаходиться на відстані приблизно 80 км від Каховської дамби, зріс на 5.37 м. Річка Інгулець вийшла з берегів.

3.2. Особливості моделювання потоку води з Каховського водосховища та екологічні наслідки підтоплення територій

Руйнування значної частини греблі призвело до неврегульованого потоку води із водосховища. Запаси води були настільки великими, що потенціальна енергія води, як буде показано далі, у 28 разів перевищувала енергію ядерної бомби, скинутої на м. Хіросіма. Потужність потоку води у декілька разів перевищувала потужність типової АЕС. Саме така екстремальна енергетика неврегульованого потоку води призвела до катастрофічних екологічних наслідків.

Вихідними рівняннями, що описують водяний потік із зруйнованого Каховського водосховища, є рівняння для швидкості потоку $v(h)$, поточної маси m або поточного об'єму води $V(h)$ у водосховищі та витрати води $dm(h)/dt$ в результаті витікання:

$$v = \sqrt{gh}, \quad (3.1)$$

$$m = \int_V \rho dV = \rho \int_0^L dL \int_0^l dl \int_0^{h_0} dh,$$

$$\frac{dm}{dt} = -\rho S_1 v, \quad (3.2)$$

де $L = L(h)$, $l = l(h)$, $m = m(h)$, $S_1 = S_1(h)$.

Якщо площа водного дзеркала $S(h) = S_0$, то можливо отримати одномірну модель (1D-модель):

$$V_0 = V_0 \frac{h}{h_0}, \quad m = m_0 \frac{h}{h_0},$$

де індекс «0» відноситься до початкового об'єму, початкової маси та висоти стовпа води, а без індексу – до поточних значень цих параметрів.

Насправді при витіканні води довжина L та ширина l водного дзеркала зі зменшенням висоти стовпа води h також зменшуються. Оскільки $L \gg l$, то можна спочатку вважати, що $L(h) \approx L_0$, а $l = l(h)$. Така модель є двовимірною (2D-моделлю). Отримаємо співвідношення для $l(h)$. Для цього розглянемо поперечний розріз водосховища (рис. 3.2).

Профіль дна можна описати залежністю, яка пов'язує поточні значення висоти стовпа води та ширини дзеркала води:

$$h = h_0 \left(\frac{l}{l_0} \right)^\alpha,$$

де $l_0 = l(h_0)$, α – показник пологості дна водосховища, що підлягає визначенню. При цьому

$$l = l_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^{1/\alpha} = l_0 H^{1/\alpha}, \quad (3.3)$$

$$H = \frac{h}{h_0}.$$

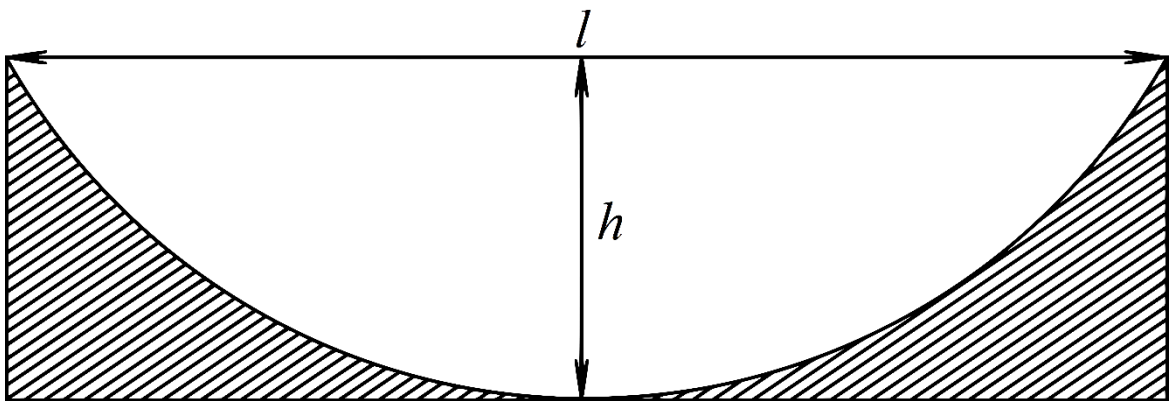


Рис. 3.2 Модель поперечного перерізу водосховища

Площа заштрихованої фігури, показаної на рис. 3.2, під кривою $h(l)$ дається співвідношенням

$$S_{l1} = 2 \int_0^h h dl = \frac{2}{\alpha} l_0 h_0 \int_0^H H^{1/\alpha} dH = \frac{2}{1+\alpha} l_0 h_0 H^{1+1/\alpha}.$$

Площа прямокутника шириною l і висотою h дорівнює $S_{l2} = lh$. Тоді площа перерізу водосховища розраховується за формулою:

$$S_l = S_{l2} - S_{l1} = \frac{\alpha-1}{\alpha+1} l_0 h_0 H^{1+1/\alpha}. \quad (3.4)$$

Звідси

$$S_{l0} = S_l(h_0) = \frac{\alpha-1}{\alpha+1} l_0 h_0, \quad (3.5)$$

а початковий об'єм води у водосховищі визначається за формулою

$$V_0 = S_l(h_0) L_0 = \frac{\alpha-1}{\alpha+1} L_0 l_0 h_0 = \frac{\alpha-1}{\alpha+1} S_0 h_0, \quad (3.6)$$

де $L_0 l_0 = S_0$. Із (3.6) отримуємо, що $\alpha \approx 3.21$.

Врахуємо, що у цьому наближенні з (3.4) та (3.5) випливає, що

$$\frac{V(h)}{V_0} = \frac{S_l(h)}{S_{l0}} = H^{1+1/\alpha}, \quad (3.7)$$

Із рівняння (3.2) з урахуванням того, що $S_l(h) = S_{l0} H$, (3.1) і (3.7) маємо:

$$\rho V_0 \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) H^{1/\alpha} \frac{dH}{dt} = -\rho S_{10} v_0 H^{3/2}, \quad H(0) = 1. \quad (3.8)$$

Розв'язок (3.8) дається наступним співвідношенням:

$$H = \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-2\alpha/(\alpha-2)}, \quad (3.9)$$

$$\tau = \frac{2V_0}{S_{10}v_0} \frac{\alpha+1}{\alpha-2},$$

тут τ – характерний час, який описує швидкість спустошення водосховища.

Для $\alpha \approx 3.21$ отримуємо $\tau \approx 1.4 \cdot 10^6 \text{ с} \approx 16 \text{ діб}$. При цьому із (3.9) маємо:

$$H = \left(1 + \frac{t}{16}\right)^{-5.3}.$$

У граничному випадку, коли $l(h) = l_0$, із (3.9) отримуємо для 1D-моделі:

$$H = \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-2}, \quad \tau = 4.6 \text{ доби}. \quad (3.10)$$

Знаючи залежність (3.9), можна обчислити наступні основні параметри водного потоку:

$$v = v_0 H^{1/2}, \quad (3.11)$$

$$\frac{m}{m_0} = H^{1+1/\alpha}, \quad (3.12)$$

$$\frac{dm}{dt} = -\rho S_{10} v_0 H^{3/2}, \quad (3.13)$$

$$E_p = \frac{1}{2} mgh = E_{p0} H^{2+1/\alpha}, \quad (3.14)$$

$$P_k = \frac{1}{2} \rho S_{10} v_0^3 H^{5/2} = P_{k0} H^{5/2}, \quad (3.15)$$

де E_p – потенціальна енергія води у водосховищі, P_k – потужність водного потоку. Дефіцит води у водосховищі можна визначити із рівняння

$$\Delta m = m_0 - m = m_0 (1 - H^{1+1/\alpha}). \quad (3.16)$$

Результати обчислень залежності основних параметрів водного потоку (відносний рівень води (H), рівень води (h), швидкість потоку води (v), відносна маса води у водосховищі (m/m_0), дефіцит води у водосховищі (Δm), витрати води (dm/dt), потужність потоку води (P_k) та потенціальна енергія маси води (E_p)) від часу, що відраховується від моменту руйнування Каховської греблі, наведено на рис. 3.3–3.10. Далі врахуємо наближено залежність довжини водосховища L від його глибини, тобто $L(h)$. Така модель є тривимірною (3D-моделлю). За аналогією виразу (3.3) будемо вважати, що

$$L = L_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^{1/\beta} = L_0 H^{1/\beta}. \quad (3.17)$$

За нашими оцінками показник, що характеризує пологість дна водосховища у повздовжньому напрямку $\beta \approx 10$. Тоді рівняння для відносної висоти стовпа води $H(t)$ з урахуванням швидкості витрат води (3.2), профіля дна у двох напрямках (3.3) та (3.17) має вигляд:

$$\rho V_0(1+\gamma)H^\gamma \frac{dH}{dt} = -\rho S_{10}v_0 H^{3/2}, \quad H(0) = 1. \quad (3.18)$$

Тут враховано, що залежність об'єму води від висоти стовпа води має вигляд:

$$V = V_0 H^{1+\gamma},$$

де безрозмірний показник, що описує профіль дна у двох напрямках

$$\gamma = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta}.$$

Розв'язок рівняння (3.18) дається наступним співвідношенням:

$$H = \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{1/(\gamma-0.5)}, \quad (3.19)$$

$$\tau = \frac{V_0}{S_{10}v_0} \frac{1+\gamma}{0.5-\gamma}. \quad (3.20)$$

Залежність висоти стовпа води у водосховищі від часу (3.19) є базовою. За її допомогою визначаються часові залежності всіх інших параметрів водного потоку. Часові варіації відносної висоти стовпа води в водосховищі $H(t)$ залежать від безрозмірного параметра γ , що характеризує профіль дна водосховища. Так, за $\gamma < 0.5$ маємо

$$H = \frac{1}{(1+t/\tau)^{1/(0.5-\gamma)}}.$$

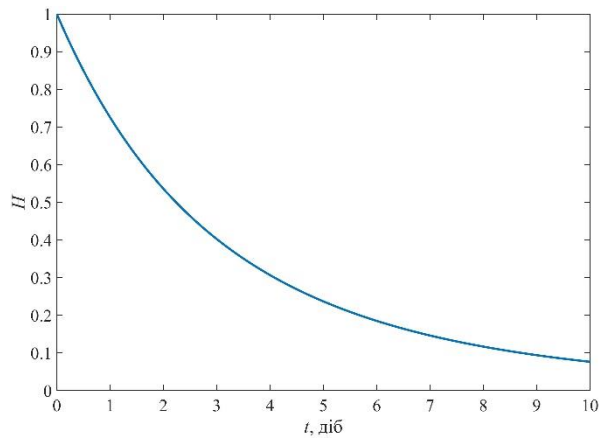


Рис. 3.3 Часова залежність
відносного рівня води у
Каховському водосховищі

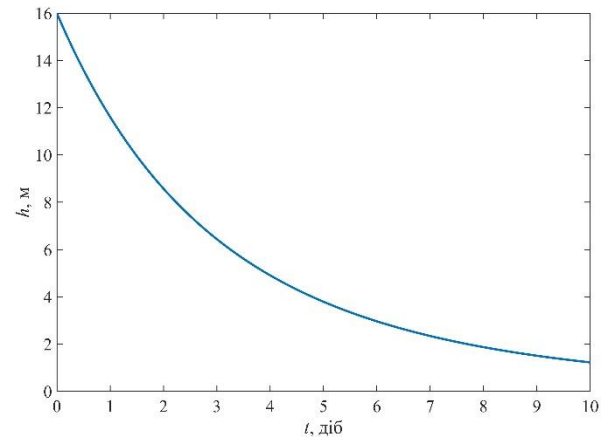


Рис. 3.4 Часова залежність рівня
води у Каховському водосховищі

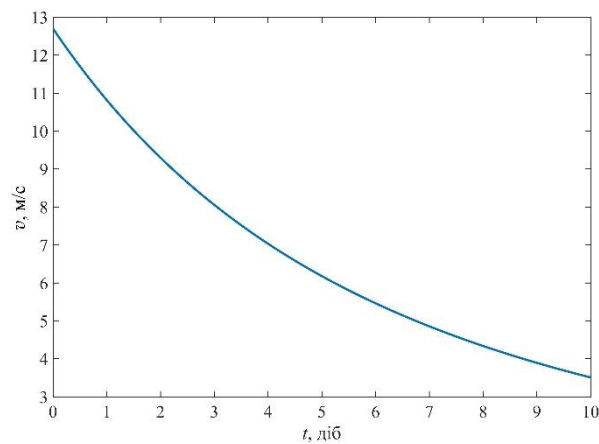


Рис. 3.5 Часова залежність
швидкості потоку води з
Каховського водосховища

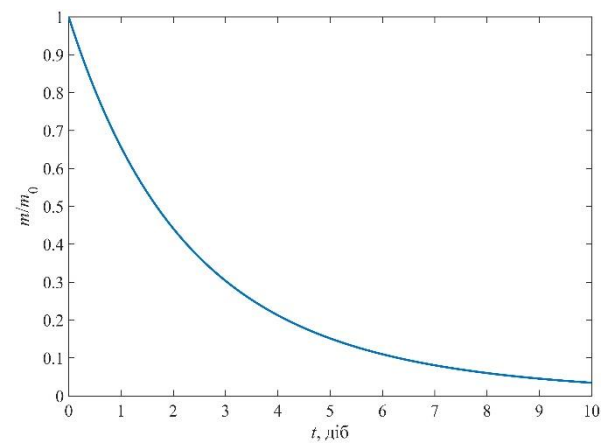


Рис. 3.6 Часова залежність відносної
маси води у Каховському
водосховищі

Зокрема, за $\alpha = 3.21$, $\beta = 10$ маємо $\gamma \approx 0.41$, характерний час $\tau \approx 3.15 \cdot 10^6 \text{ с} \approx 36 \text{ діб}$, що описує динаміку водного потоку, тобто час витікання води із водосховища. Якщо $\gamma > 0.5$, то

$$H = \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^{1/(\gamma-0.5)},$$

де

$$\tau = \frac{V_0}{S_{10} v_0} \frac{1 + \gamma}{\gamma - 0.5}.$$

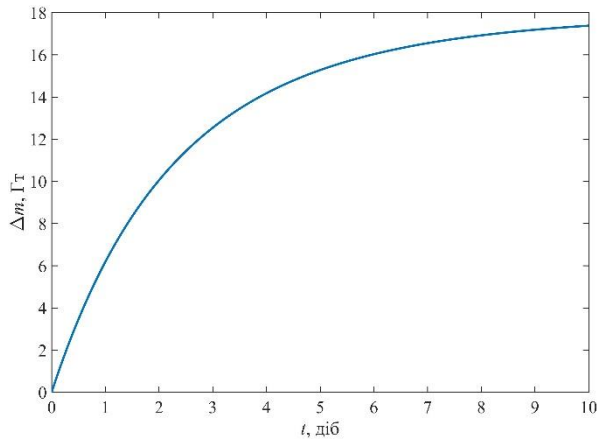


Рис. 3.7 Часова залежність дефіциту води у Каховському водосховищі

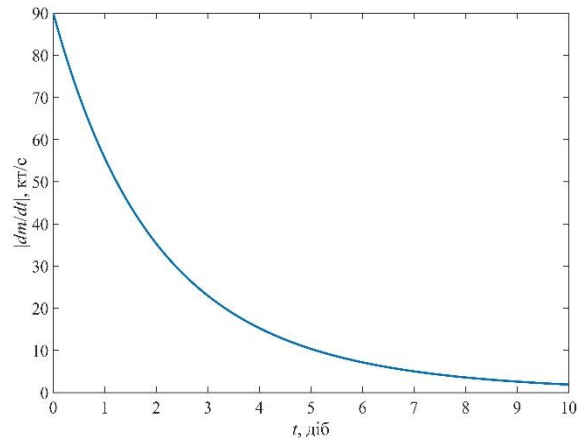


Рис. 3.8 Часова залежність модуля витрат води у Каховському водосховищі

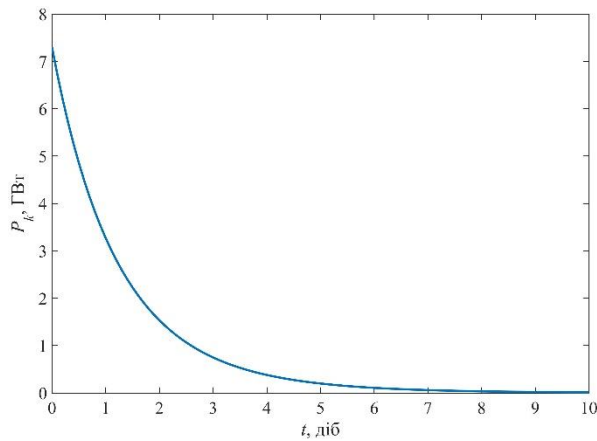


Рис. 3.9 Часова залежність потужності потоку води з Каховського водосховища

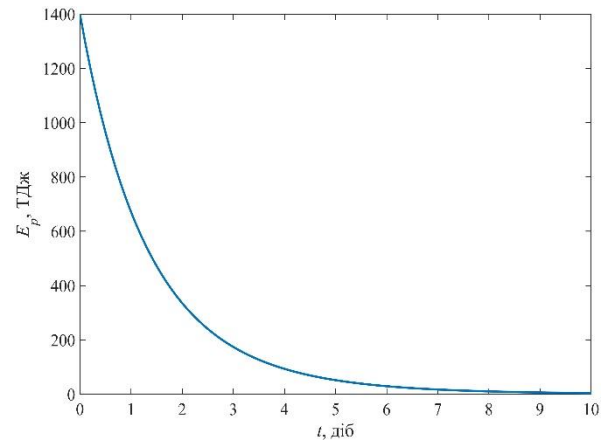


Рис. 3.10 Часова залежність потенціальної енергії маси води у Каховському водосховищі

Наприклад, для $\gamma = 0.6$ отримуємо практично такий же характерний час витікання води із водосховища $\tau \approx 36.8$ діб.

У випадку, коли $\gamma = 0.5$ часова залежність має найпростіший вигляд:

$$H(t) = e^{-2t/3\tau},$$

де

$$\tau = \frac{V_0}{S_{10}v_0} \approx 2 \cdot 10^5 \approx 2.3 \text{ доби.} \quad (3.21)$$

Із наведених оцінок характерного часу видно, що він суттєво залежить від профілю дна. Характерний час спустошення водосховища дається співвідношенням (3.21). Він визначається початковими значеннями об'єму водосховища, швидкості та поперечною площею водного потоку. Маючи співвідношення (3.19), характерний час τ та параметр γ , можна розрахувати основні параметри водного потоку (висоту стовпа води у водосховищі h , швидкість потоку v , відносну масу води у водосховищі m/m_0 , дефіцит води у водосховищі Δm , витрати маси води dm/dt , потужність водного потоку P_k та потенціальну енергію маси води E_p) за рівняннями (3.9), (3.11)–(3.16). Порівняємо значення $H = h/h_0$ для трьох (1D-, 2D- та 3D-) моделей параметрів водного потоку, що даються співвідношеннями (3.10), (3.9) і (3.19) (відповідно H_1 , H_2 та H_3) (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Часова залежність відносної висоти стовпа води у Каховському водосховищі для трьох моделей (1D-, 2D- та 3D-)

Кількість діб	Відносна висота стовпа води		
	H_1	H_2	H_3
1	0.67	0.73	0.74
2	0.49	0.53	0.55
3	0.39	0.40	0.42
4	0.29	0.31	0.31
5	0.23	0.24	0.24
6	0.19	0.18	0.18
7	0.16	0.15	0.14
8	0.13	0.12	0.11
9	0.11	0.09	0.09
10	0.10	0.08	0.07

Дані, наведені у табл. 3.1, демонструють важливий результат, що всі три моделі дають дуже близькі результати. Різниця не перевищує 20–30%. Це означає, що на практиці можна користуватися найбільш простою одномірною моделлю.

В табл. 3.2 наведено результати обчислень основних параметрів водного потоку для 3D-моделі (3.19) з використанням співвідношень для швидкості потоку води (3.11), витрат води (3.13), потужності потоку води (3.15) та відносної маси води у водосховищі

$$\frac{m}{m_0} = H^{1+\gamma} = \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-0.5}},$$

дефіциту води у водосховищі

$$\Delta m = m_0(1 - H^{1+\gamma}) = m_0\left[1 - \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-0.5}}\right]$$

та потенціальної енергії маси води у водосховищі

$$E_p = E_{p0}H^{\gamma+2} = E_{p0}\left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\frac{\gamma+2}{\gamma-0.5}}.$$

Дані табл. 3.2 показують, що за 10 діб висота стовпа води у водосховищі зменшилася від 16 до ~1 м, швидкість витікання води – від 12.7 до 3.4 м/с, маса води – від 18 до ~0.4 Гт, витрати води – від 90 до 1.7 кт/с, потужність потоку води – від 7.3 до 0.01 ГВт, а енергія E_p – від 1400 до ~2 ТДж. Таким чином, результати математичного моделювання та розрахунків показують, що приблизно за 18 діб, тобто 24 червня 2023 р., нерегульований потік води з водосховища припинився. За даними нашого моделювання до кінця червня 2023 р. Каховське водосховище припинило своє існування. Це повністю погоджується з результатами спостережень, описаними у роботі [3].

Основні параметри водного потоку від зруйнованого Каховського водосховища

Кількість діб	Основні параметри водного потоку						
	Висота h , м	Швидкість v , м/с	Відносна маса m/m_0	Дефіцит маси Δm , Гт	Витрати $ dm/dt $, кт/с	Потужність потоку P_k , ГВт	Потенціальна енергія E_p , ТДж
0	16	12.7	1	0	90	7.30	1400
1	11.8	10.9	0.65	6.3	57.3	3.44	678
2	8.8	9.4	0.43	10.3	36.7	1.64	331
3	6.7	8.2	0.29	12.8	24.5	0.84	173
4	5.0	7.1	0.19	14.6	15.5	0.39	83
5	3.7	6.2	0.13	15.7	10.6	0.21	45
6	2.9	5.4	0.09	16.4	6.9	0.10	22.5
7	2.2	4.8	0.06	16.9	4.7	0.055	12.3
8	1.8	4.2	0.04	17.3	3.3	0.03	6.9
9	1.4	3.8	0.03	17.5	2.4	0.02	4.2
10	1.1	3.4	0.02	17.6	1.7	0.01	2.3

Наступним етапом досліджень стала оцінка параметрів затоплення прилеглих територій нижче Каховської греблі. Потік води приблизно за 200 с пройшов відстань від найближчого села (село Козацьке) $R \approx 2$ км. Це означає, що його швидкість була $w \approx 10$ м/с. Оскільки

$$\frac{dV}{dt} \approx S_w w \approx l_w h_w w,$$

де S_w – площа перерізу, l_w – ширина та висота h_w потоку води в околицях нижче Каховської греблі, то за об'ємних витрат води $dV/dt \approx 9 \cdot 10^4$ м³/с, ширини потоку $l_w \approx 1$ км маємо висоту потоку $h_w \approx 9$ м.

Відомо, що потік води з водосховища досягнув м. Херсон ($R \approx 80$ км) приблизно за 2 год [3]. При цьому швидкість потоку води $w \approx 10$ м/с. Початкова швидкість підтоплення складала 0.2–0.3 м/год. Середня швидкість підтоплення була близькою до 0.1 м/год. За дві доби висота стовпа води у місті сягала $\Delta h \approx 5$ м.

За цей час витрата води зменшилася майже втричі і значення Δh поступово зменшувалися практично за експоненціальним законом:

$$\Delta h = \Delta h_0 e^{-t/t_1},$$

де $\Delta h_0 \approx 5$ м на початку доби 08 червня 2023 р., $t_1 \approx 7-8$ діб. Ці наші теоретичні оцінки добре узгоджуються з даними спостережень [3, 4].

Проведене нами математичне моделювання та числові розрахунки показали, що потенціальна енергія маси води у водосховищі у 28 раз перевищувала енерговиділення при вибуху ядерної бомби над Хіросімою. Потужність водного потоку сягала потужності 7 – 8 енергоблоків атомних електростанцій. Початкова швидкість потоку води була близькою до 13 м/с, витрати води в багато разів перевищували витрати води у найбільш потужних ріках і найбільш сильних водоспадах. Все це не могло не призвести до катастрофічних наслідків у екосистемах, що знаходилися нижче Каховського водосховища. Катастрофічні наслідки були й для того утворення, що залишилося від водосховища.

3.3. Аналіз результатів моделювання потоку води з Каховського водосховища

Проведене у роботі моделювання показало, що руйнування Каховської греблі призвело до скиду нерегульованого водного потоку з початковою потужністю близько 7.3 ГВт, початковою витратою води $9 \cdot 10^4$ м³/с, в той час як витрати води Дніпром в середньому складали $1.7 \cdot 10^3$ м³/с, тобто були в 53 рази меншими. Потужний водний потік висотою близько 10 м призвів до затоплення та підтоплення значних територій. Площа водного дзеркала при цьому склала близько 650 км². Приблизно за 1 добу потік досягнув Дніпро-Бузького лиману, за 2 доби – Одеського морського порту. Ситуація із затопленням більш-менш стабілізувалася за ~10–15 діб. За цей час водосховище втратило більшість об'єму води. Його площа скоротилася від 2155 до 261 км², тобто на 88%.

Загальну площу підтоплених земель наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

**Територіальний розподіл земель у зоні підтоплення внаслідок руйнування
греблі Каховської ГЕС [5]**

Розподіл земель	Площа, га	Відносна площа, %
Всього	65004	100
Трав'янисто-болотні	32473	50
Ліси	13577	20.9
Луки, пасовища	12177	18.7
Забудова	4088	6.3
Рілля	3606	4
Інш.	82	0.1

Дані, наведені у табл. 3.3 показують, що найбільше постраждали трав'янисто-болотні угіддя, ліси, луки та пасовища.

Затоплення призвело до низки катастрофічних екологічних наслідків: загинуло понад 75 людей, велика кількість диких і свійських тварин, постраждали будівлі, промислові об'єкти, дороги, орні землі тощо. Затопило сміттєві звалища, каналізації, скотомогильники, кладовища, що стало біонебезпечним явищем у регіоні. Залишки потрапили до Дніпра, Дніпро-Бузького лиману та Чорного моря. Значно погіршився санітарно-епідеміологічний стан суміжних територій.

Руйнування Каховської греблі призвело до короткотривалих, середньої тривалості та довготривалих соціально-екологічних, біонебезпечних, негативних санітарно-гігієнічних наслідків, значущість яких ще належить з'ясувати. Зараз уже можна констатувати, що вони були катастрофічними. Мав місце справжній екоцид. Нічого подібного не було у світі впродовж цілих десятиліть.

3.4. Класифікація екологічних наслідків, що сталися після руйнування Каховського водосховища

Результати математичного моделювання параметрів водного потоку із водосховища показали, що вони були катастрофічними. Руйнування греблі

Каховського водосховища просто не могло не викликати дуже серйозні наслідки та екологічно-небезпечні загрози (і не тільки екологічні).

Виконані дослідження та математичне моделювання дозволили обґрунтувати класифікацію екологічних наслідків катастрофи за часом. Пропонуються наступні три категорії: короткочасні, наслідки середньої тривалості та довготривалі.

Короткочасні наслідки щодо екологічної ситуації тривали від початку катастрофи до ~ 10 діб, тобто до спустошення водосховища. При цьому продовжували затоплюватися прилеглі території. Було затоплено інфраструктурні об'єкти території – житлові забудови, автозаправні станції, смітники, каналізації, скотомогильники, кладовища та поховання тощо. У воду потрапило 650 т нафтопродуктів. Загибло більше 75 людей і велика кількість свійських і диких тварин. Затоплення супроводжувалося забрудненням Дніпро-Бузького лиману та зрештою Чорного моря. Площа забруднення склала 7300 км^2 [3], швидкість поширення бруду $\sim 1 \text{ м/с}$. Затоплення значно вплинуло на показник біорізноманіття у заплаві Дніпра. Солоність морської води у північній частині Чорного моря зменшилася у 3–3.5 рази (від 12–14 г/л до 4 г/л) [3]. Суттєво зросла концентрація токсичних речовин (Cu, Zn, As, хлорорганічних, нафтопродуктів) [3].

Екологічні наслідки середньої тривалості мали місце від ~ 1 місяця до багатьох місяців. Вони почалися з моменту повного осушення Каховського водосховища, руйнування системи водозабезпечення міст Кривий Ріг, Марганець, Берислав, Енергодар і інших населених пунктів, де проживає близько 1 млн мешканців, руйнування 31 системи іригації трьох областей (Дніпропетровської, Запорізької та Херсонської). Виникли проблеми з охолодженням устаткувань Запорізької АЕС. На території у 584 км^2 суттєво постраждали орні землі внаслідок змиву верхнього плідного шару ґрунту, відповідно і чутним буде зменшення площ продуктивних ґрунтів, а значить, показники урожайності у регіоні значно знизяться. Мали місце суттєві втрати для рибного господарства. Виникла загроза існування і збереження особливо цінних територій ПЗФ. До них належать Нижньодніпровський національний парк, Чорноморський біосферний заповідник,

Кінбурнська коса тощо. Певні наслідки обумовлені активними процесами евтрофікації у водних об'єктах. Інші біонебезпечні наслідки викликані розкладанням останків молюсків масою в 500 тис. т, що залишилися на днищі колишнього Каховського водосховища [6].

Довготривалі наслідки (від ~0.5 до 10 років і більше) пов'язані з оголенням і висиханням дна колишнього водосховища, яке містило великі маси забруднюючих речовин, важких металів, радіоактивних елементів тощо. На думку автора [6], ці речовини здатні зрештою проявитися в харчовому ланцюжку. Не очікувано, замість інтенсивного пилоутворення зі дна колишнього водосховища, через два місяці після катастрофи дно покрито травою та паростками дерев. Влітку 2024 р. висота дерев уже сягала 1 м. Такому інтенсивному росту сприяли залишки у ґрунті вологи та мінеральні речовини, а також радіоактивні елементи.

Зруйновано іригаційні системи на площі 5840 км² [5], що болісно вдарило по аграріям. У 2024 р. із-за посухи урожайність знизилася на 30-50%.

Підтоплення та спустошення водосховища негативно позначилося на землекористуванні в окремих регіонах Дніпропетровської, Запорізької, Херсонської та Миколаївської областей.

На думку автора [7], підтоплення могло викликати активізацію різноманітних екологонебезпечних процесів від опустелювання до складних гідрогеологічних змін у регіоні. На сьогодні такі прогнози поки що не підтвердилися. Проте вчені постійно стежать за змінами екосистем ложе днища колишнього водосховища, яке оголилося в наслідок руйнування греблі, й за рік загально вкрилося молодим, однак достатньо густим, лісом із білої верби, висота якого близько 3 м. Саме біла верба зазвичай розповсюджується по річкових долинах, косах, на піщаних мілинах вздовж водойм. Зараз ця територія представляє собою майже 150 тис. га вкритих природними насадженнями, проте з часом буде рідшати внаслідок росту та конкуренції між рослинами. Після руйнації Каховського водосховища створилися оптимальні умови для проростання на нижньому ярусі лісових насаджень різноманітної рослинності: щавлю, рогозу й нових видів флори, які пройшли

процес адаптації до місцевих умов. Також у наслідку розтріскування днища й утворення шпарин у ґрунті з'явилися особливі екологічні ніші, в яких з'являються та проростають насіння рослин, що змогли надати паростки тільки завдяки появі цих розломів й тим самим збільшили різноманіття місцевих екосистем.

РОЗДІЛ 4

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО УСУНЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ НАСЛІДКІВ
ЕКОЛОГІЧНОЇ КАТАСТРОФИ НА КАХОВСЬКОМУ ВОДОСХОВИЩІ

4.1. Основні шляхи оптимізації ліквідації наслідків на території підтоплення

Для оптимізації підтоплених територій необхідно здійснити наступне.

- Сприяти самовідновленню природного русла р. Дніпра, що допомагатиме збільшенню річкового стоку в Чорне море.
- Відновити та сприяти збереженню територій природної та культурної спадщини колишнього дна Каховського водосховища.
- Створити у заплаві р. Дніпро гідрологічних природоохоронних об'єктів.
- Створити об'єктів ПЗФ для збереження водно-болотних угідь. Сприяти відновленню саме рослинності, що занесені до Зеленої та Червоної книг України.
- Сприяти очищенню та відновленню джерел і струмків, які сприятимуть промиванню залишкових вод р. Дніпро.
- Сприяти відновленню чисельності популяції та видового різноманіття гідробіонтів.
- Розробити перспективні плани упорядкування щодо прогнозу й розвитку нової екосистеми – найбільших лісових масивів у степовій зоні України.
- Виконати роботи щодо очистки заплавної території до 50 м узбережжя навколо о. Хортиця.
- Сприяти відновленню в післявоєнні часи екосистем національного природного парку «Великий Луг», що у Василівському районі Запорізької області та геологічного заказника загальнодержавного значення «Дніпровські пороги».
- Сприяти відновленню міст гніздування осілих та перелітних птахів, враховуючи інтенсивний розвиток ентамофауни (негативний фактор для людини).
- Для збереження родючості та фізико-механічного складу ґрунтів

місцевим фермерам рекомендується змінити посівний фонд та вирощувати рослини, які не вимагають інтенсивного зрошення.

➤ Сприяти збільшенню площі Дніпровського екокоридору для забезпечення безперешкодної міграції диких тварин (наприклад, косуль тому, що вони харчуються гілочним кормом – збільшення кормової бази).

➤ У Національному заповіднику «Хортиця» встановити нові годівниці для диких тварин (використовуючи наявний досвід при спонсорській підтримці небайдужих).

➤ Розгорнути пошукові археологічні роботи з метою примноження різноманітних артефактів історичного значення, щоб зберегти їх для майбутнього вивчення та реставрації музейної справи в мирний час.

➤ Попередити жителів та гостей м. Запоріжжя про небезпеку відвідування оголених внаслідок обміління р. Дніпро островів та піщаних кос, які 70 років були під водою через наступні причини:

- острови – місця гніздування птахів, людина може причинити стрес для них і, відповідно, втрату пташенят,
- збереження місць гніздування птахів на цих островах допоможе підтримати біорізноманіття місцевої екосистеми,
- оголені острови є небезпечними для відвідувачів, зокрема через ймовірні вибухонебезпечні предмети попередніх воєн.

➤ Представникам екоінспекції м. Запоріжжя розробити рекомендації для жителів регіону з основною ідеєю «Закликаємо всіх дотримуватись встановлених правил і рекомендацій щоб зберегти природні ресурси та захистити місцеву флору та фауну».

➤ Розробити проектно-кошторисну документацію стосовно відновлення природно-культурної спадщини та об'єктів ПЗФ.

4.2. Конструктивні підходи, превентивні та організаційно-управлінські заходи щодо відновлення території, що потерпає від наслідків екологічної катастрофи

Для реалізації заходів щодо відновлення територій, що потерпають від наслідків екологічної катастрофи, спричиненої руйнуванням Каховського водосховища, необхідно розділити заходи на невідкладні, середньострокові та довгострокові та конкретизувати їх наступним чином.

Невідкладні заходи з відновлення екосистем

- ❖ Організувати систематичний моніторинг якості води у річці Дніпро та прилеглих водоймах, стану ґрунтів на підтоплених територіях та популяцій рідкісних видів флори і фауни в зоні впливу.

- ❖ Провести детальну оцінку забруднення територій хімічними речовинами, важкими металами, нафтопродуктами та радіоактивними елементами.

- ❖ Розробити та впровадити програму очищення водних об'єктів від забруднюючих речовин, берегової лінії від сміття, замулених ділянок русла.

Середньострокові заходи

- ❖ Відновлення природних екосистем, спрямованих на створення нових нерестовищ для риб, відновлення водно-болотних угідь та реабілітацію природних заплав.

- ❖ Запобігання ерозії ґрунтів укріпленням берегової лінії, висадженням протиерозійних насаджень і створенням дренажних систем.

- ❖ Відновлення біорізноманіття шляхом реінтродукції місцевих видів рослин і тварин, створення екологічних коридорів і охорони особливо вразливих видів.

Довгострокові заходи

- ❖ Розробка нової системи управління водними ресурсами, спрямованої на впровадження сучасних методів регулювання стоку, модернізацію гідротехнічних споруд та створення автоматизованих систем моніторингу.

- ❖ Адаптація землекористування, спрямованих на перегляд схем землекористування у прибережних зонах, впровадження водозберігаючих технологій та розробку протипаводкових заходів.

- ❖ Наукові дослідження та моніторинг, спрямовані на створення бази даних екологічного моніторингу, довгострокові дослідження відновлення екосистем і розробку прогнозних моделей.

Превентивні заходи

- ❖ Розробка системи раннього оповіщення, спрямовані на встановлення сучасних систем моніторингу, створення мережі спостережних пунктів і впровадження автоматизованих систем прогнозування.

- ❖ Підвищення готовності у напрямку розробки планів реагування на надзвичайні ситуації, проведення регулярних навчань і створення резервів матеріальних ресурсів.

- ❖ Удосконалення нормативно-правової бази у напрямку розробки нових стандартів безпеки, вдосконалення екологічного законодавства та впровадження міжнародних норм.

- Координація діяльності, спрямованої на створення міжвідомчого координаційного центру, залучення міжнародних експертів і співпрацю з науковими установами.

- Інформаційне забезпечення, орієнтоване на створення єдиної інформаційної системи, забезпечення доступу до даних моніторингу та регулярне інформування громадськості.

- Фінансове забезпечення, спрямоване на залучення міжнародної технічної допомоги, створення спеціального фонду відновлення та розробку механізмів державно-приватного партнерства.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз наукових публікацій показав, що всі відомі наукові роботи, присвячені катастрофі на Каховському водосховищі, є виключно описовими та мають оглядовий характер. У них відсутні числові розрахунки та математичне моделювання головних процесів, що призвели до катастрофи.

2. У роботі були використані методи системного та багатофакторного аналізів, а також математичне моделювання часових залежностей головних параметрів водного потоку та їхнє обчислення, спрямоване на оцінку екологічних вкрай негативних наслідків катастрофи.

3. Вперше розроблена методика кількісного аналізу динамічних процесів під час нерегульованого скиду великих мас води з пошкоджених гребель. Запропоновано прості аналітичні моделі параметрів водного потоку зі зруйнованого Каховського водосховища. Проведено числове моделювання динаміки основних параметрів водного потоку зі зруйнованого Каховського водосховища. Встановлено, що приблизно за десять діб висота стовпа води у водосховищі зменшилася більше, ніж на порядок, швидкість потоку – приблизно у 4 рази, об'єм – у 45 разів, витрати води – майже на два порядки, потужність потоку та потенціальна енергія води у водосховищі – майже на три порядки. Водосховище втратило близько 18 Гт води. Була затоплена площа у 650 км². Висота стовпа води в околицях греблі сягала 10 м, а на відстані ~ 80 км – 5 м. Початкова швидкість потоку води нижче греблі була близькою до 10 м/с.

4. Екологічні наслідки найбільшої техногенної катастрофи за десятиліття були дуже значними. Певні наслідки будуть спостерігатися ~10 років і більше. Запропоновано часову класифікацію екологічних наслідків. Короткочасні (10 – 30 діб), середньої тривалості (1–6 місяців) і довготривалі (0,5–10 років).

До *короткочасних наслідків* віднесено затоплення інфраструктурних об'єктів – житлових забудов, автозаправних станцій, смітників, каналізацій, скотомогильників, кладовищ тощо. У воду потрапило 650 т нафтопродуктів.

Загинуло більше 75 людей і велика кількість свійських і диких тварин. Затоплення супроводжувалося забрудненням Дніпро-Бузького лиману та зрештою Чорного моря. Площа забруднення склала 7300 км², швидкість поширення бруду ~1 м/с. Затоплення значно вплинуло на показник біорізноманіття у заплаві Дніпра. Солоність морської води у північній частині Чорного моря зменшилася у 3–3.5 рази. Суттєво зросла концентрація токсичних речовин (Cu, Zn, As, хлорорганічних).

5. До *середньотривалих наслідків* віднесено наступне: руйнування системи водозабезпечення міст Кривий Ріг, Марганець, Берислав, Енергодар і інших населених пунктів, де проживає близько 1 млн мешканців, руйнування 31 системи іригації Дніпропетровської, Запорізької та Херсонської областей, проблеми з охолодженням устаткувань Запорізької АЕС, змив верхнього плідного шару ґрунту орних земель на території у 584 км², зменшення площ продуктивних ґрунтів, зниження показників урожайності у регіоні, суттєві втрати для рибного господарства, загроза існування і збереження особливо цінних територій ПЗФ, таких як Нижньодніпровський національний парк, Чорноморський біосферний заповідник, Кінбурнська коса тощо, активні процеси евтрофікації у водних об'єктах, розкладання останків молюсків масою в 500 тис. т, що залишилися на дніщі колишнього Каховського водосховища.

6. До *довготривалих наслідків* віднесено наступне: оголення та висихання дна колишнього водосховища, яке містило великі маси забруднюючих речовин, важких металів, радіоактивних елементів тощо, їхнє потрапляння в атмосферу та переміщення атмосферними потоками на значні відстані та прояву в харчовому ланцюжку, руйнування іригаційної системи на площі 5840 км².

Екосистемам нанесено непоправну шкоду, яка кваліфікується як екоцид.

7. Розроблено конкретні рекомендації щодо усунення та оптимізації ліквідації наслідків екологічної катастрофи на Каховському водосховищі. Запропоновано основні шляхи застосування заходів на території підтоплення, конструктивні підходи, превентивні та організаційно-управлінські заходи щодо відновлення території, що потерпає від наслідків екологічної катастрофи. Це

сприяння відновленню природного русла Дніпра, впадаючих річок і струмків, збереження територій природної та культурної спадщини, створення об'єктів ПЗФ, сприяння збільшенню площі Дніпровського екокоридору тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Головний центр спеціального контролю. [Інтернет ресурс] URL: <https://gcsk.gov.ua> (дата звернення: 15.06.2024).
2. Khilchevskiy V., et al. Large and small reservoirs of Ukraine. *Journal of Water and Land Development*. 2023. no. 52. Pp. 101–107.
URL: <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.140379> (дата звернення: 25.06.2024).
3. Gleick P., Vyshnevskiy V., Shevchuk S. Rivers and Water Systems as Weapons and Casualties of the Russia-Ukraine War. *Earth's Future*. 2023. Vol. 11, no. 10.
URL: <https://doi.org/10.1029/2023ef003910> (дата звернення: 25.06.2024).
4. Vyshnevskiy V., et al. The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International*. 2023. Vol. 48, no. 5. P. 1–17.
URL: <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679> (дата звернення: 25.06.2024).
5. Дорош Й. М., та ін. Застосування геоінформаційних технологій при визначенні площ підтоплених земель унаслідок руйнування дамби Каховської ГЕС. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2023. № 3. С. 98–109.
URL: <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2023.03.09> (дата звернення: 25.06.2024).
6. Саніна І. В., Люта Н. Г. Екологічні наслідки підриву греблі Каховської ГЕС і шляхи вдосконалення водопостачання населення. *Мінеральні ресурси України*. 2023. № 2. С. 50–55.
URL: <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.50-55>
7. Новицький Економічна правда. Підрив Каховської ГЕС: чотири категорії наслідків та план подальших дій. *Економічна правда*. [Інтернет ресурс]
URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/06/14/701156/> (дата звернення: 20.06.2024).
8. Linnik P. M., Zubenko I. B. Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy-metal compounds. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*. 2000. Vol. 5, no. 1. P. 11–21. URL: <https://doi.org/10.1046/j.1440-1770.2000.00094.x> (дата звернення: 25.06.2024).

9. Каховська ГЕС: як усе починалося. Велике будівництво сталінської епохи (фото), 2023. Новини півдня України, Херсон, Миколаїв, Одеса, Мелітополь. URL: [https://grivna.ua/publikatsii/kahovska-ges:-yak-use-pochinalosya-velike-budivnictvo-stalinskoyi-epohi-\(foto\)](https://grivna.ua/publikatsii/kahovska-ges:-yak-use-pochinalosya-velike-budivnictvo-stalinskoyi-epohi-(foto)) (дата звернення: 15.06.2024).

10. Чорногор Л. Ф., та ін. Руйнування Каховської греблі: моделювання головних ефектів, екологічні наслідки. Екологія. Довкілля. Енергозбереження – 2024 : кол. моногр./ під ред. О. Е. Ілляш. Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». 2024. С. 62–73.

11. Чорногор Л. Л., Некос А. Н. Екоцид Каховського водосховища. Регіональні проблеми охорони довкілля та збалансованого природокористування : матеріали Міжнар. наук. конф. за участю молодих науковців (м. Одеса, 11–12 квіт. 2024 р.). Одеса, 2024. С. 235–240.

12. Чорногор Л. Ф., та ін. Моделювання потоку води зі зруйнованого військовими діями в Україні Каховського водосховища та екологічні наслідки катастрофи. Актуальні проблеми формальної і неформальної освіти з моніторингу довкілля та заповідної справи : зб. тез доповідей III Міжнародної Інтернет-конференції (м. Харків, 26 квітня 2024 року). Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. С. 31–33.