

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ІВАНОВ ДЕНИС ВАЛЕРІЙОВИЧ

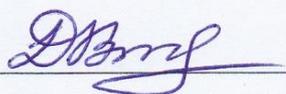
УДК 004.9:528.7

ДИСЕРТАЦІЯ
ГЕОІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОЦІНКИ
ЗАТОПЛЕННЯ ТЕРИТОРІЙ ПРИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

05.13.06 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня **кандидата технічних наук**

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



Д.В. Іванов

Науковий керівник: **БУСИГІН Борис Сергійович**,

доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2025

АНОТАЦІЯ

Іванов Д.В. Геоінформаційна технологія прогнозування та оцінки затоплення територій при надзвичайних ситуаціях – Рукопис

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2025.

У дисертаційній роботі розв'язана важлива науково-прикладна задача підвищення ефективності прогнозування та картографування зон затоплення при виникненні надзвичайних ситуацій антропогенного або природного характеру. Проведений аналіз сучасного стану проблеми прогнозування та оцінки наслідків затоплення територій при надзвичайних ситуаціях. Наведено класифікацію надзвичайних ситуацій, визначено їхній вплив на затоплення територій і підкреслено важливість врахування цих факторів при розробці стратегій управління ризиками. Аналіз сучасних методів моделювання та оцінки затоплення територій показав недосконалість використання окремих технологій та алгоритмів, а також обмежену кількість ефективних інструментів для автоматизованого прогнозування та картографування зон затоплення територій, зокрема в контексті надзвичайних ситуацій. Це підкреслює необхідність розробки комплексного підходу, який забезпечить інтеграцію супутникових знімків, хмарну обробку даних та візуалізацію результатів на інтерактивних картах.

Запропоновано геоінформаційну технологію прогнозування та картографування небезпеки затоплення територій при антропогенних надзвичайних ситуаціях, яка використовує різночасові супутникові зображення і базується на використанні напівкерованого машинного навчання та згорткових нейронних мереж. Технологія дозволяє точно прогнозувати й картографувати зони можливих затоплень територій, враховуючи різні сценарії надзвичайних ситуацій, зокрема руйнування дамб або збільшення рівня води.

Запропонована інформаційна технологія реалізована у вигляді геоінформаційної системи для моделювання, прогнозування та оцінки затоплення територій, яка забезпечує інтеграцію даних супутникових знімків, хмарну обробку, візуалізацію результатів на інтерактивних картах і зручний графічний інтерфейс для аналізу й прийняття рішень при надзвичайних ситуаціях з мінімальними витратами часу та ресурсів.

Ключові слова: геоінформаційні технології, затоплення територій, прогнозування затоплень, моделювання, супутникові дані, надзвичайні ситуації.

SUMMARY

Ivanov D.V. Geoinformation technology for forecasting and assessing flooding in emergency situations. – Manuscript

Thesis for scientific degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.13.06 – Information technologies. – Dnipro University of Technology, Dnipro, 2025.

This dissertation proposes a comprehensive solution for developing advanced information technologies for forecasting and mapping flood zones during emergencies caused by anthropogenic and natural factors. The thesis explores modern techniques and methodologies for predicting and assessing the consequences of flooding, focusing mainly on the limitations of current approaches and software tools in handling these issues, especially in emergencies. While effective under regular facilities, existing technologies often suffer from low accuracy and limited efficiency when applied to the urgent context of natural or human-made disasters. This limitation underscores the need for innovative approaches to address the complexities of real-time flood forecasting and mapping, ensuring that decisions can be made quickly to mitigate the devastating impacts on lives and property.

The research highlights the growing importance of satellite-based data in monitoring flood events and the role of automated systems in improving the speed and reliability of disaster response efforts. The technology developed within this dissertation integrates multi-temporal satellite images with machine learning methods, explicitly leveraging semi-supervised learning techniques and convolutional neural networks. This combination improves accuracy in predicting potential flood zones, overcoming the inaccuracies associated with traditional flood modeling. The proposed system includes several key stages that address the challenges of accurate flood zone identification. These stages begin with the preprocessing of optical satellite images, which involves the removal of cloud cover to ensure that the image data used for analysis is as clear and consistent as possible. The next step is automatically segmenting water bodies, critical for identifying areas susceptible to flooding. Additionally, the system forecasts water level changes based on the analysis of multi-temporal optical satellite images, which enhances the capability to model flood events across time and space.

One of the main advantages of this technology is its ability to generate highly accurate flood zone maps with an error rate as low as 12%. This accuracy is crucial for ensuring that emergency responders and decision-makers have reliable data for managing risks and coordinating efforts during an emergency. The proposed information technology was implemented as a geographic information system (GIS), integrating satellite imagery, cloud-based data processing, and real-time visualization of the results on interactive maps. This GIS platform provides a user-friendly interface that allows operators to quickly input data, perform necessary analyses, and visualize flood zones in an efficient and effective way. The system is designed to assist decision-makers in rapidly assessing flood risks, determining the extent of flood zones, and taking appropriate action to minimize the damage caused by flooding.

Testing the proposed technology in various real-world conditions has demonstrated its effectiveness in assessing flood zones under different emergency scenarios. The results show that the system can provide timely and accurate predictions, even in the complex and dynamic environments that characterize flood events. Whether the emergency is due to natural disasters such as hurricanes, river flooding, or anthropogenic factors such as dam failures or industrial accidents, the technology can adapt to different situations and provide actionable insights for risk management and mitigation.

In addition to improving the precision of flood forecasting, the proposed technology also contributes to a more streamlined and efficient process for decision-making during emergencies. By providing real-time information, the system can help authorities make more informed choices about resource allocation, evacuation plans, and other critical aspects of emergency management. This capability is essential in climate change, where the frequency and intensity of flooding events are expected to increase, making the need for accurate and timely flood mapping even more pressing.

The information technology developed in this dissertation offers several significant benefits for flood risk management. First, it enhances the accuracy of flood zone forecasting, providing authorities with reliable data that can be used to protect populations and infrastructure. Second, it enables faster decision-making by presenting flood risk information in an easily accessible format. Finally, it reduces the potential negative consequences of flooding by improving the effectiveness of

emergency response efforts, ultimately saving lives and minimizing economic losses.

The technology is highly scalable and can be applied to various regions and flood scenarios, making it an invaluable tool for governments, emergency services, and disaster response teams worldwide. With its ability to integrate satellite data, process information in the cloud, and deliver real-time predictions and visualizations, the system represents a significant step forward in flood forecasting and mapping. It provides a vital resource for managing flood risks in an increasingly complex and uncertain world.

In conclusion, the proposed information technology can profoundly impact the accuracy and effectiveness of flood zone forecasting and mapping, enabling better decision-making during emergencies and enhancing the ability to manage flood-related risks. By reducing the time and resources required for accurate flood assessments, this technology holds the potential to mitigate the devastating effects of floods on human populations, infrastructure, and economies worldwide.

Key words: geoinformation technologies, flooding, flood forecasting, modeling, satellite data, emergencies.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у міжнародних виданнях та у виданнях, які включено до науково-метричних баз:

1. Ivanov D.V., Hnatushenko V.V., Kashtan V.Yu., Garkusha I.M. (2022). Computer modeling of territory flooding in the event of an emergency at Seredniodniprovska Hydroelectric Power Plant. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2022, № 6. P.158-163. (Збірник включено до міжнародних науково-метричних баз даних: Scopus, Index Copernicus). DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/123>. (*Особисто здобувачем: розроблено метод розрахунку зон затоплення територій при виникненні надзвичайних ситуацій*).

2. Kashtan V.Yu., Ivanov D.V., Hnatushenko V.V. (2024). Geoinformation Technology for Modeling and Mapping Flooding Territory in the Event of the Dnipro Hydroelectric Power Station Dam Failure. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds) *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision-Making, Volume 1. ISDMCI 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 27 December 2024, vol 219, pp 93–115. Springer, Cham. Print ISBN 978-3-031-70958-6, Online ISBN 978-3-031-70959-3. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-70959-3_5 (*Особисто здобувачем: розроблена інформаційна технологія для картографування небезпеки затоплення при можливій аварії на Дніпровській гідроелектростанції*).

Статті у фахових виданнях України:

3. Каштан В.Ю., Сергеева К.Л., Коробко О.В., Іванов Д.В. Пошук та оцінка островів тепла на цифрових космічних знімках // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (146). - Дніпро, 2023. – 146 с. – С.87-98. ISSN 1562-9945 (Print), ISSN 2707-7977 (Online). DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-146-2023-09>. (*Особисто здобувачем: побудовано карти УНІ, LST міста Дніпро з використанням запропонованої методики*).

4. Іванов Д.В., Каштан В.Ю. Геоінформаційна технологія виявлення та моделювання затоплених зон (територій) на основі згорткової нейронної мережі. *(Особисто здобувачем: розроблена геоінформаційна технологія для моделювання затоплених зон на основі трансферного навчання).*

5. Іванов Д.В., Каштан В.Ю., Гнатушенко В.В. Методологія цифрового картографування виникнення можливих затоплень територій із застосуванням напівкерованого машинного навчання // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Том 341 № 5, Хмельницький, 2024. – С.12-19. ISSN 2307-5732. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-1>. *(Особисто здобувачем: розроблена методологія цифрового картографування потенційних зон затоплення на основі методу «точка в полігоні»).*

6. Іванов Д.В., Каштан В.Ю. Архітектура системи підтримки рішень із захищеною обробкою даних при затопленні територій // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Том 347 №1, Хмельницький, 2025. – С.123-130. ISSN 2307-5732. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-347-1-16>. *(Особисто здобувачем: розроблена архітектура системи підтримки прийняття рішень із захищеною обробкою даних та інтерактивна карта затоплення територій).*

Тези і матеріали наукових конференцій:

7. Іванов Д.В., Гнатушенко В.В. Імітаційне моделювання затоплення територій при виникненні надзвичайної ситуації на гідроелектростанції // Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості: XVI Міжн. конф. (15-17 грудня 2021 р.): зб. наук. пр. [Електронний ресурс] / НТУ «Дніпровська політехніка». – Дніпро: 2022. №6. С.123-128. Режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/160316>. *(Особисто здобувачем: розроблена програмна частини для імітаційного моделювання зон затоплення у разі виникнення надзвичайних ситуацій на ГЕС «ГеП Акосомбо»).*

8. Приходько Є.О., Каштан В.Ю., Іванов Д.В. Автоматизований збір даних для аналізу ризиків руйнувань дамби // Молодь: наука та інновації: матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 23–25 листопада 2022 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ «ДП», 2022 – 567 с. – С. 366-367. (*Особисто здобувачем: розроблений алгоритм парсингу веб-сайтів*).

9. Сергеева К.Л., Каштан В.Ю., Коробко О.В., Іванов Д.В., Качан І.С. Аналіз супутникових даних для оцінки островів тепла урбанізованих територій // Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості: XVII Міжнар. конф. (24 листопада 2022 р., м. Дніпро): зб. наук. пр. / ред. кол.: А.А. Азюковський та ін.; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2022. – № 7. – 214 с. – С. 71-76. (*Особисто здобувачем: побудована картограма просторового розподілу зон підвищених температур*).

10. Каштан В.Ю., Іванов Д.В. Комп'ютерна система контролю стану водних об'єктів та прилеглих до них територій в умовах війни // «Наукова весна» 2023: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 1–3 березня 2023 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ «ДП», 2023. 483 с. – С. 176-177. (*Особисто здобувачем: організована структури бази геоданих та розраховані параметри зони затоплення*).

11. Каштан В.Ю., Іванов Д.В. Інформаційна технологія автоматизованого збору аналітичних даних із веб-ресурсів // Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси (ІМТСК-2024): V Міжнародна науково-практична конференція. 18-19 квітня 2024 р., Черкаси, Україна. – Черкаси: Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, 2024. – 319 с. – С. 97-99. (*Особисто здобувачем: розроблений алгоритм парсингу сайту*).

12. Kashtan V. Yu., Ivanov D.V., Hnatushenko V.V. GEOINFORMATION TECHNOLOGY FOR FLOOD ZONE MODELING AND EMERGENCY RESPONSE PLANNING // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMSI'2024): матеріали XX Міжнародної наукової інтернет-конференції (20-23 червня 2024 р., м. Хмельницький, м. Усті над Лабем) / за ред. В.І. Литвиненка, С.А. Бабічева. – Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2024. – 49 с. ISBN 978-617-8187-21-7 (електронне видання). – С. 9-10. (*Особисто здобувачем: розроблена топографічна карта досліджуваної території та зони затоплення*).

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	13
ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1	25
ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАТОПЛЕННЯ ТЕРИТОРІЇ ПРИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	25
1.1 Надзвичайні ситуації: класифікація та вплив на затоплення територій	25
1.1.1 Класифікація природних надзвичайних ситуацій.....	28
1.1.2 Класифікація антропогенних надзвичайних ситуацій.....	29
1.2 Аналіз причин та наслідків затоплення територій у світі	31
1.3 Картографування небезпеки затоплення територій	41
1.3.1 Карти масштабів затоплення територій.....	43
1.3.2 Карти глибини затоплення	44
1.3.3 Карти додаткових характеристик затоплення територій	44
1.3.4 Карти небезпеки затоплення територій	44
1.3.5 Карти ризиків затоплення територій.....	45
1.3.6 Використання карт повеней урядами країн.....	46
1.4 Технології супутникового моніторингу	47
1.4.1 Оптичні супутникові дані.....	48
1.4.2 Картографування затоплень територій на основі оптичних супутникових даних	49
1.4.3 Картографування теплових аномалій на основі аналізу оптичних супутникових знімків.....	51
1.5 Огляд ГІС для моніторингу та картографування затоплених територій	59
1.6 Огляд інформаційних систем для даних метеорологічних прогнозів....	65
1.7 Огляд комп'ютерних моделей та інформаційних технологій прогнозування і оцінки затоплення територій	67
1.8 Постановка задачі	73
1.9 Висновки по першому розділу	76
РОЗДІЛ 2	79
МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ АНАЛІЗУ РИЗИКУ ЗАТОПЛЕННЯ ТЕРИТОРІЙ	79
2.1. Гідролого-гідравлічні методи.....	79

2.1.1 Гідрометеорологічні методи	81
2.1.2 Метод обчислення водозбору	82
2.1.3 Методи моделювання гідрографа вузла.....	84
2.1.4 Одновимірні підходи для моделювання затоплення територій	85
2.1.5 Двовимірні підходи для моделювання затоплення територій.....	89
2.2 Геолого-геоморфологічні методи	92
2.3 Метод комп'ютерного моделювання затоплення територій при виникненні надзвичайної ситуації на гідроелектростанції	95
2.4 Висновки по другому розділу.....	110
РОЗДІЛ 3	111
РОЗРОБКА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ Й ОЦІНКИ НАСЛІДКІВ ЗАТОПЛЕННЯ ТЕРИТОРІЇ	111
3.1 Геоінформаційна технологія прогнозування та картографування небезпеки затоплення при антропогенних надзвичайних ситуаціях	111
3.1.1 Цифрові дані	113
3.1.2 Цифрова модель місцевості.....	117
3.1.3 Створення класів БГД на основі машинного навчання.....	119
3.1.4 Гідродинамічне моделювання водосховища на основі математичного апарату.....	121
3.1.5 Побудова карти тривимірної місцевості.....	123
3.2 Геоінформаційна технологія виявлення можливих затоплених зон при природних надзвичайних ситуаціях	124
3.2.1 Напівкероване машинне навчання	124
3.2.2 Згортоква нейронна мережа	131
3.3 Програмна реалізація геоінформаційної системи	142
3.3.1 Архітектура геоінформаційної системи.....	142
3.3.2 Хмарна інфраструктура та база даних	143
3.3.3 Геоінформаційні програмні додатки	145
3.3.4 Віртуальне середовище та доступ до даних	146
3.3.5 Інтерактивна карта	146
3.3.6 Графічний інтерфейс користувача	147
3.4 Висновки по третьому розділу	149
РОЗДІЛ 4	151
ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОЦІНКИ ЗАТОПЛЕННЯ ТЕРИТОРІЙ ПРИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	151

4.1	Результати комп'ютерного моделювання затоплення території при виникненні надзвичайної антропогенної ситуації на Середньодніпровській ГЕС	151
4.2	Результати технології виявлення та моделювання затоплених зон на основі напівкерованого машинного навчання.....	153
4.2.1	На прикладі м. Мукачєво.....	153
4.2.2	На прикладі м. Дубай.....	157
4.3	Результати роботи технології виявлення та моделювання затоплених територій при природних надзвичайних ситуаціях на основі загорткових нейронних мереж	160
4.3.1	Порівняння результатів технології виявлення та моделювання затоплених територій напівкерованого машинного навчання та згорткових нейронних мереж.....	169
4.4	Результати комп'ютерного моделювання та картографування території затоплення внаслідок прориву греблі Дніпровської ГЕС при антропогенних надзвичайних ситуаціях	171
4.5	Висновки по четвертому розділу	179
	ВИСНОВКИ.....	182
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	184
	ДОДАТОК А.....	205
	СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ АВТОРА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	205
	ДОДАТОК Б	209
	ДОКУМЕНТИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	209
	ДОДАТОК В.....	212
	РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ	212
	ДОДАТОК Г	214
	ФРАГМЕНТИ КОДУ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ.....	214

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ARW	Advanced Research WRF (передові дослідження і прогнозування погоди)
CNN	Convolutional Neural Networks (згорткові нейронні мережі)
FCN	Full Convolutional Networks (повністю згорткової мережі)
FL	Клас водних об'єктів
FR	Факторний вплив
FV	Клас земної поверхні
FVI	Індекс вразливості до повеней
GFS	Global Forecast System (глобальна система прогнозування)
GUI	Graphical User Interface (графічний інтерфейс користувача)
K-NN	K-Nearest Neighbor
LST	Land Surface Temperature (температура поверхні землі)
MAUT	Теорія багатоатрибутивної корисності
MIR	Mid-Infrared Range of the Spectrum (середній інфрачервоний діапазон спектра)
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index (модифікований індекс нормалізованої різниці води)
NCAR	National Center for Atmospheric Research (Національний центр атмосферних досліджень)
NCEP	National Center for Environmental Prediction (Національний центр прогнозування навколишнього середовища)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (нормалізований диференційний вегетаційний індекс)
NDWI	Normalized Difference Water Index (нормалізована різниця води)
NIR	Near InfraRed (ближній інфрачервоний діапазон спектра)
NMM	Nonhydrostatic Mesoscale Model (негідростатична мезомасштабна модель)

NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Національне управління океанічних і атмосферних досліджень)
RF	Класифікатор Random Forest (випадковий ліс)
RIMES	Regional Integrated Multi-Hazard Early Warning System Weather
WRF	Research and Forecasting (Регіональна інтегрована система раннього попередження про різні види небезпек Дослідження та прогнозування погоди)
SCS	Soil Conservation Service (Служба охорони ґрунтів)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission (Радіолокаційна топографічна місія «Шаттл»)
SVM	Support Vector Machines (метод опорних векторів)
UHI	Urban Heat Islands (міські острови тепла)
WRF	Weather Research and Forecasting (дослідження і прогнозування погоди)
АНР	Метод аналітичної ієрархії
БГД	База геоданих
ГА	Гідродинамічна аварія
ГЕС	Гідроелектростанція
ГІС	Геоінформаційна система
ГТС	Гідротехнічні споруди
ДЗЗ	Дистанційне зондування Землі
НМ	Нейронні мережі
ОАЕ	Об'єднані Арабські Емірати
СКЗ	Система картографування затоплення
СУБД	Система управління базами даних
ТНМ	Триангуляційна нерегулярна мережа
ЦМР	Цифрова модель рельєфу
ШНМ	Штучні нейронні мережі

ВСТУП

Актуальність теми. Затоплення територій є наслідком складної взаємодії метеорологічних і антропогенних факторів. Незалежно від їхнього походження, затоплення територій має катастрофічні наслідки, серед яких – руйнування будівель, інфраструктури та сільськогосподарських угідь. Однією з головних змін у землекористуванні стало зростання урбанізації, що впливає на гідрологічні процеси. Ця тенденція є особливо актуальною в сучасному світі, де мегаполіси та міські агломерації постійно зростають, а земельні ресурси стають обмеженими. Урбанізація призводить до збільшення площі асфальтованих поверхонь, що знижує водопроникність ґрунтів та збільшує ризик затоплення під час сильних дощів або відтавання снігу. Крім того, зміни в природному середовищі, такі як вирубка лісів та руйнування екосистем, також сприяють збільшенню ризику затоплення територій. Зменшення природних водозбірних і поглинальних бар'єрів, таких як лісові масиви та водно-болотні угіддя, призводить до більш швидкого відведення великих обсягів води. Це, в свою чергу, сприяє швидкому заповненню низинних територій і міських районів водою, що може призвести до їх затоплення.

У зв'язку з цим важливим аспектом є впровадження сучасних методів оцінки та аналізу зон затоплення територій. Своєчасне та оперативне виявлення таких зон стає ключовим завданням для збереження життя людей, захисту інфраструктури, а також для зниження екологічних і економічних втрат. Отримання інформації про елементи та явища, які неможливо спостерігати безпосередньо на місці, є важливою складовою для управління ризиками затоплень, особливо в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема, військових конфліктів. Створення спеціалізованих карт зон затоплення, що містять додаткові дані для тактичного планування, є необхідним інформаційним ресурсом для забезпечення належного рівня безпеки та ефективного управління під час надзвичайних ситуацій. Для їх розробки

використовують супутникові знімки, які надають оперативну та достовірну інформацію про географічні об'єкти та зони ризику затоплення.

Отже, поставлена задача прогнозування й оцінки наслідків затоплення територій при надзвичайних ситуаціях є комплексною проблемою, для вирішення якої необхідним є виконання основних наступних процесів:

- комп'ютерне моделювання зон затоплення територій на основі математичних розрахунків відповідних параметрів, наприклад, хвилі прориву дамби та аналізу гідрологічних характеристик;

- цифрове картографування отриманих результатів для створення візуалізацій потенційно затоплених територій з урахуванням інфраструктурних об'єктів;

- аналіз та прогнозування зон затоплення з використанням геоінформаційних технологій для підвищення оперативності та точності оцінки наслідків затоплення територій.

Тема впливу антропогенного навантаження на водні об'єкти та території, що піддаються затопленню, є важливою складовою численних наукових досліджень. Значна увага приділяється застосуванню геоінформаційних технологій для моніторингу та оцінки змін, пов'язаних з затопленнями. Важливий внесок у розвиток цих технологій зробили вчені, такі як Zhao Y., Zou X., Liu, Langat P., Kumar K. та інші.

Значний внесок у розвиток методів прогнозування та оцінки затоплення територій зробили вітчизняні науковці, такі як Ковальчук І.П., Ободовський О.Г., Яцик А.В. та Дубіс Л.Ф. Їхні наукові результати стали основою для подальшого дослідження, зокрема впливу основних факторів на морфогенез річкових систем, трансформацію русел та закономірності динаміки водних потоків. Результати проведених досліджень сприяли розвитку теоретичних засад механізмів розливу річок, процесів переформування заплав та встановленню закономірностей взаємодії гідрологічних, геоморфологічних і антропогенних факторів. Вагомий внесок у дослідження ризиків затоплення зробили також закордонні вчені, серед

яких Blackwell W., Bridge J., Buffington J., Crosato A., Friend P., Grenfell M., Hooke J., Korpak J., Krzemień K., Nawieśniak M., Parker G., Piégay H. та Wohl E. Їхні наукові праці присвячені аналізу змін русел річок, методів гідрологічного та гідродинамічного моделювання для прогнозування затоплень територій. Особлива увага приділяється оцінці впливу природних і антропогенних факторів на зміну морфології русел та методам зменшення ризиків затоплення територій. Сучасні дослідження в області прогнозування та оцінки затоплення територій використовують алгоритми машинного навчання (Ge W.; Sheng J.; Pan H.; Williams R.; Ward S., Chapman C; Lyons T., Skitmore M; Bing L., Tiong R.; Saaty T.; Mills, A.; Zhang S.; He M.; Wang S., Manning, C.). Однак запропоновані методи та технології потребують подальшого вдосконалення, оскільки в умовах реального часу вони часто не здатні забезпечити необхідну точність для оперативного прогнозування та оцінки затоплень територій. Існуючі геоінформаційні технології недостатньо враховують вплив антропогенного навантаження на водний режим річок, що суттєво впливає на точність моделей прогнозування змін у водному балансі, картографування водних об'єктів та характеристик затоплених територій у режимі реального часу.

Таким чином, питання прогнозування та оцінки затоплення територій при надзвичайних ситуаціях залишається актуальним й вимагає подальших наукових розробок. Застосування різночасової космічної зйомки в поєднанні з новітніми геоінформаційними технологіями та методами машинного навчання дозволить створити точні моделі для прогнозування та оцінки затоплень територій, та в результаті підвищити ефективність моніторингу водних ресурсів при надзвичайних ситуаціях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана відповідно до закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2001, № 48, ст.253), і стосується напряму «інформаційні та комунікаційні технології» (стаття 3). Обраний напрямок досліджень

пов'язаний із виконанням науково-дослідної роботи кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» «Моделі й інформаційні технології обробки та аналізу даних в складних комп'ютерних системах і мережах» (реєстраційний номер 0121U114523, 2022-2024 рр.) та кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка» «Методи, моделі та технології обробки даних в комп'ютерних системах загального та спеціального призначення» (державний реєстраційний номер 0121U113718), «Високопродуктивні багатопроекторні системи: особливості конструювання, дослідження оцінок ефективності, застосування до розв'язування прикладних задач» (державний реєстраційний номер 0122U201569).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення точності прогнозування та оцінки наслідків затоплення територій у надзвичайних ситуаціях шляхом розробки геоінформаційної технології моделювання, картографування та аналізу супутникових даних з використанням машинного навчання.

Для досягнення поставленої мети дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

1. Здійснити комплексний аналіз причин та наслідків затоплення територій, зокрема в контексті природних і антропогенних надзвичайних ситуацій, для виявлення основних факторів, що впливають на інтенсивність і масштаб затоплень.

2. Розробити метод комп'ютерного картографування затоплення територій при виникненні надзвичайної ситуації на гідроелектростанції.

3. Розробити геоінформаційну технологію прогнозування та картографування небезпеки затоплення територій при антропогенних надзвичайних ситуаціях, що дозволить своєчасно оцінювати потенційні наслідки для стану територій та об'єктів інфраструктури.

4. Розробити геоінформаційну технологію класифікації земної поверхні за даними оптичних супутникових зображень, використовуючи архітектуру напівкерованого машинного навчання та згорткових нейронних мереж, з подальшим визначенням зон затоплення територій.

5. Провести порівняння результатів технології виявлення та моделювання затоплених зон територій за допомогою напівкерованого машинного навчання та згорткових нейронних мереж з метою визначення найбільш ефективного підходу для автоматизованого виявлення затоплених територій на основі супутникових зображень.

6. Запропонувати рішення у вигляді програмної реалізації геоінформаційної системи для інтеграції запропонованих моделей та методів прогнозування та оцінки затоплення територій в умовах реального часу.

7. Впровадити розроблені геоінформаційні технології для прогнозування та оцінки наслідків затоплення територій, заснованих на аналізі різночасових супутникових зображень, та надати практичні рекомендації щодо їх використання в управлінні ризиками затоплень у надзвичайних ситуаціях.

Об'єкт дослідження – процес моделювання та прогнозування зон затоплення територій за даними супутникової зйомки.

Предмет дослідження – методи та засоби геоінформаційної технології виявлення, моделювання та прогнозування зон затоплення.

Методи дослідження. Теоретичну та методологічну основу роботи складають методи цифрової обробки зображень, геоінформаційні технології, методи машинного навчання, а також гідродинамічні моделі на основі рівнянь Сен-Венана.

Наукові положення:

1. На основі системного аналізу проблем, що виникають під час прогнозування та оцінки затоплення територій у надзвичайних ситуаціях із використанням супутникових знімків, а також дослідження можливостей застосування методів штучного інтелекту, запропоновано метод для

виявлення зон затоплення територій, що використовує архітектуру згорткової нейронної мережі з трансферним навчанням. Розроблений алгоритм дозволив автоматизувати процес картографування затоплених територій за супутниковими знімками та використовувати результати його застосування для прогнозування та оцінки рівня затоплення територій при надзвичайних ситуаціях.

2. На основі запропонованих в роботі алгоритмів запропоновано комп'ютерну 3D-модель можливого затоплення територій при надзвичайних ситуаціях, що поєднує методи імітаційного моделювання, геометричного та гідрологічного підходів. Комп'ютерна модель враховує параметри хвилі прориву та геометрії конструктивних елементів під час прориву дамби гідроелектростанції або підвищення рівня води.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розвитку, розробленні та реалізації теоретичних і науково-методичних засад для прогнозування й оцінки наслідків затоплення територій при надзвичайних ситуаціях, на основі яких:

– *вперше* запропоновано метод комп'ютерного моделювання та картографування затоплення територій при надзвичайних ситуаціях, спричиненої руйнуванням дамби на гідроелектростанції, що на відміну від існуючих методів, забезпечує підвищену просторову деталізацію зон затоплення територій на основі цифрових моделей рельєфу та розрахунку гідродинамічних параметрів проривної хвилі. Ефективність методу підтверджено шляхом його апробації на прикладі Середньодніпровської ГЕС та Дніпровської ГЕС, що дозволило оцінити потенційні наслідки та підвищити точність прогнозування затоплення територій в реальному часі;

– *вперше* застосовано згорткові нейронні мережі з трансферним навчанням для виявлення зон затоплення територій на оптичних багатоканальних супутникових знімках. Модифікація архітектури нейронної мережі з додаванням конволюційних шарів дозволила підвищити точність класифікації затоплених територій, а також забезпечити автоматизацію

аналізу різночасових геопросторових даних для управління природними ризиками;

– *вперше* розроблено геоінформаційну технологію моделювання та картографування зон затоплення територій, яка дозволяє автоматизувати процес побудови цифрових карт затоплення територій у реальному часі при виникненні надзвичайної ситуації, що забезпечує підвищену просторову деталізацію зон затоплення територій та покращує точність їх прогнозування.

– *вдосконалено* підхід до оцінки зон затоплення територій, що поєднує матрицю попарних порівнянь, напівкероване навчання та класи небезпеки. Матриця попарних порівнянь використовується для визначення вагових коефіцієнтів ключових критеріїв, таких як висота над рівнем моря, нахил поверхні, максимальна кількість опадів, акумуляція стоку, характеристики ґрунтів та відстань до затоплених доріг. Експериментальні результати показали середню квадратичну похибку цифрової топографічної карти на рівні 3,21 метра, що відповідає вимогам для практичного застосування, а з коригувальним коефіцієнтом 1,25 середня похибка становить 2,57 метра, що підвищує ефективність моніторингу та планування в умовах затоплень;

– *вдосконалено* комп'ютерну модель прогнозування зон затоплення територій при виникненні надзвичайної ситуації, яка поєднує методи імітаційного моделювання, геометричного та гідрологічного підходів. Ця модель забезпечує якісну 3D-візуалізацію зон затоплення територій та врахування параметрів хвилі прориву, геометрії конструктивних елементів, а також підвищену точність планування заходів із реагування на надзвичайні ситуації;

– *отримав подальший розвиток* математичний метод розрахунку зон затоплення при руйнуванні дамби, заснований на застосуванні систем рівнянь Сен-Венана. Це дозволило здійснити комплексне моделювання затоплених територій з урахуванням геометричних і гідрологічних характеристик русел річок, що підвищило точність прогнозування наслідків затоплень територій.

Практичне значення одержаних результатів визначається суттєвим підвищенням ефективності прогнозування та картографування зон затоплення при виникненні надзвичайних ситуацій антропогенного або природного характеру.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні геоінформаційної системи для моделювання, прогнозування та оцінки затоплення території, яка забезпечує інтеграцію даних супутникових знімків, хмарну обробку, візуалізацію результатів на інтерактивній карті та зручний графічний інтерфейс для проведення аналізу й прийняття рішень при надзвичайних ситуаціях з мінімальними витратами часу та ресурсів. Розроблена система складається з таких компонентів:

- розроблено метод комп'ютерного моделювання та картографування затоплення територій при надзвичайних ситуацій для Середньодніпровської ГЕС та Дніпровської ГЕС, який дозволяє точно прогнозувати можливі наслідки затоплень територій, враховуючи різні сценарії надзвичайних ситуацій та гідродинамічні параметри проривної хвилі;

- розроблено автоматизовану геоінформаційну технологію з використанням архітектури напівкерованого машинного навчання та згорткових нейронних на основі різночасових супутникових зображень мереж для виявлення та моделювання зон затоплення територій.

Впровадження одержаних результатів. Практичне значення результатів підтверджується впровадженнями результатів дисертаційної роботи у практику робіт ТОВ «КОМПАНІЯ ГЕОНІКС» (Київська обл., Бучанський р-н, смт. Клавдієво-Тарасове) та ТОВ ФІРМА «ГЕОРА» (м. Дніпро), що забезпечує вдосконалення методів прогнозування та оцінки наслідків затоплення, а також оптимізацію процесів управління ризиками в умовах надзвичайних ситуацій, а також впровадженням у освітній процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Розроблена геоінформаційна технологія, методи автоматизованого збору даних (парсинг) та експериментальне програмно-алгоритмічне

забезпечення можуть бути застосовані для створення програмних і програмно-апаратних комплексів, призначених для прогнозування та оцінки наслідків затоплення територій у разі надзвичайних ситуацій.

Особистий внесок здобувача. Усі теоретичні та практичні результати, що складають наукову новизну дисертаційної роботи отримані автором особисто.

У наукових публікаціях, створених у співавторстві, здобувачу належить: розробка методу розрахунку зон затоплення територій при виникненні надзвичайних ситуацій [1], розробка інформаційної технології для картографування небезпеки затоплення при можливій аварії на Дніпровській гідроелектростанції [2], побудова карт УНІ, LST міста Дніпро з використанням запропонованої методики в роботі [3], розробка геоінформаційної технології на основі трансферного навчання для виявлення затоплених територій [4], розробка методології цифрового картографування потенційних зон затоплення на основі методу «точка в полігоні» [5].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на наукових семінарах кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»; XVI Міжнародній конференції «Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості» (м. Дніпро, 2021 р., 2022 р.); X Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (м. Дніпро, 2022 р.); «Наукова весна» 2023: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (м. Дніпро, 2023 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2023» (м. Дніпро, 2023 р.); XII Міжнародній науково-практичній конференції «ITSec: Безпека інформаційних технологій» (м. Ужгород, 2023 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси (ІМТСК-2024)» (м. Черкаси, 2024).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 13 наукових працях. П'ять статей опубліковано у наукових виданнях, включених до переліку фахових видань України, 2 статті – індексується у НМБД Scopus, 6 – тези доповідей та матеріали конференцій, опубліковано у збірниках наукових праць та матеріалах міжнародних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 217 сторінок, містить 183 сторінки основної частини, включає 51 рисуноків, 6 таблиць, 146 літературних джерел.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАТОПЛЕННЯ ТЕРИТОРІЇ ПРИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

1.1 Надзвичайні ситуації: класифікація та вплив на затоплення територій

Щодня у світі відбуваються численні події, що можуть спричинити людські жертви або суттєві матеріальні втрати. Такі події називають надзвичайними ситуаціями.

Основні ознаки надзвичайної ситуації [13]:

- загроза або факт загибелі людей чи значне погіршення умов їхньої життєдіяльності;
- економічні збитки;
- значне погіршення стану довкілля.

Надзвичайні ситуації зазвичай виникають через аварії, катастрофи, стихійні лиха, епідемії, терористичні акти, збройні конфлікти тощо.

Аварії поділяються на дві категорії [14] :

- I категорія: загинуло 5 або більше осіб, травмовано 10 і більше осіб; стався викид отруйних, радіоактивних чи небезпечних речовин за межі санітарно-захисної зони підприємства; концентрація забруднюючих речовин у навколишньому середовищі збільшилася більш ніж у 10 разів; зруйновано будівлі, споруди чи основні конструкції об'єкта, що створює загрозу для життя і здоров'я працівників або населення.
- II категорія: загинуло до 5 осіб або травмовано від 4 до 10 осіб; зруйновано будівлі, споруди чи основні конструкції об'єкта, що створює загрозу для життя і здоров'я працівників цеху або ділянки (чисельність працівників 100 і більше).

Події природного походження або результат дії природних процесів, які за своєю інтенсивністю, масштабом поширення і тривалістю можуть впливати на людей, об'єкти економіки та довкілля, називаються небезпечними природними явищами. Руйнівне небезпечне природне явище – це стихійне лихо. Надзвичайні ситуації можуть відрізнятися за кількістю жертв, кількістю постраждалих або поранених, кількістю людей, які зазнали моральних збитків, розміром економічних втрат, площею ураженої території тощо.

Значущість надзвичайної ситуації визначається передусім кількістю жертв та рівнем впливу на навколишнє середовище, тобто рівнем системи «людина життєве середовище» (далі «Л – ЖС»), якої вона торкнулася, і розміром шкоди, завданої цій системі. Виходячи з ієрархії систем «Л – ЖС», можна говорити про [15]:

- індивідуальні надзвичайні ситуації, коли загроза стосується лише однієї особи;
- надзвичайні ситуації мікроколективу, коли загроза стосується сім'ї, виробничої бригади, пасажирів одного купе тощо;
- надзвичайні ситуації колективу;
- надзвичайні ситуації макроколективу;
- надзвичайні ситуації для жителів міста чи району;
- надзвичайні ситуації для населення області;
- надзвичайні ситуації для населення країни;
- надзвичайні ситуації для жителів континенту;
- надзвичайні ситуації для всього людства.

Гідрометеорологічні чинники паводків залежать від ландшафту, клімату території та розміру басейну. У басейні залежність паводкового стоку визначається характеристиками дощу, наявністю води на поверхні та дефіцитом вологи в ґрунті. Причини виникнення повеней включають: підводні виверження вулканів та підводні землетруси; прориви гребель або

гідротехнічних споруд; перешкоди потоку в руслі річки, такі як затори або жазори; сніговий покрив і дощові опади під час зимових відлиг (паводок); весняне танення снігу.

Наслідки повеней залежать від їх масштабу. Розрізняють маловодні, середньоводні, повноводні та катастрофічні повені.

Маловодні повені відбуваються на рівнинних руслах приблизно раз на 5-10 років. Вони затоплюють менше 10% сільськогосподарських угідь, завдають незначних збитків і не порушують плани людей.

Середньоводні повені трапляються в річкових долинах приблизно раз на 20-25 років. Вони затоплюють 10-15% сільськогосподарських угідь, завдають відчутної моральної та матеріальної шкоди, що призводить до часткової евакуації жителів.

Повноводні повені відбуваються в річкових басейнах приблизно раз на 50-100 років. Вони затоплюють 50-70% сільськогосподарських угідь, завдають великої матеріальної та моральної шкоди, що призводить до масової евакуації жителів та матеріальних цінностей.

Катастрофічні повені охоплюють одну або кілька річкових систем і трапляються раз на 100-200 років. Вони затоплюють понад 70% сільськогосподарських угідь, завдають величезних матеріальних збитків і призводять до загибелі людей.

Затоплення комунікацій, будівель, сільськогосподарських угідь, природно-територіальних комплексів через течію та вплив води має серйозні негативні наслідки для цих об'єктів. Під час повені гинуть тварини і люди, руйнуються будівлі та комунікації, втрачаються культурні та матеріальні цінності, зупиняється господарська діяльність, гине врожай, знищуються родючі ґрунти, деформується ландшафт.

Вторинні наслідки повені пов'язані з втратою міцності споруд через розмив або підмив, переміщенням водою шкідливих речовин із пошкоджених сховищ і забрудненням ними великих територій.

1.1.1 Класифікація природних надзвичайних ситуацій

Класифікація природних надзвичайних ситуацій визначає різні типи природних явищ або подій, які можуть мати значний вплив на людей, інфраструктуру та навколишнє середовище. Ця класифікація дозволяє систематизувати ризики та вживати відповідні заходи захисту та запобігання (рис.1.1) [13].

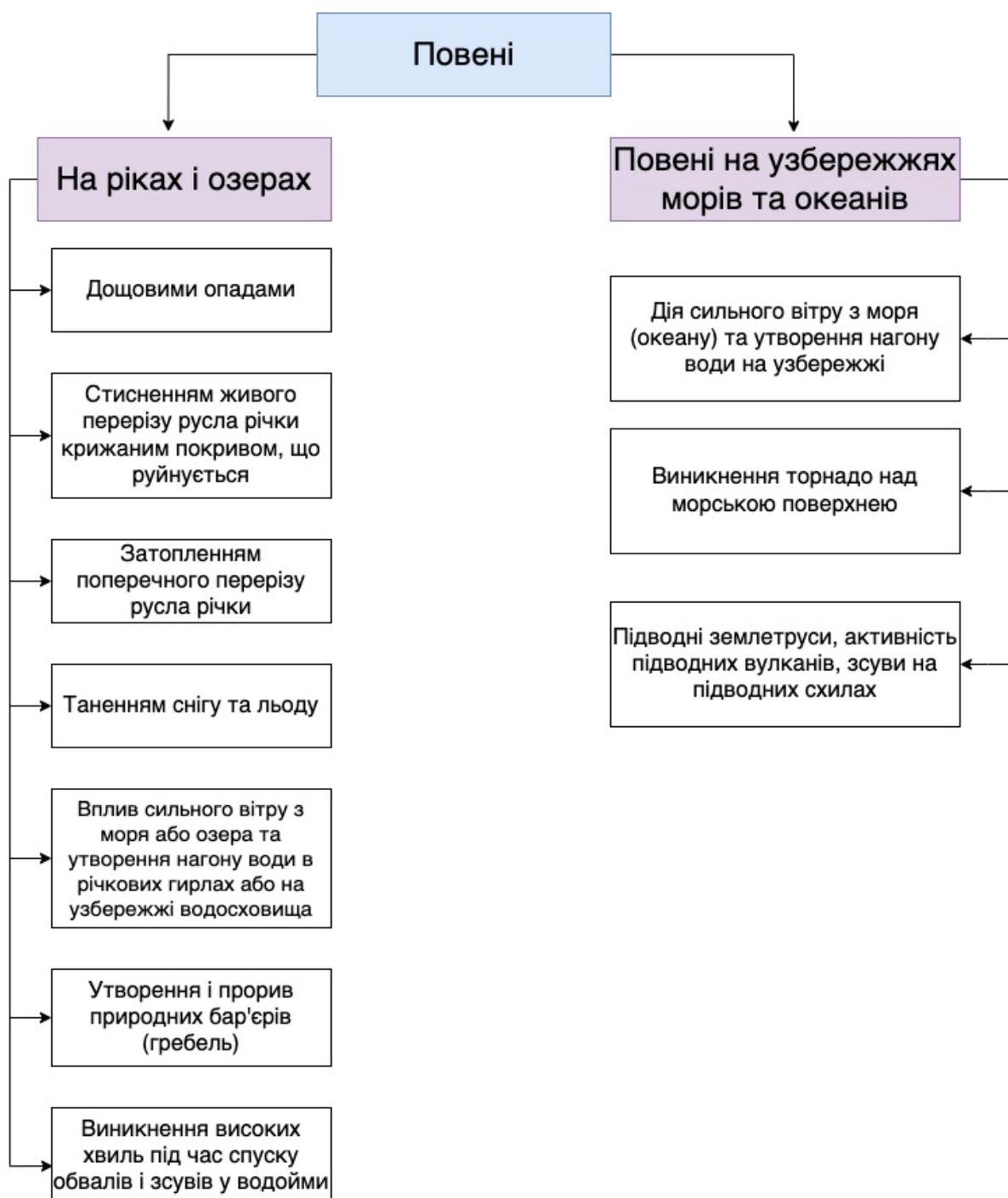


Рисунок 1.1 – Класифікація природних причин повеней [13, 16]

Основні типи класифікації природних надзвичайних ситуацій включають такі [13,16]:

– метеорологічні надзвичайні ситуації: урагани, тайфуни, зливи, снігопади, град, грози та інші атмосферні явища, які можуть призвести до повеней, затоплень, обвалів, а також порушити електропостачання та транспортні зв'язки;

– геологічні надзвичайні ситуації: землетруси, вулканічна активність, сейсмічні явища, які можуть спричинити зсуви ґрунту, коливання ґрунтової поверхні, а також загрожувати зруйнуванням будівель та інфраструктури;

– гідрологічні надзвичайні ситуації: повені, смерчі, шторми на морі, припливи та інші водні явища, які можуть призвести до затоплень, підтоплень, втрат врожаю та інфраструктурних зруйнувань;

– біологічні надзвичайні ситуації: епідемії, пандемії, масове поширення хвороб серед людей, тварин або рослин, що може мати серйозний вплив на громадське здоров'я та економіку;

– астрономічні надзвичайні ситуації: метеоритні удари, сонячні вибухи, геомагнітні бури та інші космічні явища, які можуть мати великий вплив на атмосферу та технологічні системи.

У подальшому дослідженні основна увага зосереджена на аналізі гідрологічних та метеорологічних надзвичайних ситуацій, оскільки саме ці типи мають безпосередній вплив на формування та розвиток затоплень територій.

1.1.2 Класифікація антропогенних надзвичайних ситуацій

Антропогенна надзвичайна ситуація це стан, при якому через виникнення джерела техногенної небезпеки на об'єкті, визначеній території або в акваторії, порушуються звичні умови життя і діяльності людей. Внаслідок цього виникає загроза для їхнього життя та здоров'я, завдається шкода майну населення, національному господарству та навколишньому природному середовищу.

Антропогенна надзвичайна ситуація затоплення територій є результатом різноманітних технічних або аварійних подій, що призводять до раптового підняття рівня води у великих водоймах, таких як річки, озера, водосховища або моря.

Несправність або аварійна ситуація на греблях або дамбах може призвести до їх прориву або зруйнування. Це може статися через недоліки в конструкції, природні катастрофи (наприклад, землетруси або повені), некоректне управління водосховищами або намірені дії для зниження рівня води, що може викликати несподіване вивільнення великої кількості води.

Намірене випускання великої кількості води з водосховищ або інших водних споруд може бути необхідним для регулювання рівня води, забезпечення енергетичних потреб або інших господарських цілей. Недостатня оцінка ризиків або неправильне керування процесами може призвести до техногенних надзвичайних ситуацій.

Вищеописані ситуації можуть мати серйозні наслідки, включаючи евакуацію населення, значні матеріальні збитки, втрати людських життів, руйнування інфраструктури та негативний вплив на природне середовище. Ефективне управління ризиками, адекватне попередження і швидке реагування в таких ситуаціях є критичними для забезпечення безпеки та захисту населення і інфраструктури.

Виникнення повеней на ріках антропогенного характеру може бути спричинене різними технічними і аварійними подіями [13, 12]:

- несправність або аварійна ситуація на греблях або дамбах може призвести до їхнього прориву або руйнування через недоліки в конструкції, природні катастрофи (наприклад, землетрус або повінь), некоректне управління водосховищами або навмисні дії для зниження рівня води, що може спричинити несподіване вивільнення великої кількості води;

- аварії на транспортних засобах, що перевозять воду або її компоненти (наприклад, хімічні речовини), можуть призвести до витoku води

в навколишнє середовище або в річкові водойми. Це може статися через перекидання транспортних засобів або пошкодження трубопроводів;

- навмисний випуск великої кількості води з водосховищ або інших водних споруд може бути необхідним для регулювання рівня води або забезпечення енергетичних потреб. Недостатня оцінка ризиків або неправильне управління процесами може призвести до надзвичайних ситуацій (НС) зі змішанням води на прилеглі території;

- утворення тимчасових водойм або проблеми з їхнім відведенням можуть виникнути через недостатню пропускну спроможність труб, дюкерів та акведуків, які використовуються для відведення стоку від залізничних та автомобільних доріг або інших будівельних об'єктів;

Затоплення морів антропогенного характеру можуть бути спричинені різними технічними або аварійними подіями, зокрема [13]:

- вибухи ядерних пристроїв на дні морів можуть призвести до формування великих хвиль цунамі. Ці цунамі можуть мати надзвичайно високі хвилі, які здатні затопити узбережжя і великі території, що прилягають до моря;

- несанкціоноване випуск великих об'ємів різних речовин, зокрема хімічних речовин або інших небезпечних матеріалів, може призвести до хімічного забруднення морських вод і спричинити великі екологічні катастрофи. Це може також вплинути на рівень морських вод і створити умови для затоплення берегових зон.

У даній роботі основна увага зосереджена на надзвичайних ситуаціях антропогенного характеру, спричинених аварійними подіями на греблях і дамбах, оскільки ці події мають критичний вплив на виникнення та розвиток затоплень територій.

1.2 Аналіз причин та наслідків затоплення територій у світі

За останні двадцять років повені стали однією з найсерйозніших загроз для людства. Згідно з даними EM-DAT, однієї з найвідоміших міжнародних

баз даних про катастрофи, було зафіксовано 7348 катастроф по всьому світу. Ці катастрофи призвели до смерті приблизно 1.23 мільйона людей, що складає в середньому 60000 життів на рік, і затронули понад 4 мільярди людей, багато з яких постраждали неодноразово. Економічні збитки від цих катастроф оцінюються приблизно в 2.97 трильйонів доларів США (рис. 1.2) [17].

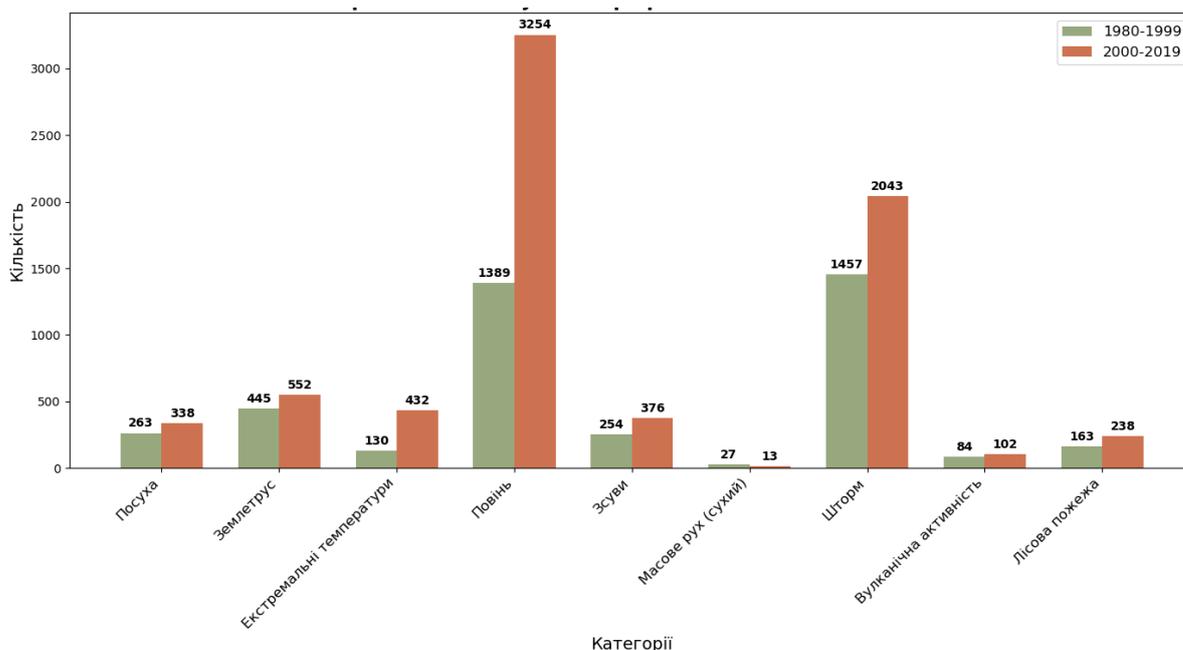


Рисунок 1.2 – Порівняння катастроф в період: з 1980 по 1999 рік та з 2000 по 2019 рік

Порівняно з попередніми двадцятьма роками, кількість зареєстрованих катастроф значно зросла. В період з 1980 по 1999 рік EM-DAT зафіксувала 4,212 катастроф, пов'язаних з природними загрозами, які призвели до смерті близько 1.19 мільйона людей і затронули понад 3 мільярди осіб, призвівши до економічних втрат у розмірі 1.63 трильйона доларів США. За період з 2000 по 2019 рік було зафіксовано 7,348 надзвичайних ситуацій, які призвели до загальної втрати близько 1.2 мільйона життів і затронули понад 4.03 мільярда людей.

В середньому щороку відбувалося 367 катастроф, більшість з яких були повеннями та штормами (44% та 28% відповідно). Найпоширенішим типом

надзвичайних ситуацій у світі є повені, які становлять 44% від загальної кількості подій (рис. 1.3). За останні два десятиліття Китай став найбільш постраждалою країною від повеней, що спричинились в середньому 20 разів на рік. Повені в Китаї за цей період затрули приблизно 900 мільйонів людей, що становить близько 55% від усіх постраждалих від повеней у світі. Індія посідає друге місце за кількістю постраждалих від повеней, з середньою кількістю 17 повеней на рік і загальною кількістю постраждалих близько 345 мільйонів людей. Найбільш смертоносними подіями повеней з 2000 по 2019 рік були: повені в Індії у червні 2013 року (6054 загиблих), на Гаїті в травні 2004 року (2665 загиблих) і в Пакистані в липні 2010 року (1985 загиблих). Повені мають найбільший вплив в Азії, де вони становлять 41% усіх повеней і затрули приблизно 1.5 мільярда людей, що є 93% від усіх постраждалих від повеней у світі. Африка (763 повені) та Америка (680 повеней) також мають значний вплив від повеней [18].

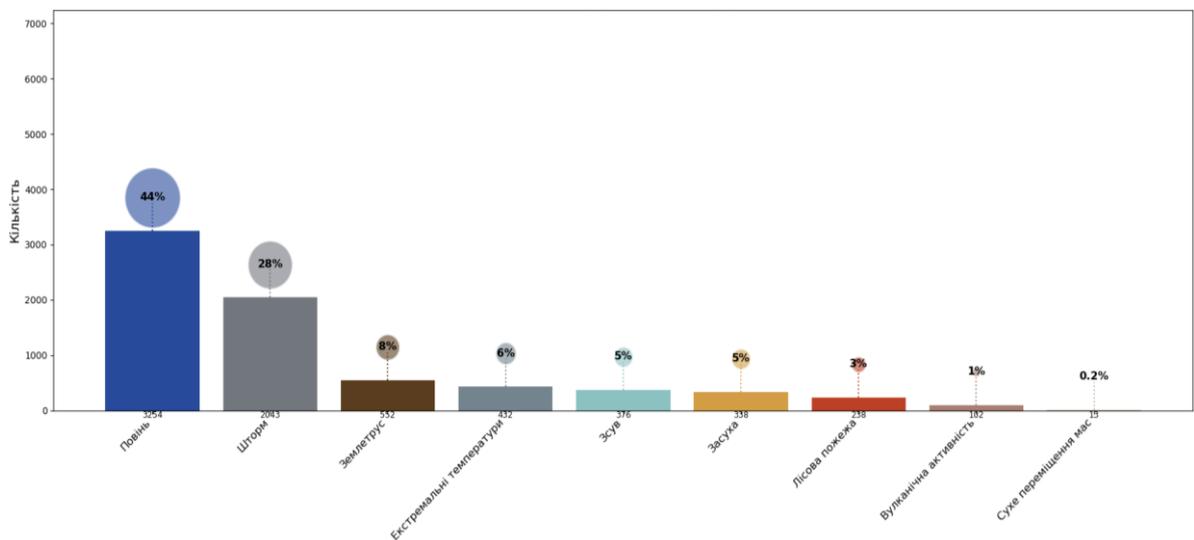


Рисунок 1.3 – Графік розподілу природних катастроф

Повінь представляє собою значне підвищення рівня води в річках, що часто призводить до затоплення прилеглих територій. Це складне явище, яке виникає внаслідок атмосферної циркуляції, сприяючи формуванню специфічних синоптичних умов з інтенсивними зливовими дощами. Це

призводять до значного збільшення опадів за короткий час, що може мати катастрофічні наслідки, особливо на малих річках, де вода швидко збирається в руслах.

Локальні зливові дощі є особливо небезпечними, оскільки вони часто призводять до перевищення пропускнуої здатності річкових русел, що в свою чергу призводить до затоплення територій. Повені є природним явищем, необхідним для еволюції річкових басейнів, однак людська діяльність, зокрема зміни в природних системах і руслах річок, може зробити їх стихійними лихами з негативними наслідками для людей та майна.

На сучасному етапі зростання населення і збільшення потреб в природних ресурсах призводять до того, що суспільство активно втручається в природні процеси, модифікує русла річок і використовує їх для своїх потреб, що також впливає на формування і поширення повеней.

Діяльність людини може змінювати як формування стоку, так і умови його скидання. Очевидно, що діяльність в межах водозбірного басейну, така як сільськогосподарська практика чи урбанізація, впливає на водний режим у басейні. З іншого боку, будівництво на річках та заходи з управління вздовж річкових систем впливають на гідрологічні процеси в самій річковій системі. Оскільки річковий стік, особливо великих річок, має свої специфічні характеристики в різних частинах басейну, ця взаємодія стає важливою для розуміння впливу людської діяльності на водні ресурси. Наслідки антропогенної діяльності [14]:

– природні умови верхньої частини басейну (горбиста місцевість, круті схили, вузькі заплави, неглибокі русла) у поєднанні зі зливовими дощами зумовлюють формування швидкого схилового стоку, що призводить до утворення паводків з великою швидкістю течії та великими витратами води, коротким часом концентрації та поширенням повеневої хвилі. Цей вплив може бути посилено вирубкою лісів або надмірним випасом худоби, що призводить до зменшення водоутримуючої здатності ґрунту або рослинного

покриву, інтенсифікації схилового стоку та формування інтенсивної ерозії ґрунтів;

– у середній частині басейну рельєф менш горбистий, заплава розширюється, тераси стають більш помітними, антропогенна діяльність стає більш видимою. Вирубка лісів, надмірний випас худоби та сільськогосподарська діяльність призводять до інтенсифікації максимального схилового стоку та ерозії ґрунтів. Збільшення кількості та площі населених пунктів призводить до покриття ґрунтів водонепроникними матеріалами, що зменшує здатність рослинності утримувати воду, а також до інфільтрації ґрунту - процесів, які генерують міські паводки з дуже високими витратами і швидкостями та коротким часом концентрації. У разі відсутності ефективної системи відведення дощової води, міські повені спричиняють значні збитки та жертви;

– у нижній частині басейну, яка зазвичай складається з рівнинних ділянок з пологими схилами, заплавою, меандрами та низькою швидкістю течії, спостерігається обмежена здатність до транспортування відкладень зростання процесів замулення. Сільськогосподарська діяльність, що ведеться в заплавах річок, стає вразливою до пловіальних паводків через значне розширення їхніх затоплюваних територій. Посилення процесу урбанізації та низька вартість землі в паводконебезпечних територіях, яка приваблює малозабезпечене населення, зумовлює збільшення вразливості цих населених пунктів до повеней. Поширення паводкової хвилі з верхньої частини басейну в поєднанні з локальними паводками або затопленнями створює умови для формування складних повеней, які, як правило, тривають протягом тривалого періоду - від декількох днів до декількох тижнів. Недостатній стан або відсутність протипаводкових гідротехнічних споруд може призвести до розливу річок і значних економічних та соціальних збитків.

Специфіка процесів формування повеней відрізняється як на рівні басейну, де найбільш руйнівними є комплексні повені, так і за розміром самої річки, що призводить до більш виражених змін характеристик повеней

у басейнах малих річок, потім середніх і значно менше у великих. Однак взаємозв'язок між поведінкою повеней у верхів'ях водозборів і поведінкою повеней у всьому річковому басейні часто є складним і іноді недосконало вивченим [19].

Оцінка антропогенного впливу на режим повеней виконується шляхом аналізу зміни гідрологічних характеристик максимального стоку, які класифікуються за групами:

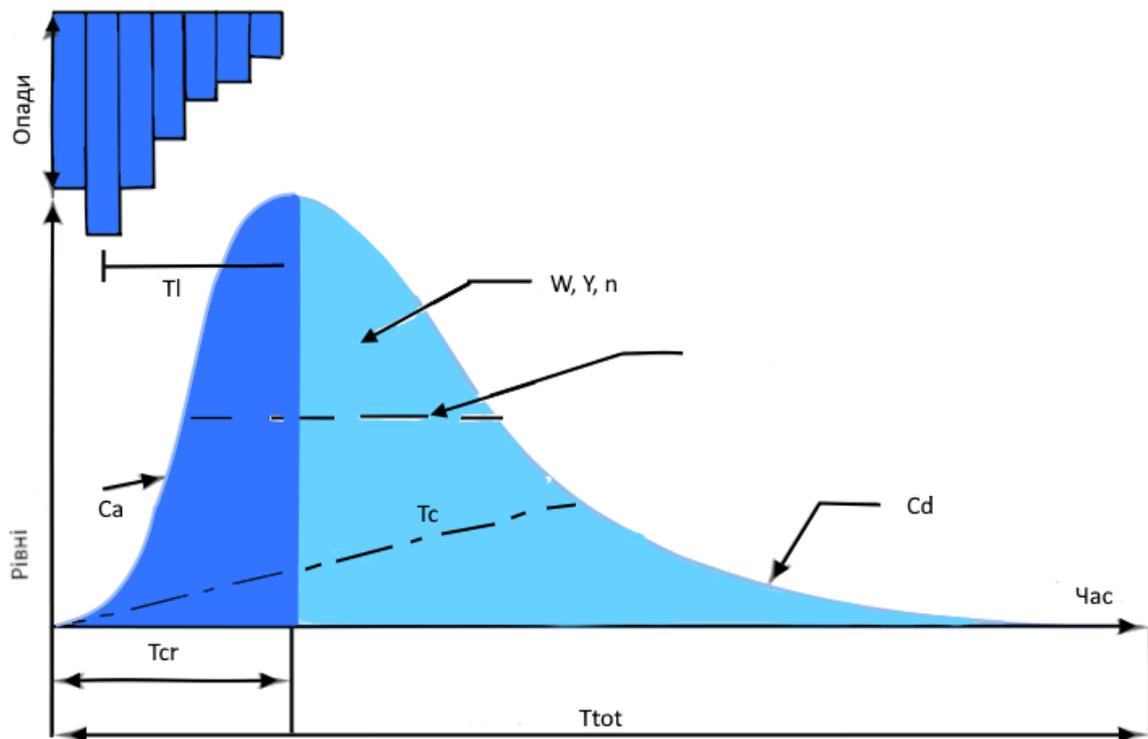
- часовий аспект включає формування пльовіального паводку, який є складним процесом, спричиненим взаємодією різноманітних природних та антропогенних факторів. Результатом цього процесу є паводкова хвиля, що характеризується гідрографом паводку, особливості якого наведені на рисунку 1.4 [19];

- просторовий аспект включає формування пльовіальних паводків, що призводить до затоплення заплавл річок і, в результаті, розширення сільськогосподарських та міських територій в межах цих заплавл. Суспільство внаслідок цього збільшує вразливість власних територій до підтоплення. Таким чином, зростає ризик повеней, що характеризується ймовірністю повені, яка виражена у відношенні часток або відсотків кількості років з сприятливими умовами для виникнення повеней до загальної кількості років у розгляді;

- небезпека повені включає природні та/або антропогенні явища зі специфічними паводковими характеристиками, такими як площа затоплення території, тривалість, глибина води, швидкість розповсюдження паводкової хвилі тощо;

- вразливість до повеней оцінюється як числова характеристика населення, об'єктів інфраструктури та природного середовища, які можуть постраждати внаслідок виникнення повені;

- вразливість до повеней визначається чутливістю громади до повені, що залежить від фізичних, соціальних, економічних та екологічних чинників [20].



Легенда: Q_{\max} - максимальна швидкість течії затоплення, м³/с; Q_{med} - середня швидкість течії затоплення, м³/с; W - об'єм хвилі затоплення, млн. м³; Y - глибина затоплення, мм; n - форма гідрографа хвилі затоплення; T_{cr} - час підйому хвилі; T_l - час спаду в зоні затоплення водоймища; T_c - час утворення хвилі затоплення; T_{tot} - загальна тривалість хвилі з атоплення; Ca - верхній б'єф; Cd - нижній (спадний) б'єф.

Рисунок 1.4 – Модель гідрографу рівня розливу водойми [21]

Згідно з дослідженнями європейських гідрологічних установ [21], зміни режиму повені теоретично можна представити як зміну тренду та напрямку часових рядів максимальних витрат води під впливом антропогенної діяльності. Графічний вплив трьох гіпотетичних факторів на максимальну миттєву витрату води в залежності від площі басейну показано на рис. 1.5, де зазначено, що у випадку звуження заплави (рис. 1.5а) пікові витрати зростають пропорційно до площі басейну; збільшення площі міст зумовлює зростання пікових витрат, особливо в малих басейнах (рис. 1.5 б), а мінливість клімату впливає як на зменшення, так і на збільшення витрат, незалежно від площі басейну.

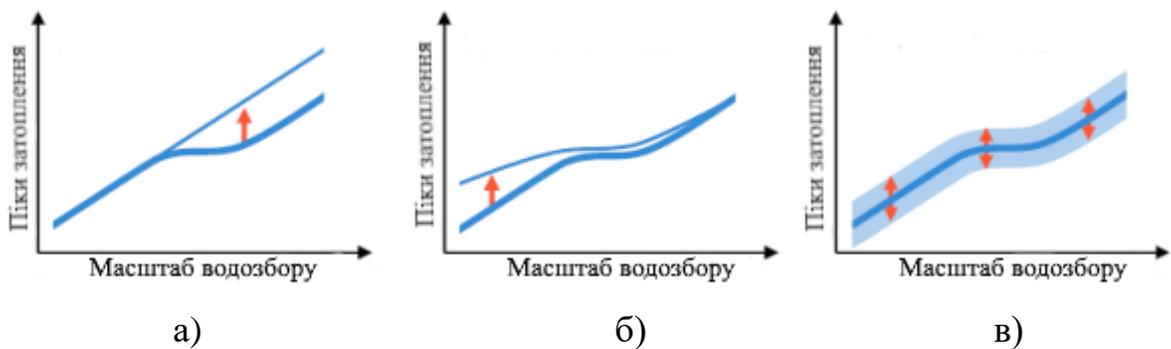


Рисунок 1.5 – Гіпотетичний вплив трьох типів факторів на відносні піки повеней в залежності від масштабу водоймища: а) річка; б) водозбір; в) атмосфера [21]

Зміни пікового стоку під впливом антропогенних факторів оцінюються не тільки в просторовому, але і в часовому розрізі (рис. 1.6). Експлуатація гідротехнічних споруд спричиняє значні помітні зміни режиму максимального стоку (рис. 1.6 а), тоді як зміни у землекористуванні та кліматичних елементах викликають поступову модифікацію тренду річного ходу максимального стоку (рис. 1.6 в).

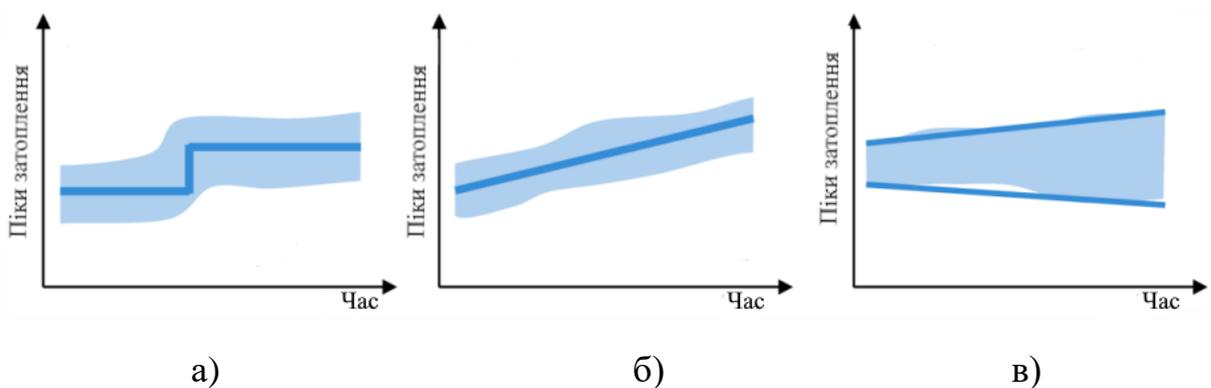


Рисунок 1.6 – Зміни пікових стоків під впливом гідротехнічних споруд: а) змін у землекористуванні; б) збільшення мінливості екстремальних опадів; в) протягом десятиліть або століть [21]

Зміни в підготовці заплави та русла зумовлюють збільшення ймовірності малих та середніх паводків, тоді як робота водосховищ зменшує ймовірність середніх паводків (рис. 1.7).

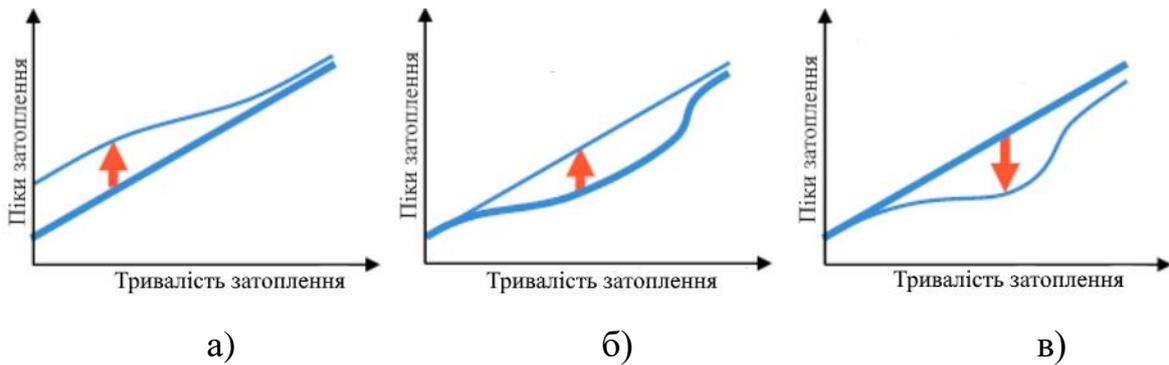


Рисунок 1.7 – Вплив гідротехнічних заходів на криву частоти паводків:
 а) підготовка русла спричиняє збільшення малих паводків; б) видалення
 заплавних накопичувачів збільшує середні паводки; в) будівництво
 водосховищ зменшує середні паводки [21]

Останнім часом соціально-економічний прогрес став важливою рушійною силою в управлінні річковими басейнами та організації територій водосховищ, що призводить до зміни характеристик повеней та паводконебезпечних територій. Наразі взаємозв'язок "суспільство - повінь" розглядається та оцінюється з точки зору пристосованості до проживання людини, з урахуванням взаємозв'язків, що створюють дилеми, такі як "простір для води – простір для людей", "співпраця – конфлікт" [21, 22]. Управління річковими заплавами передбачає формування декількох типів взаємозв'язків у відносинах "людина – річка", які визначаються захисними заходами від руйнівної дії повеней [22]:

- пасивні, без суттєвих втручань у русло та заплаву річки;
- превентивні, коли здійснюються перші заходи захисту від повеней, частково захищаючи майно та сільськогосподарські угіддя від наслідків повеней;
- активні, коли виконуються заходи з облаштування заплави: підготовка річок, берегоукріплення, будівництво дамб тощо. Ці заходи обумовлені зростаючим процесом урбанізації і, відповідно, необхідністю захисту

населених пунктів від повеней та підвищення безпеки життєдіяльності населення.

– комплексні, що включають комплексне облаштування річкових басейнів.

В результаті оцінки процесів формування та поширення повеневих хвиль в умовах антропогенної діяльності встановлено, що до модифікації режиму повеней призводять такі чинники [23]:

– антропогенна діяльність на земній поверхні, такі як сільськогосподарська практика, вирубка лісів, урбанізація тощо;

– діяльність з облаштування заплав, включаючи підготовку русла річки, будівництво водосховищ, дамб, польдерів тощо;

– зміни в кліматичній системі, зокрема варіації та зміни клімату, які спричинені людською діяльністю.

Врахування зазначених чинників є важливим аспектом моделювання повеней та розробки геоінформаційних технологій прогнозування затоплення територій. Антропогенна діяльність на земній поверхні, зокрема сільськогосподарське використання, вирубка лісів та урбанізація, безпосередньо впливає на гідрологічні процеси, змінюючи параметри інфільтрації, поверхневого стоку та водного балансу, що необхідно враховувати при побудові моделей прогнозування. Діяльність з облаштування заплав, включаючи регулювання русла річок, будівництво водосховищ, дамб та польдерів, модифікує природний режим стоку, що потребує інтеграції гідротехнічних споруд у розрахункові моделі для підвищення точності прогнозів. Додатковим фактором є зміни кліматичної системи, зокрема варіації кількості та інтенсивності опадів, підвищення рівня води та збільшення частоти екстремальних погодних явищ, що впливають на параметри моделювання та вимагають адаптації алгоритмів прогнозування до динамічно змінюваних умов. Врахування цих чинників у процесі розробки геоінформаційних технологій прогнозування затоплень є необхідним для

підвищення достовірності оцінки ризиків та ефективного управління наслідками повеней.

1.3 Картографування небезпеки затоплення територій

Карти повеней представляють собою важливий інструмент для оцінки небезпеки затоплень. Існують два основних типи карт: карти небезпеки повеней, що містять інформацію про ймовірність та/або масштаби подій, та карти ризиків повеней, які додають до цього інформацію про наслідки, такі як економічні збитки та кількість постраждалих. Для кожного з цих типів існують різні методи кількісної оцінки, що відображаються на відповідних картах. У випадку карт небезпеки повеней можна використовувати історичні дані про частоту та масштаби минулих повеней. Наприклад, в Ірландії такі дані можуть бути представлені у вигляді точкових подій на карті (див. рис. 1.8 а). З іншого боку, масштаби історичних повеней можуть бути зображені на масштабних картах повеней (див. рис. 1.8 б). За допомогою сучасних знімків дистанційного зондування можна точно визначати масштаби поточних або недавніх повеней, що відкриває нові можливості для калібрування або перевірки моделей повеней, створених за допомогою комп'ютерних моделей [24].

Враховуючи складність управління ризиком затоплень, особливо в умовах змінюваного клімату, використання статистичних та моделюючих інструментів для оцінки небезпеки гіпотетичних повеней стає важливим завданням. Оцінка параметрів, таких як площа затоплення, глибина води, швидкість потоку, тривалість затоплення, поширення паводкової хвилі та швидкість підйому води, дозволяє краще розуміти потенційні загрози та ефективніше планувати заходи управління кризовими ситуаціями, включаючи евакуацію та захист населення.

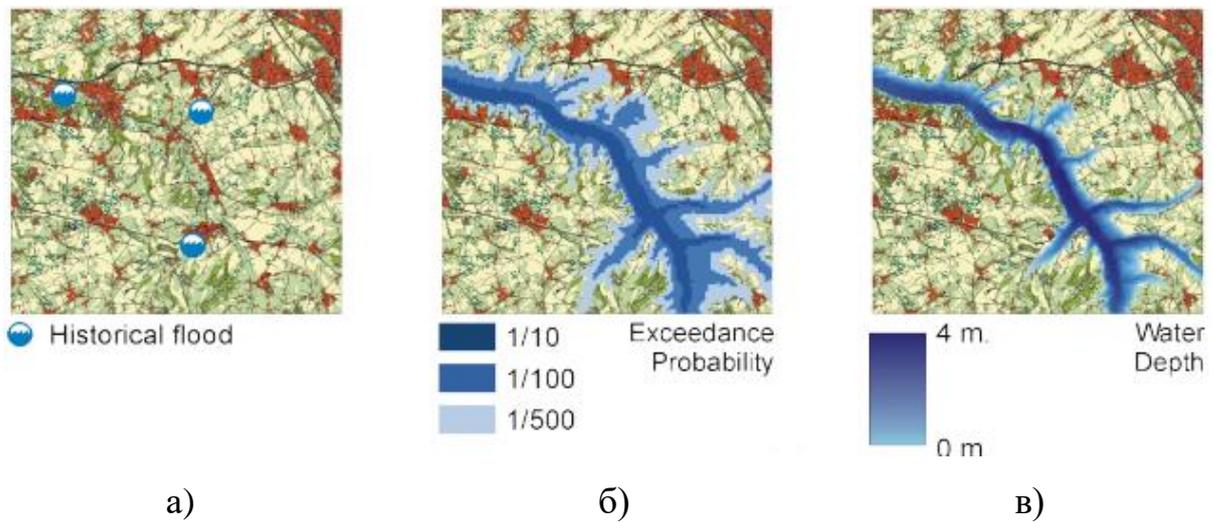


Рисунок 1.8 – Типи карт повеней: а) історична карта повеней; б) карта масштабу повені; в) карта глибини повені [24]

Наступним кроком у процесі створення карт повеней є перетворення цих скидів на водні рівні. Це зазвичай виконується за допомогою кривих номінальних витрат або ступінчастих витрат. Альтернативно, для визначення водних рівнів можуть використовуватись одновимірні або двовимірні гідродинамічні моделі. Останні особливо корисні для складних гідравлічних ділянок, таких як річкові злиття, польдери або дренажні системи, які зазнали значних змін через втручання людини. Гідродинамічні моделі дозволяють враховувати додаткові параметри повені, такі як швидкість потоку, поширення, тривалість і швидкість підйому води. Для двовимірного гідродинамічного моделювання необхідна додаткова інформація, наприклад, характеристики паводкової хвилі (тривалість, пік).

На третьому етапі визначається площа затоплення (і, можливо, глибина затоплення) шляхом поєднання рівнів води з цифровою моделлю рельєфу (ЦМР), що дозволяє створити карту затоплення, що відображає протяжність або глибину затоплення. У двовимірних гідродинамічних моделях ця ЦМР вже враховується, спрощуючи процес виконання цього третього кроку.

Як і в усіх методах, що використовують широкий спектр даних, розрахунків та/або моделей, невизначеності в даних і етапах їх обробки

накопичуються в кінцевому результаті. Основними джерелами невизначеності при картографуванні небезпеки повеней є статистичне визначення екстремальних подій на основі відносно коротких часових рядів, просторова екстраполяція даних (коли вона використовується), ЦМР, а також наявність та/або несправність захисних споруд. Зокрема, роздільна здатність ЦМР, хоч і значно покращилась за останні десятиліття, і все ж залишається недостатньою для правильного розпізнавання дамб або інших захисних споруд в національному масштабі. При використанні ЦМР з високою роздільною здатністю, наявність віадуків або інших лінійних споруд над землею може бути помилково інтерпретована як протипаводкові бар'єри, хоча вони насправді не зупиняють воду.

1.3.1 Карти масштабів затоплення територій

Карти масштабів затоплення є одними з найпоширеніших форм карт небезпеки повеней (див. рис. 1.8 б). Ці карти відображають затоплені території в результаті певної повені. Такі картографічні продукти можуть охоплювати як історичні, так і гіпотетичні події з певним періодом повторення, наприклад, раз на 100 років, що часто позначається як HQ100. На цих картах можна відобразити масштаби окремої повені або декількох подій, а також представити масштаби історичних повеней. Так як протяжність повені легко відображається, картографічні матеріали можуть бути доповнені точковою інформацією про інші параметри повені, такі як глибина води або швидкість потоку в конкретних точках. Крім того, на карті можуть бути показані важливі об'єкти, що піддаються впливу повені, такі як лікарні, електростанції та інші інфраструктурні об'єкти. Ці карти є важливим інструментом для оцінки ризиків повеней, а також для розробки стратегій управління повеневими ризиками, планування евакуаційних маршрутів та інших заходів наведення в повеневому режимі [25].

1.3.2 Карты глибини затоплення

Карты глибини затоплення є важливим інструментом для візуалізації та оцінки небезпеки повеней. Після того, як визначена протяжність повені для певних періодів повернення, можна розрахувати та візуалізувати глибину затоплення. Ця інформація представляється на карті глибини затоплення, де відображається глибина води в різних точках затопленої території.

Існують також картографічні продукти, що показують глибину води на територіях, де затоплення відбувається внаслідок руйнування споруд, наприклад, польдерних зон. У таких випадках важко розрахувати точну протяжність і глибину затоплення для конкретного часового періоду через невідоме місце прориву, тому часто використовуються сценарії. Результати таких сценаріїв можуть бути об'єднані на одній карті, щоб показати максимальну або середню глибину затоплення на піксель, що часто практикується, наприклад, в Нідерландах [24].

1.3.3 Карты додаткових характеристик затоплення територій

Крім карт глибини затоплення, існують і інші картографічні продукти, які відображають інші параметри повені, такі як швидкість підйому води, швидкість течії, тривалість та поширення повені. Наприклад, у Фландрії можуть існувати карти, що показують швидкість підйому води, в Австрії та Люксембурзі – швидкість течії, а в Угорщині та Нідерландах – карті поширення польдерів, що затоплюються. Кожна така карта зазвичай відноситься до одного часового періоду, оскільки представлення параметрів різних періодів на одній карті може бути складним завданням через їхню варіабельність.

1.3.4 Карты небезпеки затоплення територій

Карты повеней зазвичай відображають лише один з декількох параметрів повені, але в деяких випадках інформація про глибину повені для

певного часового періоду додається до карти масштабу повені. Для того, щоб отримати уявлення про загальну небезпеку повеней, параметри можуть бути об'єднані в якісні класи, що призводить до створення так званої карти небезпеки повеней (рис. 1.9 а). Це зазвичай виконується за допомогою матриць або формул, які пов'язують різні параметри повені у єдиний показник "небезпеки". У таких матрицях використовуються дві осі для зв'язку параметрів повені (наприклад, глибина, швидкість, період повернення), іноді застосовується групований параметр (наприклад, "інтенсивність", яка використовується у Рейнланд-Пфальці, поєднує глибину води і швидкість потоку), у якісні категорії небезпеки (наприклад, у Швейцарії, Валлонії, Рейнланд-Пфальц).

1.3.5 Карты ризиків затоплення територій

Поєднання інформації про наслідки повені з даними про небезпеку дозволяє створити карти ризиків. Оскільки більшість показників вразливості та здатності до подолання наслідків повеней є якісними, це призводить до створення якісних карт ризиків (рис. 1.9 б).

В результаті використання широкого спектру наявних індикаторів повеней (як для небезпеки, так і для наслідків), існує багато різних типів карт повеней. Вони часто не є порівнянними (особливо у випадку якісних карт), оскільки ґрунтуються на різних підходах (рис. 1.9 в). Наприклад, карти ризиків повеней не слід вважати такими ж однорідними, як карти небезпеки повеней (наприклад, масштабу або глибини повені) через велику кількість індикаторів, доступних для оцінки наслідків повені, порівняно з відносно невеликою кількістю індикаторів для оцінки небезпеки повені. У багатьох випадках індикатори, що використовуються, і тип створеної карти ризику повеней залежать від питання, яке необхідно вирішити, наприклад, для страхових компаній важливим є страховий збиток, а для планування евакуації - щільність населення та інші аспекти [24].

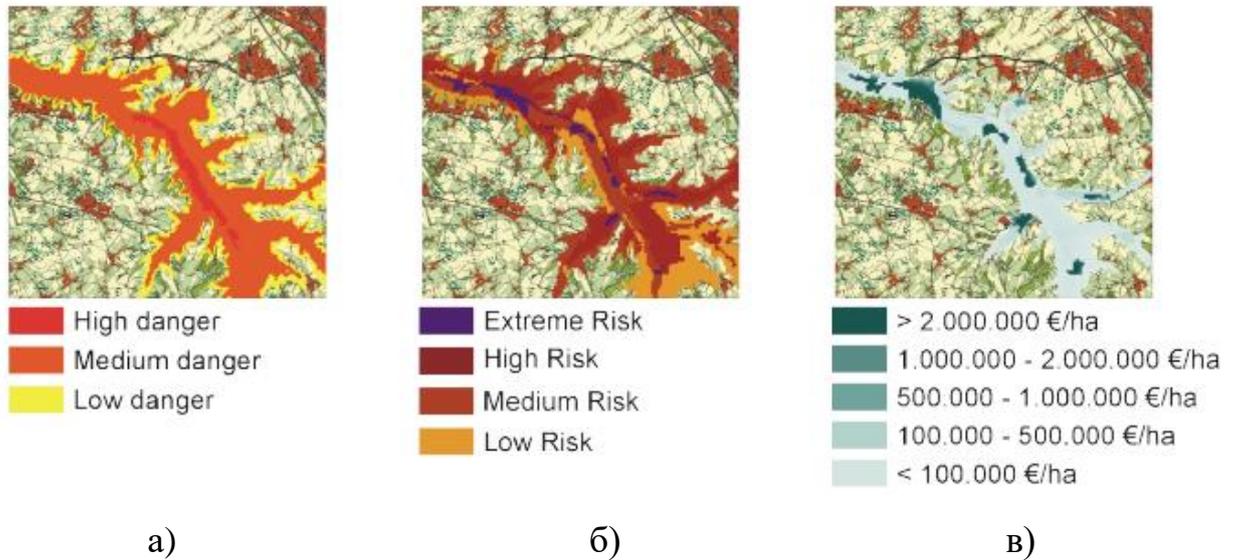


Рисунок 1.9 – Типи карт повеней: а) небезпеки підтоплення; б) ризику повені; в) збитків, руйнувань [24]

1.3.6 Використання карт повеней урядами країн

Карти повеней знаходять широке застосування урядами для різних цілей, зокрема для планування на випадок надзвичайних ситуацій, наприклад, евакуації, а також для просторового планування. У територіальному плануванні розрізняють країни, де карти повеней використовуються в консультативних цілях, та ті, де існує обов'язкове законодавство щодо використання інформації про небезпеку або ризик повеней. Зони затоплення (або зони ризику) можуть служити інформативним інструментом для осіб, які приймають рішення, як у Норвегії та Швеції. У Фінляндії та Великобританії існують законодавчі зобов'язання враховувати зони затоплення в процесі планування, але це не завжди призводить до повного заборони будови.

У Франції, Польщі та в останній час у Німеччині існує обов'язкове законодавство, яке обмежує або забороняє будову на зонах, схильних до повеней. Проте, практичне застосування цього законодавства часто не гарантує ефективного управління ризиками повеней. У Німеччині це ускладнюється децентралізованою структурою, коли різні організації повинні

співпрацювати між собою. У Франції місцеві органи влади можуть мають схильність недооцінювати небезпечні зони через можливість державної компенсації збитків, а в Польщі муніципалітети часто не дотримуються правил з фінансових міркувань, навіть при наявності відповідного законодавства. У Іспанії та Швейцарії регіональні органи влади мають можливість самостійно вирішувати, наскільки суворо включати зони затоплення до своєї політики просторового планування. У Швейцарії центральний уряд надає рекомендації, які зазвичай дотримуються регіональними органами влади щодо зон затоплення територій.

Крім планування, карти повеней також використовуються для підвищення обізнаності громадськості про повені. У 12 з розглянутих країн карти повеней доступні в Інтернеті для широкої громадськості, іноді з можливістю пошуку за адресою. Це часто входить у національні кампанії з підготовки мешканців до повеней, наприклад, в Ірландії та Великобританії. Використання історичної інформації про повені є особливо цінним, оскільки історичні повені дозволяють краще зрозуміти можливі наслідки реальних подій. У Бельгії карти повеней є основою обов'язкової схеми страхування від повеней, де у певних зонах необхідно сплачувати вищі страхові внески або може бути відмовлено у страхуванні. Нарешті, карти повеней часто використовуються для управління водними ресурсами, оцінки повеней та полегшення роботи страхової індустрії [25].

1.4 Технології супутникового моніторингу

Міські повені є особливим типом повеней, що відрізняється від повеней у сільській місцевості. Урбанізація чинить негативний вплив на гідрологічні процеси, збільшуючи ризик повеней та завдаючи значних збитків [26]. Підтоплення міст може статися внаслідок сильних дощів, виходу річок з берегів, а також припливів і штормових нагонів. Великі площі непроникних поверхонь у містах значно знижують здатність місцевих

ландшафтів поглинати, зберігати, інфільтрувати та затримувати дощову воду, посилюючи міський стік і збільшуючи піки повеней [27]. Крім того, підтоплення міст має серйозні економічні та людські наслідки, що потребує більшої уваги в контексті картографування та управління катастрофічними повенями. Космічне дистанційне зондування надає цінну інформацію і є надійним способом для моніторингу катастроф, пов'язаних з повенями, завдяки зростаючій просторово-часовій роздільній здатності і варіативності даних від різноманітних супутникових датчиків (рис. 1.10) [28].

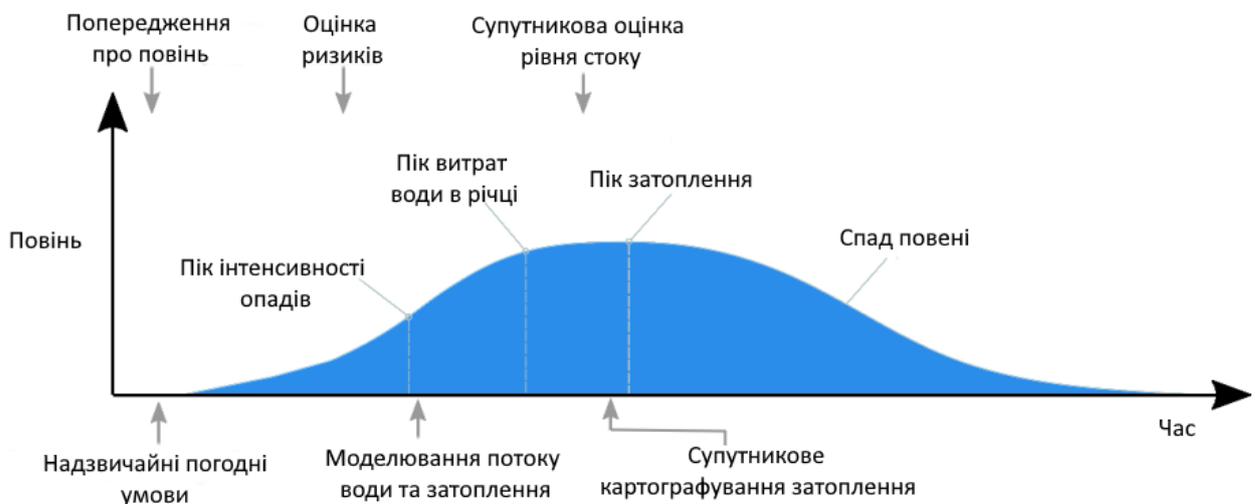


Рисунок 1.10 – Оцінка та моніторинг повеней за допомогою супутникових технологій [28]

1.4.1 Оптичні супутникові дані

Оптичні супутникові дані є одним із найбільш поширених засобів дистанційного зондування для моніторингу затоплень територій. Вони надають високоточні знімки, які можуть бути використані для ідентифікації затоплених територій, аналізу змін ландшафту та оцінки впливу повеней. Використання оптичних даних зосереджене на спостереженнях, які здійснюються в видимому, ближньому інфрачервоному та середньому інфрачервоному діапазонах спектра, що надає цінну інформацію про поверхню Землі та зміни в ній.

Оптичні дані мають значні переваги, серед яких висока роздільна здатність, що дозволяє деталізувати затоплені території, а також багатоспектральна інформація, яка сприяє аналізу різних аспектів поверхні, включаючи стан рослинності та вологість ґрунту. Глобальна система картографування повеней NASA забезпечує дані з роздільною здатністю приблизно 250 м і щоденним оновленням, що базується на спостереженнях приладу MODIS на борту супутників Terra та Aqua [29]. Крім того, оптичні датчики середньої роздільної здатності (наприклад, Landsat Thematic Mapper), високої роздільної здатності (наприклад, Sentinel-2) та дуже високої роздільної здатності (наприклад, IKONOS, WorldView-2) широко використовуються для картографування повеней у менших масштабах [30, 31].

Проте, використання оптичних даних має певні обмеження. Основною проблемою є залежність від метеорологічних умов, зокрема від хмарності, яка може значно ускладнювати отримання якісних зображень під час повеней. Крім того, оптичні сенсори обмежені у здатності проникати крізь густий рослинний покрив, що ускладнює виявлення затоплених ділянок під лісовими насадженнями та іншою рослинністю.

1.4.2 Картографування затоплень територій на основі оптичних супутникових даних

Інтерпретація оптичних зображень для виявлення затоплень виконується за допомогою стандартизованих індексів. За останні два десятиліття спектральні індекси активно використовуються для відокремлення водних пікселів від пікселів, що не містять води, в оптичному дистанційному зондуванні. Найчастіше застосовуються індекси NDWI та MNDWI.

Індекс нормалізованої різниці води (*NDWI*) розраховується за формулою [32]:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1.1)$$

де *Green* відбиття в зеленому діапазоні спектра, *NIR* відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні спектра. Водні поверхні зазвичай мають позитивні значення *NDWI*, тоді як інші типи земного покриття, такі як рослинність і ґрунт, показують негативні значення.

Модифікований індекс нормалізованої різниці води (*MNDWI*) розраховується за формулою [33]:

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR}, \quad (1.2)$$

де *MIR* відбиття в середньому інфрачервоному діапазоні спектра. *MNDWI* покращує ідентифікацію водних поверхонь в урбанізованих територіях, де індекс *NDWI* може бути менш точним.

Індекс *NDWI* застосовується до зображень, отриманих у ближньому інфрачервоному (*NIR*) діапазоні спектра, тоді як індекс *MNDWI* застосовується до зображень у середньому інфрачервоному (*MIR*) діапазоні спектра. Обидва індекси дотримуються одного принципу: відбиття води в *NIR* або *MIR* приблизно дорівнює нулю, тоді як інші типи земного покриття показують високе відбиття в цих діапазонах. Нормалізоване відношення відбиття зеленого та інфрачервоного діапазонів представляє водну поверхню як позитивне значення (в діапазоні від 0 до +1), а інші типи земного покриття – як негативне значення (від 0 до -1).

Втім, автором в роботі [32] встановлено, що застосування індексу *NDWI* на урбанізованих територіях не завжди відповідає вищезазначеним передумовам. Доведено, що відбиття урбанізованих територій може бути подібним до відбиття води. В урбанізованих територіях коефіцієнт відбиття в зеленому діапазоні може бути вищим, ніж у *NIR*, навіть якщо коефіцієнт відбиття в інфрачервоній області не дорівнює нулю, як у води. Низький коефіцієнт відбиття в інфрачервоній області забудованих територій також може призводити до позитивних значень. Отже, при ідентифікації затоплених

територій об'єкти забудови можуть вносити шум у результати класифікації, що ускладнює точне визначення затоплених зон. Таким чином, визначення ступеня затоплення за допомогою індексу *NDWI* на урбанізованій території може призвести до того, що низькі додатні значення будуть класифіковані як забудовані, тоді як вищі додатні значення – як затоплені або водні поверхні.

Використання індексів *NDWI* та *MNDWI* є ефективним інструментом для виявлення водних поверхонь та оцінки затоплення територій. Але, для підвищення точності класифікації, особливо на урбанізованих територіях, необхідно комбінувати ці індекси з іншими методами аналізу, такими як машинне навчання або використовувати радарні дані, для отримання більш точних та надійних результатів.

1.4.3 Картографування теплових аномалій на основі аналізу оптичних супутникових знімків

Врахування теплових характеристик поверхні є ключовим аспектом при оцінці змін водного балансу, випаровування, зволоженості ґрунту та інших факторів, що впливають на процеси формування та поширення затоплень територій. Антропогенне перетворення природного ландшафту на штучне середовище спричинило суттєві зміни у структурі екосистем, зокрема в термічних властивостях поверхні, таких як теплоємність, теплопровідність та радіаційний баланс [34]. Це зумовлює зміну процесів теплообміну між урбанізованими територіями та навколишнім середовищем, що, у свою чергу, впливає на місцеві кліматичні умови, зокрема інтенсивність опадів та випаровування.

Оптичні супутникові знімки, що містять інформацію про температуру поверхні землі (Land Surface Temperature, LST), є важливим інструментом для моніторингу теплових аномалій та аналізу їхнього впливу на гідрологічні процеси. Карти LST забезпечують детальне просторове охоплення, що значно доповнює точкові вимірювання температури повітря, отримані з

метеорологічних станцій. У зв'язку з цим у сучасних наукових дослідженнях спостерігається зростаючий інтерес до аналізу просторово-часових характеристик міських теплових аномалій, зокрема явища міських островів тепла (Urban Heat Islands, UHI), яке є важливим фактором при оцінці ризиків підтоплення територій. «Міські острови тепла» виникають, коли міста замінюють природний покрив землі щільними концентраціями тротуарів, будівель та інших поверхонь, які поглинають і утримують тепло. Цей ефект збільшує витрати на енергію (наприклад, на кондиціонування повітря), рівень забруднення повітря, а також захворювання та смертність, пов'язані зі спекою. Так, наприклад, темні поверхні (низьке альbedo) поглинають більше енергії від сонячного світла, ніж від відбиваючої поверхні (високе альbedo). Потім ця поглинена енергія з часом виділяється у вигляді теплової енергії, яку людина може відчутти. Різницю температур між поверхнями з високим і низьким альbedo можна побачити за допомогою інфрачервоної камери.

Пошук і аналіз просторового розподілу міських островів тепла є важливим завданням в сучасних дослідженнях навколишнього середовища. Це дозволить використовувати ефективні методи боротьби і запобігання теплових аномалій.

Останнім часом супутникові зображення почали широко використовуватись для вивчення «Міських островів тепла». Розроблені різноманітні алгоритми для оцінки температури земної поверхні, наприклад, mono-window алгоритм, одноканальний метод, алгоритм split-window [35]. Доведено, що міські температури пов'язані з особливостями поверхні, що характеризуються, наприклад, нормалізованим диференційним вегетаційним індексом (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI). В одному з ранніх досліджень індекс NDVI використаний для оцінки взаємозв'язку між температурою земної поверхні та рослинністю [36]. Пізніше джерела «Міських островів тепла» почали пов'язувати не тільки з термодинамічними властивостями поверхонь, а й з їх формами та геометрією [37].

Дослідження «Міських островів тепла» проводяться по всьому світу [38–40]. В Україні це питання досліджували науковці Б.С. Бусигін, І.М. Гаркуша, Б.В. Шилін, Є.А. Балдін, М.Ю. Грищенко, В.І. Лялько, А.Б. Крилов, В.І. Зацерковний, Н.В. Оберемок, П.О. Березіна та ін. Роботи авторів присвячені основним результатам використання технології створення цифрових карт розподілу температурного поля міста Дніпро (Україна) за даними мультиспектральних сканерів Landsat TM/ETM+ та Terra MODIS. Отримано результати порівняння розподілу температур, одержаних різними методами [41–43].

Моніторинг теплового стану міста базується на використанні різночасових зйомок у інфрачервоному (тепловому) діапазоні електромагнітного спектру. Засобом аналізу, інтерпретації та візуалізації результатів є новітні інформаційні (у тому числі геоінформаційні) та комунікаційні технології, що дозволяють здійснювати складну схему обробки матеріалів – від створення геопорталів і баз даних до представлення і візуалізації результатів у вигляді двомірних і тримірних просторових моделей розподілу температур і кількісної оцінки теплових втрат об'єктів інфраструктури (промислових підприємств, житлових масивів, інженерних мереж).

На рисунку 1.11 представлена схема запропонованої в роботі методики аналізу температурних аномалій та виявлення островів міського тепла на цифрових космічних знімках.

Реалізація методики наступна:

1. Спочатку завантажуюмо набір даних Landsat 8 в програмне середовище QGIS [42].

2. На другому виконується атмосферна корекція даних Landsat 8 на основі розрахунку коефіцієнту відбиття. Коефіцієнт відбиття – це відношення загального випромінювання, відбитого від поверхні, до загального вхідного випромінювання [43]:

$$P_{\lambda} = \frac{(Lsat_{rat} - Lhaze1\%)TT \cdot d^2}{E_{o\lambda} \cdot \cos \theta_s \cdot TAU_v \cdot TAU_z}, \quad (1.3)$$

де $Lsat$ – це спектральне випромінювання для кожного каналу; $Lhaze$ – атмосферне спектральне випромінювання, розсіяне в напрямку датчика; TT – атмосферне пропускання світла від поверхні землі до датчика; TAU_v – 1,0 для Landsat; $TAU_z = \cos \theta_s$; $E_{o\lambda}$ – сонячне спектральне випромінювання поверхні, перпендикулярній до сонячних променів поза атмосферою.

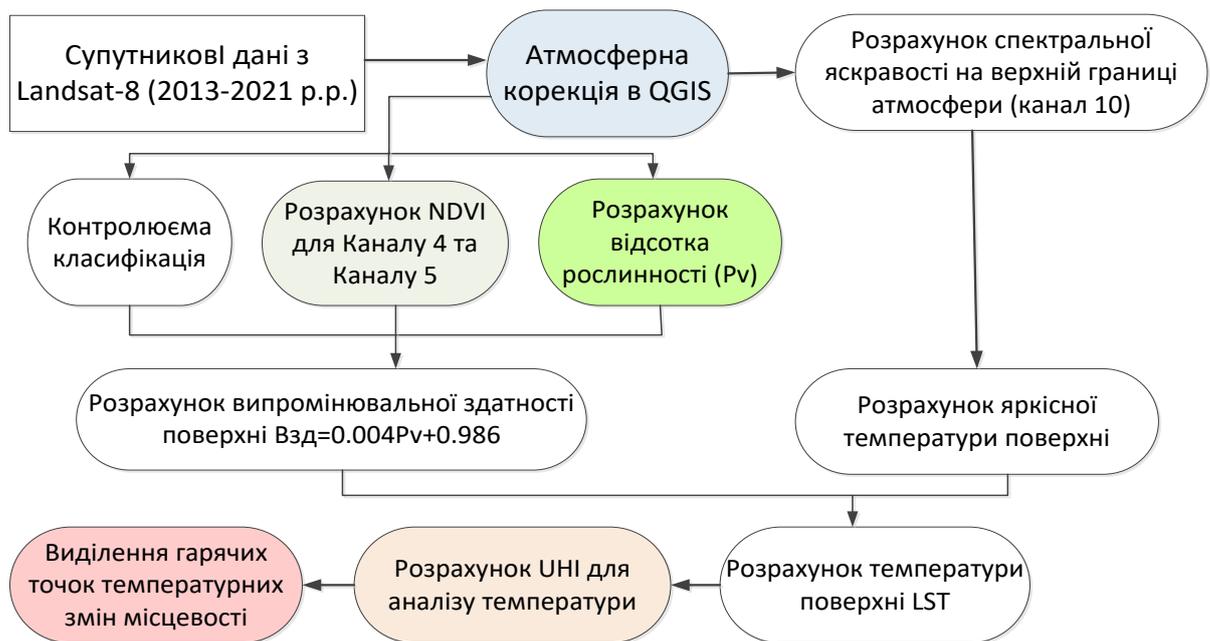


Рисунок 1.11 – Загальна схема методики

3. Наступним етапом є розрахунок параметрів відбивної здатності та спектральної яскравості земної поверхні. Існуючі дослідження відзначають досить високу збіжність отриманих температурних даних для методів розрахунку випромінювальної здатності, заснованих на параметрі $NDVI$ або класифікації поверхні [44]. Остаточний вибір методу залежить від розв’язуваної задачі та її масштабу. У цьому дослідженні було обрано метод, заснований на контрольованій напіваавтоматичній класифікації, завдяки його простоті, зрозумілості та більш точному контролю результату. Після проведеної атмосферної корекції обчислюється $NDVI$ [45].

Далі обчислюється параметр P_v (Proportion of vegetation), який описує відсоток рослинності [37]:

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2. \quad (1.4)$$

Отримуємо випромінювальну здатність поверхні землі (Ground Emissivity, або ми назвали B_3):

$$B_3 = 0,04 * P_v + 0,986, \quad (1.5)$$

$$B_3 = 1,0094 + 0,047 * \ln(NDVI), \quad (1.6)$$

де B_3 – випромінювальна здатність.

4. Для розрахунку температури земної поверхні використовуємо метод, запропонований в роботі [44] на основі використанням 10 каналу космічного знімку Landsat 8, так як 11 канал значно більше схильний до відблисків, засвітів і похибок датчика. Для обчислення яскравих температур поверхні використовується наступне рівняння [45, 46]:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda}\right) + 1} - 273,15, \quad (1.7)$$

де T – яскравість температури у градусах Цельсія; K_1 – калібрувальна константа; K_2 – калібрувальна константа; L_λ – спектральна яскравість на верхній границі атмосфери.

5. На наступному етапі для обчислення температури поверхні знаходимо коефіцієнт LST [45]:

$$LST = \frac{T}{\left(1 + \left(\lambda + \frac{T}{c2}\right) \cdot \ln(e)\right)}, \quad (1.8)$$

де T – яскравість поверхні; λ – довжина хвилі; $c2 = h * c / s$; h – постійна Планка; c – постійна Больцмана; s – швидкість світла.

Далі починаємо процес пошуку ділянок підвищення температур. Дані космічної зйомки використовуються на різних рівнях моделювання або як вхідні параметри для характеристики різних поверхневих покривів або в асиміляційних процедурах, які спрямовані на отримання адекватних

параметри для обчислення LST. Таким чином, використання УНІ дозволяє виділити місця, на яких спостерігаються високі температури:

$$LST > \mu + 0.5 \cdot \delta, \quad (1.9)$$

де μ – просторове середнє арифметичне значення від LST; δ – стандартне відхилення LST.

В результаті виконаної операції (1.7) отримуємо растрове зображення, що показує температуру поверхні землі.

За підсумками цього етапу роботи була формалізована методика розрахунку температур земної поверхні за космічними знімками та створена модель для обробки всіх наборів даних за допомогою модулів `r.mapcalc` та `Graphical Modeler` у `GRASS GIS`. Використано мову `Python` для реалізації запропонованої методики.

Тестування запропонованої в роботі методики проводились на прикладі території міста Дніпро. На рисунку 1.12 а наведено результат LST за 2021 рік; рис.1.10 б – результат УНІ за 2021 рік.

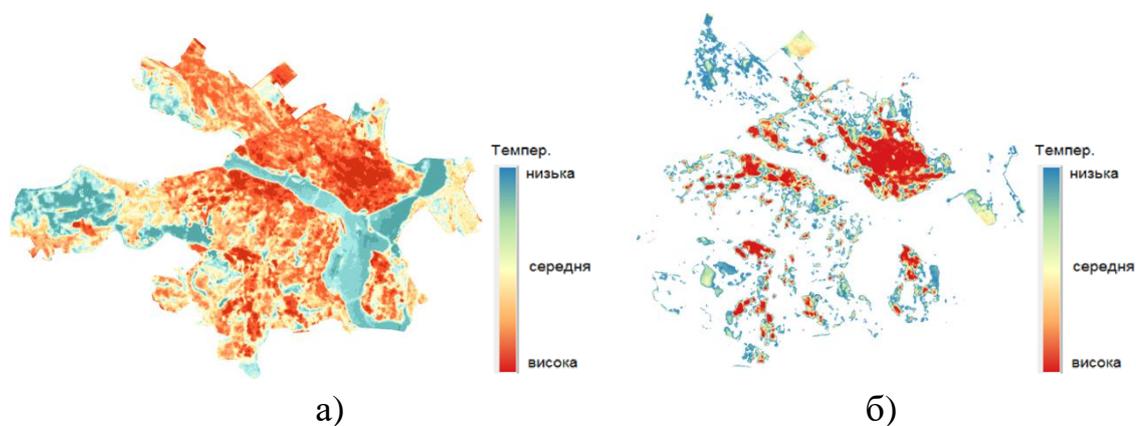


Рисунок 1.12 – Результат застосування методики пошуку та оцінки островів тепла для території м. Дніпро за 2021 рік: а) LST; б) УНІ

На рисунку 1.13а наведено результат теплових змін з 2013 по 2021 рік. При аналізі карти динаміки теплових островів м. Дніпро легко помітити, що більша частина території міста потрапляє в зону аномально підвищеної температури порівняно з оточуючими територіями. Крім того, помітно збільшення островів тепла у період 2019-2020 років (рис. 1.13 б) порівняно з

2013-2018 роками в районах приватного сектору, і навпаки зменшення островів тепла у 2021 році (рис. 1.13 б) в місцях промислової зони. Докладніше розглядаючи період 2013-2015 років видно, що острови тепла розташовані переважно уздовж залізничних колій та в зонах з діючими промисловими підприємствами. Великий вплив має Індустріальний район (НПЗ «Інтерпайп»), район Івана Мазепи, вулиця Макарова, Робоча (Південний машинобудівний завод ім. А.М. Макарова, Дніпровський машинобудівний завод), залізна дорога, теплова електростанція. Це сприяє утворенню островів тепла, особливо в зимові періоди часу. Варто зазначити, що теплові аномалії також розташовані над деякими сільськогосподарськими територіями на північ від міста через сильний нагрів ріллі. Таким чином, теплова карта дозволяє оцінити залежність утворення островів тепла на території Дніпра. Центр міста більше схильний до теплового забруднення через щільну забудову та велику тепловіддачу від споруд.

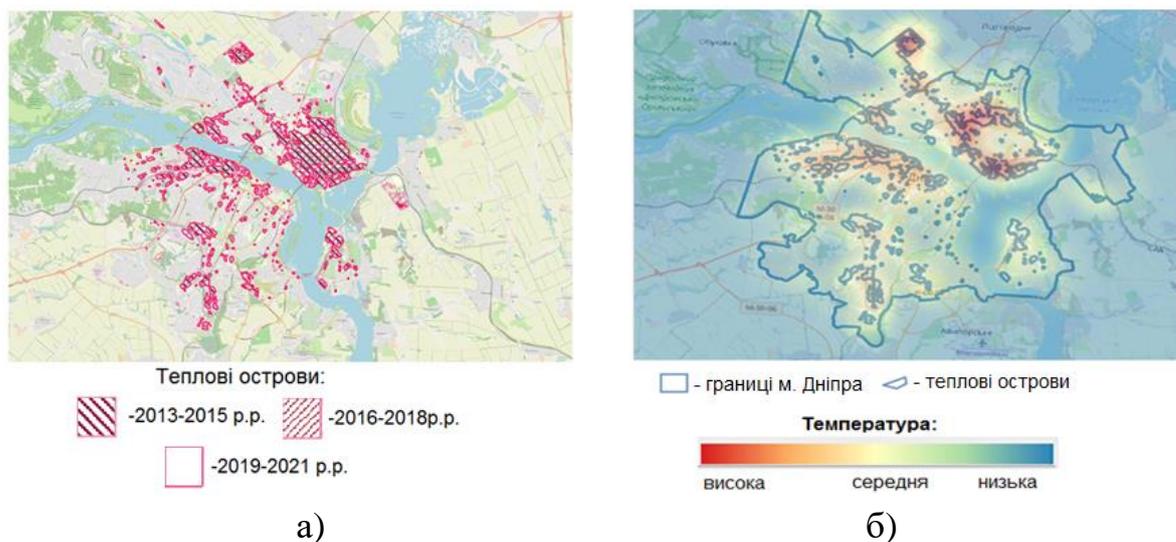


Рисунок 1.13 – Теплові острови м. Дніпро: а) за період за 2013 – 2021 роки; б) за період 2019 – 2021 роки

На рисунку 1.14 наведено гістограму змін температурних показників. Розбиття гістограми яскравісних температур відбувалося за схемою "природні інтервали" (Natural Breaks), у якій границі класів визначаються шляхом угруповання подібних значень і максимально збільшують різницю між

класами. У ході виділення вказаних вище шаблів температур границям класів присвоювалися найближчі цілі значення.

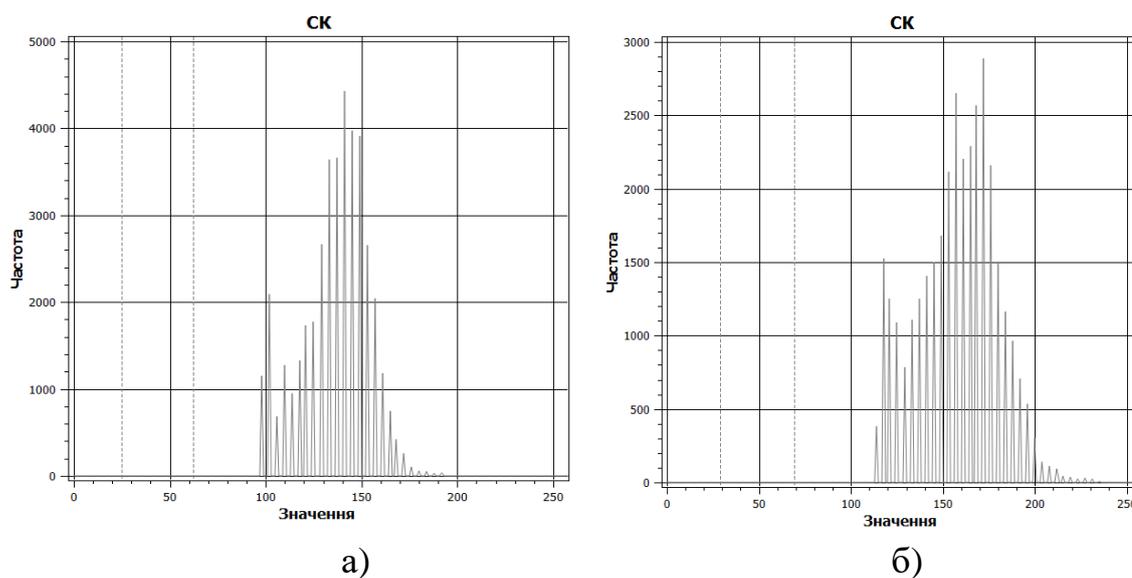


Рисунок 1.14 – Гістограми яскравісних температур: а) 2013 рік; б) 2021 рік

Щоденний аерокосмічний моніторинг теплового стану урбанізованих геотехнічних систем дозволить своєчасно генерувати аварійні попередження, пов'язані з можливим виникненням УНІ. Проведені дослідження показали, що відбувається підвищення температури на ділянках, де рослинний покрив змінюється на непроникні поверхні внаслідок збільшення середнього альбедо. Альбедо залежить від властивостей поверхні землі, причому вкрита рослинністю поверхня має нижче альбедо, ніж забудовані території. Таким чином, альбедо поверхні є важливим параметром дослідження міського теплового острова, що впливає на поверхневу енергію матеріалу. Крім того, характеристики ґрунтового покритву впливають на взаємодію між поверхневим шаром землі і вхідним випромінюванням поверхні. Тому важливо аналізувати як денну, так і нічну температуру поверхні для визначення взаємозв'язку між типом матеріалу та LST. Збільшення щільності забудови збільшує накопичення тепла в міських районах, що призводить до тепліших ночей. Водойми та зелені насадження знижують температуру поверхні та її негативний вплив на навколишнє середовище. Отримані в роботі карти

розподілу температури земної поверхні, вегетаційних індексів і УНІ можуть бути використані у задачах міського планування разом із традиційними джерелами просторової інформації (ортофотопланами, топографічними картами, картами землекористування тощо) для отримання нової інформації щодо поліпшення стійкості міста до хвиль тепла. Дані спостережень за УНІ необхідні для зонування ділянок з різними типами землекористування, наприклад, збільшення кількості відкритого простору і зелені, поліпшення теплового комфорту громадян.

1.5 Огляд ГІС для моніторингу та картографування затоплених територій

Повені визнані одними з найбільш керованих стихійних лих. Останніми роками геоінформаційні системи (ГІС) разом з технологією дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) стали важливим інструментом для моніторингу та картографування повеней. Головна увага цих інструментів зосереджена на підготовці карт затоплених територій.

ГІС є інформаційною системою, призначеною для збору, зберігання, обробки і відображення просторових або географічних даних. Вони відіграють ключову роль у картографуванні повеней та управління стихійними лихами, оскільки природні катастрофи є багатовимірними, а просторовий аспект є невід'ємною складовою цих явищ. ГІС забезпечують не лише візуалізацію повеней, а й інструменти для просторового аналізу, що дозволяє оцінити можливі збитки та ризики для вразливих територій.

Антропогенні впливи, такі як забруднення, зменшення якості води чи перешкоди в доступі до води, є серйозними викликами для управління водними ресурсами. Ці впливи вимагають систематичного аналізу і подолання, щоб забезпечити тривале управління водними ресурсами і зберегти їх якість для майбутніх поколінь.

Дистанційне зондування дозволяє збирати дані про поверхню Землі на відстані за допомогою сенсорів, встановлених на супутниках або літаках. Для обробки, аналізу та візуалізації цих географічних даних застосовуються програмні засоби ГІС [47]. Інтеграція даних дистанційного зондування та ГІС дає змогу створювати моделі повеней, які імітують поведінку води під час затоплень. Такі моделі здійснюють аналіз топографічних, гідрологічних, метеорологічних характеристик та землекористування досліджуваного регіону, використовуючи дані з різноманітних джерел, включаючи супутникові зображення, аерофотознімки та наземні спостереження. Моделі повеней можуть бути використані для оцінки ефективності заходів із пом'якшення наслідків повеней, а також для моделювання наслідків різних сценаріїв затоплення [48]. Цифрові моделі рельєфу створені на основі даних дистанційного зондування, використовуються для прогнозування можливих зон затоплення під час повені. ГІС сприяє вивченню просторових зв'язків між різними факторами, що сприяють затопленню, такими як землекористування, тип ґрунту та рельєф, а також для створення карт небезпеки затоплення, що визначають глибину і ступінь ймовірного затоплення, що важливо для оцінки ризику затоплення і прийняття управлінських рішень.

Моделі затоплення територій функціонують шляхом збору даних з різних джерел, таких як супутникові зображення, аерофотознімки, тощо. Зібрані дані включають цифрові моделі висоти, карти землекористування та ґрунтового покриву, дані про ґрунти та метеорологічні показники [49]. Для підвищення точності та усунення спотворень необхідна попередня обробка даних, яка включає радіометричне калібрування, атмосферну та геометричну корекції. Операції обробки даних ГІС включають геоприв'язку, перетворення та інтеграцію даних. Попередньо оброблені дані застосовуються до методів аналізу зображень, таких як порогова обробка та сегментація зображень, для визначення зон, що постраждали від повеней. Використовуючи карти повеней як вихідні дані, моделі можуть імітувати процес затоплення та прогнозувати рівні і потоки повені. Існують різні типи моделей повеней, зокрема

гідрологічні, гідравлічні та комбіновані моделі. Гідрологічні моделі застосовуються для моделювання руху води в межах вододілів, зокрема для інфільтрації, стоку та випаровування. Вони можуть бути розподіленими, зосередженими або напіврозподіленими. Рух води в річкових руслах і заплавах моделюється за допомогою гідравлічних моделей, які можуть бути одновимірними (1D), двовимірними (2D) або тривимірними (3D), залежно від складності геометрії русла та заплави [50].

Карти повеней створюються для відображення масштабу та серйозності затоплення. Такі карти використовуються для визначення територій, схильних до повеней, а також для розробки стратегій пом'якшення наслідків, таких як планування землекористування, проектування інфраструктури та планування заходів реагування на надзвичайні ситуації. Моделі повеней, засновані на ГІС, мають кілька переваг у порівнянні з традиційними моделями, зокрема можливість інтеграції різних типів даних і просторової візуалізації результатів. Однак вони мають і недоліки, такі як складність процесу моделювання та необхідність спеціалізованого програмного забезпечення і кваліфікації.

Калібрування моделей повеней є важливою технікою для перевірки точності прогнозів, оскільки дозволяє налаштувати вхідні параметри моделі для досягнення кращої відповідності між прогнозованими і фактичними рівнями води та потоками повеней. Перевірка карт повеней є ключовим етапом для виявлення недоліків, їх корекції та підвищення точності карт. Для цього використовуються польові спостереження або інші надійні джерела даних, що підтверджують точність моделей. У результаті таких перевірок моделі повеней стають надійними для застосування в прогнозуванні майбутніх повеней та системах раннього попередження, що дозволяє вчасно інформувати вразливі групи населення та приймати відповідні заходи.

До прикладів моделей затоплення територій, що використовують технології дистанційного зондування та географічні інформаційні системи (ГІС), відносяться [51]:

– SRTM Flood – ця модель використовує дані Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) для нанесення на карту топографії досліджуваної території. Дані, отримані під час місії SRTM, дозволяють створювати цифрові моделі висоти, що є основою для моделювання поведінки води під час повені. Модель SRTM Flood застосовується для визначення потенційних зон затоплення на основі топографічних характеристик місцевості та прогнозування рівнів води в разі повені. Це дозволяє визначити можливі території, які можуть бути затоплені, а також оцінити рівень потенційної небезпеки для цих територій;

– система картографування затоплення (СКЗ) є програмним інструментом для управління ризиками повеней та реагування на надзвичайні ситуації. Розроблений Інженерним корпусом армії США, СКЗ використовується для прогнозування масштабу і глибини затоплення в конкретних регіонах. Модель базується на зборі даних з різних джерел, таких як супутникові зображення, метеорологічні дані та геопросторові інформаційні ресурси, що дозволяють здійснювати аналіз поточних умов і передбачати сценарії затоплень у реальному часі. Вона забезпечує ефективне управління надзвичайними ситуаціями, допомагаючи органам місцевого самоврядування та службам порятунку оцінити ризики та розробити стратегії реагування на повені;

– інструмент аналізу повеней ArcGIS є частиною програмного пакету ESRI ArcGIS, цей інструмент широко використовується для картографування та оцінки ризику затоплення територій. Він включає модулі для створення карт затоплення, що дозволяють визначати ступінь та глибину можливого затоплення територій на основі даних дистанційного зондування та результатів моделювання. Використання цієї системи забезпечує точну оцінку впливу повені на інфраструктуру та населення, що допомагає у плануванні заходів пом'якшення та розвитку стратегій управління територією. Інструмент також підтримує прийняття рішень у ситуаціях, коли необхідно оцінити потенційні загрози для певних районів, що підлягають затопленню територій [52].

Ці моделі є основою для комплексного аналізу та прогнозування повеней, забезпечуючи важливі інструменти для оцінки ризиків, моніторингу ситуації та реагування на надзвичайні ситуації, що виникають у результаті повеней. Вони використовують сучасні технології дистанційного зондування та ГІС для збору, аналізу та візуалізації просторових даних, що дозволяє вчасно виявляти потенційні загрози та оптимізувати процеси прийняття рішень.

ГІС використовується для моделювання потенційних зон затоплення територій на обмеженій досліджуваній території, застосовуючи деталізовану модель рельєфу, побудовану на основі Триангуляційної нерегулярної мережі (ТНМ). Ця модель була розроблена на основі стерео аерофотознімків, що дозволило отримати високоточне ландшафтне зображення досліджуваної території. Далі за допомогою ТНМ було створено топографічну цифрову модель рельєфу із використанням геометрії русел і потоків, що була включена до моделі повеней. Результати візуалізації повеней дали високоточні двовимірні (2D) і тривимірні (3D) карти небезпеки повеней. В роботі [53] використано метод багатокритеріальної оцінки разом з методом аналізу ієрархій в ГІС для оцінки зон, схильних до повеней. Цей підхід дозволив визначити вразливі зони до підтоплення, що сприяло прийняттю ефективних рішень та розробці політики управління. Результати досліджень показали, що для ефективного контролю повеней недостатньо лише використовувати структурні методи (наприклад, будівництво дамб чи водосховищ). Такі заходи не можуть повністю вирішити проблему, оскільки повені стають все більш частими і масштабними в багатьох регіонах світу. Це вказує на необхідність комплексного підходу, який поєднує не тільки технічні рішення, а й інші стратегії, такі як екологічні, управлінські та соціально-економічні, для більш ефективного зменшення ризиків. Оскільки приблизно 80% даних, які використовуються для прийняття рішень, мають географічну прив'язку, ГІС забезпечує можливість моделювання цих просторових зв'язків для більш обґрунтованого прийняття рішень.

Авторами в роботі [54] використано ГІС для оцінки збитків від повеней у мусонній Азії, розробивши Карту небезпеки повеней, що стала ключовим інструментом для належного планування землекористування в зонах, схильних до повеней. Їх дослідження забезпечило доступні, зрозумілі карти і схеми небезпеки повеней, що дозволило управлінцям і планувальникам ідентифікувати ризиковані зони та розробляти ефективні стратегії для мінімізації наслідків та відповіді на повені. Авторами в роботі [55] використано ГІС для розробки карт небезпеки повеней на острові Род-Айленд, виділивши зони, де повені можуть виникнути і повторитися в міських умовах. Вони підкреслили, що географічна інформаційна система стала невід'ємним інструментом для місцевих адміністраторів та містобудівників, оскільки дозволяла попередньо оцінювати потенційні зони затоплення і збитки, що можуть виникнути в результаті повені. Це полегшило прийняття рішень щодо планування та відповіді на екстремальні погодні умови.

В роботі [56] досліджено проблему повеней у Північній Кароліні, США, використовували метод 3D візуалізації в ArcGIS для оцінки ситуації у цьому регіоні. Вони продемонстрували, що візуалізація у тривимірному просторі є потужним інструментом для ідентифікації зон затоплення та розробки ефективних стратегій управління ризиками. Це дослідження відзначило, що ГІС-інформація сприяє запобіганню ризикам через детальне картографування ґрунтового покриву, аналіз небезпечних зон та моделювання дренажних систем.

Дослідження, проведене в роботі [57] на річці Калу-Ганга, Шрі-Ланка є прикладом того, як методи спостереження Землі були ефективно використані для аналізу ризиків повеней і картографування. У своєму дослідженні автори проаналізували два зображення, отримані під час сухого сезону і під час повені, для визначення зони затоплення. Результати показали, що діапазон затоплення територій, визначений на основі цієї інформації, відповідав результатам, отриманим при використанні однієї з моделей затоплення під час повені, що підтверджує їхню модель. У дослідженні також використовувалася

інформація ГІС і можливості для імітації повеней і картографування ризиків. Вони використали ГІС для накладення значень вразливості та небезпеки повеней на полігональну карту регіону. Таким чином, автори в роботі [58] змогли виділити зони з високим, середнім та низьким ризиком повеней. Це дослідження підкреслює важливість використання ГІС і спостережень Землі для точного прогнозування і управління повеневими ризиками, що є критичним для забезпечення безпеки населення та сталого розвитку у вразливих регіонах.

Отже, ГІС в контексті управління водними ресурсами акцентують увагу на необхідності комплексного та інтегрованого підходу до цього процесу.

1.6 Огляд інформаційних систем для даних метеорологічних прогнозів

Для моделювання та прогнозування атмосферних процесів використовують інформаційну систему дослідження та прогнозування погоди Weather Research and Forecasting (WRF). Ця система була розроблена у співпраці між провідними науковими та державними установами США, включаючи Національний центр атмосферних досліджень (NCAR), Національне управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA), представлене Національним центром прогнозування навколишнього середовища (NCEP) та Лабораторією систем прогнозування, Агентство погоди ВПС США, Військовоморську дослідницьку лабораторію, Університет Оклахоми та Федеральне управління цивільної авіації США [59].

Система WRF має дві основні конфігурації: Advanced Research WRF (ARW), яка орієнтована на дослідницькі цілі, та Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM) для оперативного прогнозування. У рамках конфігурації ARW використовуються рівняння Ейлера та негідростатичні рівняння на основі С-сітки Аракави. Для інтегрування в часі застосовується схема Рунге-Кутта третього порядку, а просторову дискретизацію виконують із застосуванням

методів від другого до шостого порядків. Особливою перевагою WRF є підтримка односторонніх, двосторонніх та рухомих вкладених сіток, що забезпечує гнучкість у моделюванні регіональних особливостей атмосферних явищ. WRF система може функціонувати як на однопроцесорних системах, так і на суперкомп'ютерах зі спільною або розподіленою пам'яттю, що робить її масштабованою для різних рівнів ресурсів. Для підготовки вхідних даних використовується система попередньої обробки WRF Preprocessing System (WPS), а результати моделювання зберігаються у форматі NetCDF, який є стандартним форматом для вводу/виводу в WRF. Ці результати можуть бути візуалізовані за допомогою таких інструментів, як GrADS, RIP4 та інших графічних програм.

Таким чином, модель WRF є універсальним інструментом для високоточних метеорологічних досліджень, адаптованих до завдань різної складності: від регіональних прогнозів до глобальних кліматичних досліджень.

Система Regional Integrated Multi-Hazard Early Warning System Weather Research and Forecasting (RIMES WRF) адаптована для моделювання погоди в регіоні, обмеженому координатами 20° східної довготи до 150° східної довготи і 16° південної широти до 50° північної широти. Ця територія охоплює країни-члени RIMES, зокрема Папуа-Нову Гвінею на крайньому сході, Монголію на півночі, Мадагаскар та більшість країн Східної Африки на заході.

Для побудови моделі затоплення в даній системі використовуються топографічні дані Геологічної служби США. Початкові умови для моделювання завантажуються з Глобальної системи прогнозування (Global Forecast System, GFS), яку надає Національний центр прогнозування навколишнього середовища (NCEP). Запуск моделі здійснюється з початковим станом о 12:00 UTC.

Для точнішого моделювання атмосферних процесів простір моделі дискретизується до сітки з роздільною здатністю 9 км × 9 км. Горизонтальна

сітка складається з 1 470 точок у напрямку захід-схід та 870 точок у напрямку південь-північ, що забезпечує високу деталізацію симуляцій.

Система RIMES WRF демонструє можливості високоточного регіонального моделювання, забезпечуючи важливий інструмент для попередження про природні небезпеки, прогнозування погоди та кліматичних досліджень у широкому географічному діапазоні [60].

1.7 Огляд комп'ютерних моделей та інформаційних технологій прогнозування і оцінки затоплення територій

Комп'ютерні моделі затоплення територій являють собою математичні та обчислювальні інструменти, що дозволяють імітувати поведінку водних потоків під час повеней. Вони базуються на математичних алгоритмах для розв'язання рівнянь, які описують рух води. Ці моделі враховують такі чинники, як кількість опадів, поверхневий стік, геометрія та шорсткість русла. Завдяки цьому комп'ютерні моделі забезпечують можливість аналізу наслідків різних сценаріїв затоплення територій, оцінки ефективності заходів із пом'якшення наслідків повеней і прогнозування змін у поведінці паводків під впливом кліматичних змін, змін землекористування тощо.

Існують одновимірні моделі, що відображають потік води лише в межах русла річки, двовимірні моделі, які імітують рух води над заплавою, та тривимірні моделі, що деталізують вертикальний розподіл води. Комп'ютерні моделі відзначаються перевагами, зокрема здатністю враховувати широкий спектр даних, моделювати складні гідрологічні та гідравлічні процеси, а також проводити моделювання на великих територіях.

Водночас комп'ютерне моделювання потребує спеціальних знань для створення та оцінки моделей, а також може супроводжуватися помилками та невизначеністю результатів [60].

Для прогнозування повеней використовуються спеціалізовані програмні пакети, серед яких: HEC-RAS, MIKE FLOOD, TUFLOW, Flood Estimation Handbook та EFDC.

HEC-RAS – програмне забезпечення, розроблене Інженерним корпусом армії США, призначене для моделювання гідравліки річкових систем як в одному, так і в двох вимірах [61]. Переваги:

- наявність інтуїтивно зрозумілого графічного інтерфейсу для створення, редагування та візуалізації гідравлічних моделей;
- можливість моделювання сталих і несталих потоків.

Обмеження:

- недостатня здатність відображати складні геометрії та граничні умови;
- висока обчислювальна складність, що потребує значних апаратних ресурсів для розрахунків;
- недостатня деталізація взаємодії між водним потоком та навколишнім середовищем, зокрема обмежені можливості щодо моделювання процесів перенесення наносів та морфодинамічних змін.

MIKE FLOOD – програмний комплекс, розроблений DHI, призначений для дво- та тривимірного моделювання процесів затоплення у заплавах та річкових системах [62, 63]. Переваги:

- працює з великим набором гідравлічних та гідрологічних процесів, що дозволяє враховувати складні сценарії розвитку паводкових явищ;
- забезпечує інтеграцію з іншими програмними продуктами сімейства MIKE для комплексного аналізу та прогнозування.

Обмеження:

- моделювання складних процесів потребує значних обчислювальних ресурсів;
- ефективне використання програмного забезпечення вимагає високого рівня технічної підготовки користувачів.

TUFLOW – програмний комплекс, призначений для дво- та тривимірного гідравлічного моделювання водних потоків та затоплень [64].

Переваги:

- висока гнучкість у налаштуванні параметрів, що дозволяє адаптувати модель до специфічних умов дослідження;

- можливість моделювання гідравлічних та гідрологічних процесів, включаючи різноманітні аспекти руху води та взаємодії з навколишнім середовищем.

Обмеження:

- обмежена продуктивність при моделюванні великомасштабних територій або складних сценаріїв;

- для ефективного використання потребує високого рівня технічної підготовки та експертних знань.

Flood Estimation Handbook – набір моделей, розроблених у Великій Британії для оцінки дощового стоку та аналізу частоти паводків [65].

Переваги:

- забезпечує послідовний та стандартизований підхід до оцінки паводків;

- характеризується відносною простотою у застосуванні та налаштуванні моделей.

Обмеження:

- обмежена здатність до моделювання складних гідрологічних процесів та проведення детальних симуляцій;

- непридатна для регіонів із кліматичними та гідрологічними умовами, відмінними від тих, для яких була розроблена методологія;

- не враховує динамічні зміни у землекористуванні та характеристиках водозборів у довгостроковій перспективі.

Environmental Fluid Dynamics Code – програмний комплекс, розроблений Агентством з охорони навколишнього середовища США, призначений для тривимірного моделювання гідродинамічних процесів, якості води та екологічних змін у поверхневих водних системах [66].

Переваги:

– забезпечує можливість моделювання складних екологічних процесів, включаючи динаміку затоплення територій та поширення забруднювальних речовин;

– підтримує складні гідродинамічні моделі та симуляції та дозволяє комплексно аналізувати стан водних систем.

Обмеження:

– потребує значних обчислювальних потужностей для моделювання тривимірних об'єктів;

– вимагає високого рівня технічної експертизи для ефективного використання.

В Україні функціонують різні інформаційні платформи, спрямовані на моніторинг, прогнозування та управління ризиками надзвичайних ситуацій. Вони забезпечують обробку великих масивів даних у реальному часі, підтримують ухвалення рішень та сприяють мінімізації наслідків катастроф. До таких систем належать загальнодержавні інформаційно-аналітичні платформи, а також спеціалізовані регіональні рішення, зокрема урядова інформаційно-аналітична система, автоматизована інформаційно-вимірювальна система «Тиса» та онлайн-платформа “Land & Water”, тощо.

Урядова інформаційно-аналітична система з питань надзвичайних ситуацій – інформаційна платформа для підтримки державного управління у сфері надзвичайних ситуацій, яка була створена відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 7 квітня 1995 року №250 [67] та призначена для збору, обробки, аналізу та надання достовірної інформації органам виконавчої влади з метою ефективного реагування на надзвичайні ситуації, прогнозування їхнього розвитку та мінімізації наслідків. В рамках системи розроблений прогнозно-моделюючий комплекс прогнозування та оцінки наслідків «Паводок». Основні завдання системи – прогнозування та оцінка наслідків паводкових ситуацій для забезпечення ефективного управління та мінімізації ризиків пов'язаних із паводками, підвищення ефективності реагування, координація заходів та зменшення негативних наслідків НС.

Автоматизована інформаційно-вимірювальна система «Тиса» призначена для прогнозування паводкових явищ та управління водними ресурсами в басейні річки Тиси. Вона розроблена Державним агентством водних ресурсів України та забезпечує збір, аналіз і прогнозування гідрологічних показників у реальному часі [68]. Переваги:

- можливість моделювання та прогнозування різних сценаріїв розвитку паводкової ситуації та оцінки її потенційних наслідків;

- надання оперативної інформації щодо рівня води на основі автоматизованих вимірювальних станцій, що підвищує точність оцінки поточного гідрологічного стану та його прогнозування..

Обмеження:

- обмежена здатність обробляти складні симуляції;

- потребує значного обсягу обчислювальних ресурсів для моделювання великих територій;

- необхідність залучення висококваліфікованих фахівців для експлуатації та аналізу отриманих даних.

Онлайн платформа “Land & Water” базується на агро-гідрологічній моделі Soil and Water Assessment Tool та налаштована для відтворення гідрологічних процесів річкових басейнів України. Вона розроблена Українським гідрометеорологічним інститутом і використовується для аналізу водного балансу та факторів, що впливають на формування стоку [69].

Переваги:

- можливість моделювання в ручному режимі й попередньої оцінки потенційних зон затоплення;

- аналіз впливу різних факторів на формування водного стоку.

Обмеження:

- обмежена точність через відсутність точної цифрової моделі рельєфу;

– відсутня можливість моделювання паводкових процесів на великих територіях.

Вибір програмного забезпечення для моделювання затоплення залежить від конкретних вимог дослідження, доступності даних і ресурсів. В роботах [70-72] порівняно дві 2D цифрові моделі (LISFLOOD-FP і HEC-RAS), що застосовуються для оцінки затоплення заплав. Результати показали, що хоча моделі з меншим рівнем роздільної здатності демонструють прийнятні результати, моделі з високою просторовою роздільною здатністю забезпечують точніші прогнози завдяки більш детальному врахуванню просторових характеристик і динаміки водних потоків. Однак географічний розподіл характеристик паводків може варіюватися, що впливає на ефективність моделювання в різних регіонах. В роботах [73-75], порівняли традиційну «роз'єднану» методику з «інтегрованою» стратегією оцінки небезпеки паводків для малих сільських водозборів, акцентуючи на перевагах, недоліках і обмеженнях кожного з підходів. В роботі [76] проведено порівняльний аналіз моделювання дощів на поверхні ґрунту за допомогою програми HEC-RAS 2D (HR2D), оцінюючи її ефективність і обмеження для оцінки штормової небезпеки в різних умовах. Автори в роботі [77] оцінювали ефективність інтегрованої стратегії моделювання для аналізу потоків навколишнього середовища, використовуючи SWAT та HEC-RAS.

Попри значний розвиток інформаційних систем моделювання затоплення територій, застосування таких інструментів для прогнозування затоплень в Україні має низку обмежень, особливо у випадках моделювання надзвичайних ситуацій, таких як руйнування дамб. Основні недоліки включають:

– інформаційні системи моделювання потребують високоякісних вхідних даних, таких як точні топографічні карти, гідрологічні параметри та характеристики ґрунтів. В Україні дані про рельєф, гідравлічні властивості водойм або землекористування часто мають недостатню деталізацію або застарілу інформацію, що знижує точність прогнозів;

– розглянуті інформаційні системи розроблені переважно для атмосферного моделювання і не враховують особливості складних гідродинамічних процесів, що виникають під час руйнування гідротехнічних споруд. В Україні це є особливо актуальним для великих річкових систем, таких як Дніпро, де руйнування дамб може спричинити хвилі прориву з катастрофічними наслідками для навколишніх територій;

– розглянуті інформаційні системи часто працюють на регіональних або глобальних масштабах і мають обмежену здатність враховувати локальні особливості, наприклад, дрібні притоки річок, складну геоморфологію або мікрорельєф, які суттєво впливають на поширення затоплення;

– у разі руйнування дамби прогнозування має бути надзвичайно швидким, щоб забезпечити евакуацію населення. Однак, більшість сучасних систем, особливо за умов нестачі обчислювальних потужностей, не здатні оперативно моделювати сценарії прориву дамб та оцінювати динаміку затоплення в реальному часі;

– типові гідродинамічні моделі для України рідко враховують сценарії, пов'язані з руйнуванням дамб, включаючи параметри хвиль прориву, швидкість поширення води, об'єми водних мас, що виливаються, та можливу зміну русла річок. Це ускладнює точне прогнозування затоплень і їхніх наслідків для критичної інфраструктури та населених пунктів.

1.8 Постановка задачі

Незважаючи на стрімкий розвиток інформаційних технологій, проблема прогнозування та оцінки наслідків затоплення територій у контексті надзвичайних ситуацій залишається надзвичайно актуальною. Це пояснюється складністю формалізації процесу аналізу та інтерпретації просторових даних, а також необхідністю врахування численних факторів, які впливають на процеси затоплення, таких як гідродинамічні характеристики, особливості рельєфу, зміни в землекористуванні та

кліматичні умови. Інтеграція мультиспектральних супутникових даних з цифровими моделями рельєфу є ускладненою через різночасовість та різнорідність вихідних даних.

Аналіз існуючих підходів виявив, що більшість методів розв'язують локальні задачі, орієнтовані на обмежені території або окремі аспекти проблеми. Зокрема, використовуються лише окремі джерела даних, такі як топографічні карти чи багатоспектральні супутникові зображення, що обмежує точність моделювання. Багато традиційних методів потребують значного часу для ручного аналізу або залучення висококваліфікованих фахівців, що робить їх непридатними для оперативного застосування у кризових умовах.

Методи машинного навчання, зокрема згорткові нейронні мережі, демонструють значну ефективність у задачах аналізу та класифікації супутникових даних, зокрема для розпізнавання зон затоплення. Інтеграція цих методів з геоінформаційними технологіями дозволяє підвищити точність прогнозування, автоматизувати процеси аналізу та знизити залежність від ручного втручання. Використання багатоспектральних супутникових зображень високої просторової розрізненості в поєднанні з моделями глибокого навчання відкриває перспективи для створення геоінформаційних технологій, здатних враховувати динаміку ландшафту та гідрологічних умов.

Виходячи з цього, метою дисертаційної роботи є підвищення точності прогнозування та оцінки наслідків затоплення територій у надзвичайних ситуаціях шляхом розробки геоінформаційної технології моделювання, картографування та аналізу супутникових даних з використанням машинного навчання.

Реалізація мети роботи пов'язана з розв'язанням наступних основних задач:

1. Здійснити комплексний аналіз причин та наслідків затоплення територій, зокрема в контексті природних і антропогенних надзвичайних

ситуацій, для виявлення основних факторів, що впливають на інтенсивність і масштаб затоплень.

2. Розробити метод комп'ютерного картографування затоплення при виникненні надзвичайної ситуації на гідроелектростанції.

3. Розробити геоінформаційну технологію прогнозування та картографування небезпеки затоплення при антропогенних надзвичайних ситуаціях, що дозволить своєчасно оцінювати потенційні наслідки таких ситуацій для територій.

4. Розробити геоінформаційну технологію виявлення та моделювання затоплених зон на основі напівкерованого машинного навчання, що підвищить точність визначення затоплених зон під час надзвичайних ситуацій.

5. Розробити геоінформаційну технологію виявлення та моделювання затоплених територій на основі згорткових нейронних мереж, що забезпечить точність прогнозів і високу якість обробки супутникових зображень для картографування затоплень територій.

6. На базі запропонованих методів і алгоритмів розробити автоматизовану геоінформаційну технологію для виявлення та моделювання зон затоплення на основі різночасових супутникових зображень, використовуючи архітектуру напівкерованого машинного навчання та згорткових нейронних мереж, що дозволить точно визначати затоплені зони.

7. Провести порівняння результатів технології виявлення та моделювання затоплених територій за допомогою напівкерованого машинного навчання та згорткових нейронних мереж з метою визначення найбільш ефективних підходів для автоматизованого виявлення затоплених територій на основі супутникових зображень.

8. Запропонувати рішення у вигляді програмної реалізації геоінформаційної системи для інтеграції різних методів картографування і моделювання затоплень в умовах реального часу.

9. Впровадити практичне застосування розроблених геоінформаційних технологій для прогнозування та оцінки наслідків затоплення територій, заснованих на аналізі різночасових супутникових зображень, та надати практичні рекомендації щодо їх використання в управлінні ризиками затоплень у надзвичайних ситуаціях.

1.9 Висновки по першому розділу

1. Проведено аналіз сучасного стану проблеми прогнозування та оцінки наслідків затоплення територій при надзвичайних ситуаціях. Аналіз літературних джерел показали наявність численних проблем, які потребують вирішення. Зокрема, відзначається недостатня кількість автоматизованих геоінформаційних технологій, які дозволяють проводити оцінку наслідків затоплення в реальному режимі часу, що зумовлює наукову спрямованість даної роботи.

2. Наведено класифікацію надзвичайних ситуацій на природні (землетруси, зсуви, вулканічна активність) та антропогенні (техногенні аварії, екологічні катастрофи). Визначено їх вплив на затоплення територій та необхідність врахування цих факторів при розробці стратегій управління ризиками.

3. Проведено класифікацію повеней за різними критеріями, включаючи їх походження (річкові, прибережні, міські), тривалість (короткочасні, довготривалі), масштаб (локальні, регіональні) та вплив на території. Це дозволяє систематизувати різні типи затоплень за їх походженням, масштабом та впливом на території. Розглянуто стратегії запобігання повеням, що включають інженерні та неінженерні заходи, спрямовані на зменшення ризиків затоплення.

4. Розглянуто різні стратегії запобігання повеням, включаючи інженерні рішення (дамби, резервуари, канали) та неінженерні заходи

(заборона забудови в зонах ризику, екологічні заходи). Важливою складовою є інтеграція сучасних технологій моніторингу та прогнозування.

5. Проведено аналіз впливу кліматичних змін на частоту та інтенсивність повеней. Запропоновано методику пошуку та оцінки островів тепла на цифрових космічних знімках, що дозволяє на основі аналізу різночасових карт температури виявляти стабільні у часі ділянки теплового забруднення, потенційно небезпечні для населення прилеглих територій. Виконано побудову карт УНІ, LST міста Дніпро з використанням запропонованої методики.

6. Огляд можливостей геоінформаційних систем та дистанційного зондування Землі для моніторингу та картографування затоплених територій показав, що ці технології є ключовими для ефективного управління ризиками затоплення. Вони дозволяють зібрати, обробити та аналізувати великі обсяги просторових даних у реальному часі.

7. Розглянуто методи картографування небезпеки затоплення територій, що дозволяють візуалізувати ризики та наслідки затоплення територій для різних територій. Це є важливим елементом планування та прийняття рішень при управлінні територіями, що піддаються ризику затоплення.

8. У роботі проведено аналіз технологій супутникового моніторингу для картографування затоплень, зокрема на основі оптичних супутникових даних. Оптичні супутникові дані виявились ефективними для моніторингу затоплених територій завдяки високій роздільній здатності та чутливості до змін у відображенні поверхні. Основними перевагами є можливість детального аналізу характеру затоплення та точна ідентифікація затоплених зон. Однак ці дані можуть зазнавати впливу атмосферних умов, що призводить до зниження точності результатів моніторингу. Це вказує на необхідність застосування додаткових методів корекції та інтеграції з іншими типами даних для підвищення точності картографування затоплень, що

важливо для забезпечення надійних результатів у прогнозуванні наслідків затоплень територій.

9. Завдяки використанню сучасних програмних продуктів для моделювання метеорологічних процесів та прогнозування погоди (WRF, RIMES WRF, HEC-RAS, MIKE FLOOD, TUFLOW, EFDC) вирішується ряд задач, пов'язаних з високоточним прогнозуванням атмосферних явищ та затоплень. Однак практика їх застосування вказує на низький рівень автоматизації процесів, що стосуються моделювання складних гідрологічних та гідравлічних процесів, зокрема в умовах швидко змінюваного середовища або нестабільних географічних умов.

10. Завдяки використанню сучасних програмних продуктів для моделювання затоплень (HEC-RAS, MIKE FLOOD, TUFLOW, Flood Estimation Handbook, EFDC) вирішуються задачі прогнозування гідрологічних процесів. Проте ці програми вимагають висококваліфікованих спеціалістів та значних обчислювальних ресурсів. Крім того, існують обмеження у моделюванні складних геометрій і масштабних об'єктів, що обмежує їх застосування при надзвичайних ситуаціях.

11. В результаті проведеного аналізу літературних джерел сформульовано мету та поставлено завдання щодо розробки геоінформаційної технології прогнозування та оцінки наслідків затоплення територій при надзвичайних ситуаціях.

Основні результати даного розділу опубліковані в роботах автора [3, 9].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ АНАЛІЗУ РИЗИКУ ЗАТОПЛЕННЯ ТЕРИТОРІЙ

2.1. Гідролого-гідравлічні методи

Затоплення територій можна розглядати як подію з аномально високими витратами, які фіксуються в певній точці або на певній ділянці потоку. Для повного розуміння таких подій важливо створити гідрограф паводку, що відображає його аномальні витрати в часі. Це дозволяє дослідити ключові елементи паводку, такі як пікові витрати, висхідна та спадна частини, а також час запізнення. Крім того, гідрограф допомагає ідентифікувати рівні затоплення територій, такі як поверхневий стік, прямий стік, підповерхневий стік і базовий стік, і порівняти їх з відповідним гідрографом (див. рис.2.1). Це, в свою чергу, дозволяє оцінити ймовірність виникнення паводкових подій [78].

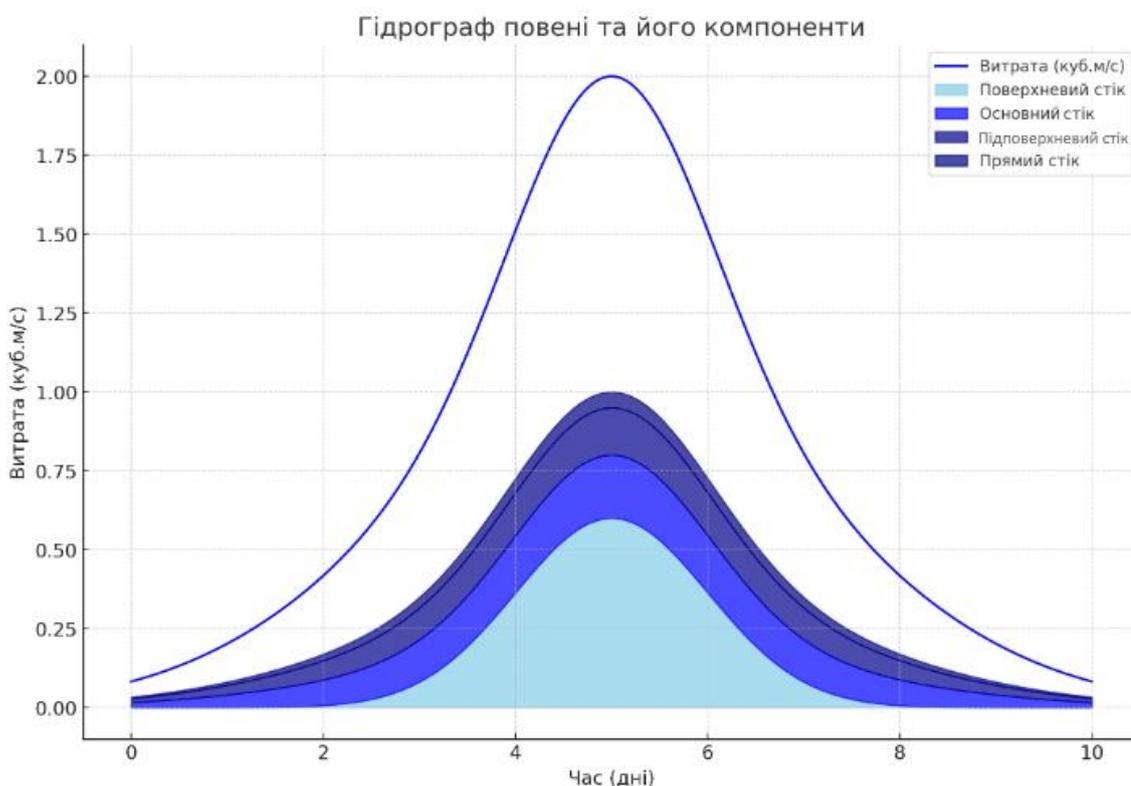


Рисунок 2.1 – Гідрограф рівнів затоплення [75]

Існують різноманітні методи гідрологічного дослідження затоплень, які можна класифікувати на два основних типи: прямі та непрямі. Прямі методи орієнтовані на аналіз історичних даних про стік для характеристики минулих затоплень територій. Непрямі методи, в свою чергу, спрямовані на прогнозування майбутніх або гіпотетичних затоплень територій (розрахункових затоплень територій). Цей тип методів включає використання непрямих даних, таких як геолого-геоморфологічні ознаки, а також результати аналізу опадів і стоку, зареєстрованих під час попередніх затоплень територій.

Прямі методи гідрологічного дослідження затоплень територій зосереджуються на характеристиці гідрографа фактичного затоплення територій, який отримується за допомогою вимірювань витрат води, проведених на гідрологічному посту. Для цього використовуються гідрографи, які аналізуються разом із номінальними кривими або серіями миттєвих вимірювань витрат води, що розраховуються як площі поперечних перерізів, помножені на швидкість течії. Дані гідрографів зберігаються в органах управління річковими басейнами, таких як гідрографічні підрозділи басейнових конфедерацій і водогосподарські агентства, або в гідрологічних службах, наприклад, CEDEX34. Зокрема, база даних HIDRO, яка містить відповідні таблиці (зокрема HIDROGR) та програмні інструменти, є джерелом таких даних. На основі гідрографа можна використовувати різні методології для проведення всебічного аналізу елементів і компонентів затоплення територій [79], включаючи прямі лінії, звичайні криві виснаження, максимальні кривини, моделі Лінслі і Барнса, а також оцінювати часові характеристики гідрографа або результати його кореляції з гістографом.

Непрямі методи у гідрологічному вивченні затоплень територій мають два основних напрямки. Перший напрямок – детерміністичний підхід, який використовує фізичні закони та математичні співвідношення для прогнозування затоплень територій на основі історичних даних. Другий

напрямок – стохастичний підхід, який базується на випадковому характері процесу і використовує аналітичні закони або функції для прогнозування майбутніх значень змінної на основі попередніх спостережень. Детерміновані методи включають емпіричні формули, які визначають зв'язок між піковими витратами, що можуть бути зафіксовані в потоці, та площею басейну, що дренається. До відомих формул відносяться формули Запата, Фуллера і Гераса [80], які пропонують прямий пропорційний зв'язок між витратами і площами суміжних басейнів. У деяких випадках ці формули використовуються для створення номограм для цілих басейнів або окремих їх ділянок. Також існують складніші формули і регресії, засновані на багатовимірному аналізі морфометричних параметрів басейнів [79], які часто використовуються для первинних оцінок витрат у США. Ці формули включають моделі «чорної скриньки», які не враховують інформацію про внутрішні гідрологічні процеси в басейні і тому обмежені в застосуванні лише до перевірених басейнів. Статистичні або стохастичні методи включають як гідрометеорологічні методи, так і аналіз частоти затоплень територій.

2.1.1 Гідрометеорологічні методи

Гідрометеорологічні методи базуються на перетворенні метеорологічних змінних, таких як опади та, в меншій мірі, танення снігу, у поверхневий стік (витрати). Ці методи підтримуються детермінованими моделями, які використовують метеорологічні дані для оцінки стоку. Вони зазвичай включають більше точок відбору проб (метеорологічних станцій) та забезпечують більшу репрезентативність і довжину часового ряду порівняно з гідрологічними даними.

Різні типи моделей для моделювання процесів опадів і стоку включають безперервні і дискретні моделі. Безперервні моделі демонструють поточний баланс вологи протягом тривалого періоду, охоплюючи як

паводкові, так і звичайні періоди. Прикладами таких моделей є MIKE-SHE, HSPF і SIMPA. Дискретні моделі, навпаки, фокусуються на моделюванні окремих подій, враховуючи лише ту частину опадів, що викликає поверхневий стік. Ці моделі особливо корисні для розрахункових затоплень територій. Найпоширенішими дискретними моделями є раціональний метод, одиничний гідрограф та ймовірний максимальний затоплення територій.

Методи і моделі також відрізняються за ступенем просторового розподілу параметрів. Укрупнені моделі розглядають територію або ділянку як єдиний елемент і використовують усереднені значення гідрологічних параметрів. Прикладом є раціональний метод. Напіврозподілені моделі аналізують однорідні зони (однорідні одиниці гідрологічного реагування) в межах одного басейну або суббасейну. Наприклад, метод одиничного гідрографа в системі HEC-HMS. Розподілені моделі враховують просторову варіацію всіх гідрологічних параметрів, працюючи з одиницями аналізу, такими як пікселі, точки, дуги або багатокутники. Прикладом є програма TETIS [81,82].

2.1.2 Метод обчислення водозбору

Метод обчислення водозбору ґрунтується на перетворенні опадів з інтенсивністю I (які починаються миттєво і тривають нескінченно) у стік, що триває до досягнення часу концентрації (t_c). На цей момент весь басейн вносить свій внесок у стік, і досягається пік витрат (Q_p). Об'єм води, що надходить до системи, визначається як добуток інтенсивності опадів на площу басейну (IA), який потім коригується на коефіцієнт стоку (C , що коливається від 0 до 1). Коефіцієнт стоку відображає частину води, яка утримується в початкових відведеннях (перехоплення, відведення, випаровування). Вимірні одиниці змінних можуть бути в північноамериканській системі, і для переведення в Міжнародну систему

одиниць (SI) слід поділити добуток на 3,6. Загальна формула виглядає так [80]:

$$Q_p = \frac{C \cdot I \cdot A}{3,6}. \quad (2.1)$$

Коефіцієнт стоку, який приймається як середній для басейну та постійний у часі, розраховується за допомогою стандартних методів, таких як методи Хортон, Холдена та Soil Conservation Service (SCS) [84], або за допомогою таблиць, що враховують фізико-географічні особливості. В інших випадках проводиться калібрування шляхом порівняння з результатами аналізу частоти затоплень територій. Інтенсивність опадів розраховується як середня інтенсивність за період, що дорівнює часу концентрації, для різних періодів повернення, використовуючи криві інтенсивності/тривалості. Для оцінки часу концентрації застосовуються різні рівняння, зокрема рівняння SCS [84].

Раціональний метод зазнав значної критики через своє основне припущення: постійна інтенсивність опадів на досліджуваній території протягом часу концентрації та постійний коефіцієнт стоку, що є малоймовірним у природних системах. Багато досліджень рекомендують використовувати цей метод лише для басейнів певного розміру або при певних умовах тривалості опадів. З цієї причини пропонуються різні модифікації традиційної формули для адаптації до інших басейнів або умов концентрації. Модифікований раціональний метод призначений для опадів, тривалість яких перевищує час концентрації, більших басейнів (від 8 до 12 га) та для реконструкції пікового стоку і гідрографа, який має трапецієподібну форму. Модифікація за [85] для басейнів площею до 3000 км² і часом концентрації від 0,25 до 24 годин включає коефіцієнт рівномірності опадів (K), який розраховується як функція часу концентрації, а також коефіцієнт зменшення площі для оцінки інтенсивності [85]:

$$K = 1 + \frac{t_c^{1,25}}{t_c^{1,25} + 14}. \quad (2.2)$$

2.1.3 Методи моделювання гідрографа вузла

Для моделювання гідрографів, що виникають під час природних паводків, були розроблені математичні формули, які дозволяють отримати синтетичні гідрографи на основі фізичних явищ. Зазвичай ці методи спрямовані на розрахунок тільки поверхневої складової гідрографа, не враховуючи величину базового стоку під час повені.

Найчастіше використовується метод, заснований на концепції одиничного гідрографу [86]. Він передбачає розрахунок поверхневого стоку, спричиненого 1 мм чистих опадів, рівномірно розподілених по басейну протягом заданого часового інтервалу. Метод полягає в отриманні стандартного гідрографа для кожного басейну, що формується внаслідок короткого зливу (тривалість від $1/3$ до $1/5$ t_c), і його адаптації до будь-якої події, пов'язаної з опадами, шляхом розбиття на інтервали. При цьому робляться такі припущення: постійна часова база, при якій зливи однакової тривалості створюють гідрографи з ідентичною часовою базою; афінність між інтенсивністю опадів і витратами на гідрографах; адитивність, де кілька базових гідрографів дорівнюють їх сумі.

Щоб отримати одиничний гідрограф безпосередньо з гістографа та гідрографічних записів кількох зливових подій, необхідно поділити поверхневий стік на кількість (мм) чистих опадів за інтервал часу.

Оскільки реальні дані часто недоступні, існують встановлені формули для розрахунку параметрів синтетичного гідрографа. Найбільш поширеними є:

- безрозмірний одиничний гідрограф SCS, заснований на безрозмірному гідрографі, отриманому шляхом аналізу невеликих сільських басейнів. Єдиним необхідним параметром є час запізнення до піку, який використовується для розрахунку часу до піку і пікової витрати;

- гідрограф миттєвої одиниці Кларка, який передбачає рівномірний розподіл одиниці опадів по басейну протягом нескінченно малого проміжку часу. Це метод, заснований на гіпотезі, що ІУН басейну є результатом

перетворення надлишкових опадів і їх спрямування для зберігання в басейні за допомогою гіпотетичної лінійної дамби;

- синтетичні одиничні гідрографи на основі характеристик басейну: такі як методи Снайдера і Грея;

- трикутний одиничний гідрограф Темеза, подібний до гідрографа SCS, але з побудовою на основі часу концентрації, з якого отримують час запізнення до піку, часову базу і піковий розряд.

Вищеописані методи та процедури розрахунків інтегровані в комп'ютерні програми, що з кінця 1960-х років спростили отримання синтетичних гідрографів з гієтографа, вимагаючи лише обмежену кількість додаткових даних про конфігурацію басейну для розрахунку характерних часів. Найбільш стандартною з них є програма HEC-1, яка використовує методологію одиничного гідрографа Кларка або кінематичні хвильові методи. Після кількох переглядів у 1970, 1973 та 1981 роках, перша версія для ПК була розроблена у 1984 році та оновлена у 1988 році з системою меню. Останніми роками була розроблена вдосконалена версія HEC-HMS. Моделюються такі процеси, як опади, перехоплення та інфільтрація, стік, а також розповсюдження та маршрутизація паводкових хвиль, що дозволяє розраховувати гідрографи в різних точках басейну.

Іншими важливими комп'ютерними програмами для гідрометеорологічного моделювання затоплення територій є: TR-20 і TR-55, засновані на методах SCS; SWMM (RUNOFF) Агентства з охорони навколишнього середовища США; MIKE 11 UHM (DHI); та DRM3 Distributed Routing Rainfall-Runoff Model, розроблена Геологічною службою США (USGS).

2.1.4 Одновимірні підходи для моделювання затоплення територій

Флювіальні процеси виникають внаслідок використання енергії води, яка переміщується під впливом сили тяжіння через відкриті канали та

адаптується до обмежень, що створюються її в'язкістю, тертям об дно річки і навантаженням від транспортуваного матеріалу. Оскільки вода є ньютонівською рідиною з відносно низькою змінюваністю напруги зсуву (τ), її кінематична в'язкість залишається майже незмінною. Виняток складають потоки з дрібнодисперсними матеріалами (наприклад, мулом), які можуть демонструвати псевдопластичну або в'язкопружну поведінку. У таких випадках деформація в потоці пропорційна напруженню зсуву, а динамічна в'язкість залежить від тиску і температури.

У спрощеній моделі, потік води можна вважати одновимірним, де глибина і швидкість змінюються тільки в поздовжньому напрямку русла, яке вважається приблизно прямим, а швидкість постійна в будь-якій точці поперечного перерізу. В цьому припущенні рух води у так званій "флювіальній фазі", сконцентрованої у неправильно призматичних колекторах, регулюється принципами Сен-Венана: неперервності та збереження імпульсу.

Принцип неперервності формулює співвідношення між притоком і відтоком води на замкненій ділянці, враховуючи зміни густини. Принцип збереження імпульсу визначає рівність між зміною імпульсу і дією зовнішніх сил на рідину.

Рівняння неперервності [87]:

$$A \cdot \frac{\delta v}{\delta x} + B \cdot v \cdot \frac{\delta y}{\delta x} + B \cdot \frac{\delta y}{\delta t} = 0, \quad (2.3)$$

де A – площа поперечного перерізу потоку, v – середня швидкість потоку, x – абсциса позиції поперечного перерізу в каналі, B – ширина водної поверхні на глибині y , t – час.

Структурна класифікація враховує відносну важливість сил інерції, в'язкості та гравітації відповідно до закону збереження імпульсу. Число Рейнольдса (Re) кількісно оцінює вплив сил інерції та в'язкості на різні потоки, за кількома характерними значеннями [87]:

$$R_e = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{v \cdot L}{\mu_c}, \quad (2.4)$$

де ρ – густина води, v – швидкість потоку, D – діаметр каналу, μ – динамічна в'язкість рідини, L – характерна довжина (в даному випадку для гідротехнічних споруд), а μ_c – кінематична в'язкість (10^{-6} м²/с при температурі 20°C).

Характеристики течії потоку в природних умовах можуть змінюватися від спокійних до турбулентних і наближатися до критичних рівнів. Швидкі течії зустрічаються рідше, оскільки висока швидкість спричиняє значні процеси ерозії та перенесення наносів, що веде до збільшення шорсткості дна та глибини, а також до зменшення нахилів і швидкостей. Це, як правило, призводить до стабілізації течії і повертає її до спокійного стану.

Рівномірна течія спостерігається, коли нахил русла дорівнює нахилу лінії енергетичного рівня, і всі інші члени рівняння збереження імпульсу вважаються незначними. У загальному випадку також передбачається, що потік є сталим, що означає, що лінія градієнта енергії, поверхня води та дно русла є паралельними.

Для опису потоку використовуються різні емпіричні формули, які дозволяють встановити співвідношення між потоком і глибиною на основі простих параметрів, таких як шорсткість дна. Однією з найвідоміших є рівняння Меннінга, яке, точніше, є рівнянням Стріклера-Меннінга і пов'язує швидкість з морфометричними параметрами каналу і коефіцієнтом шорсткості (n) [87]:

$$v = \frac{R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n}, \quad (2.5)$$

де v – середня швидкість потоку, R – гідравлічний радіус (A/P), S – нахил лінії енергетичної класифікації (що збігається з руслом), n – коефіцієнт шорсткості.

Безрозмірне число n , що є критично важливим для розрахунку витрат є табличним для різних типів річкових русел в залежності від шорсткості та

наявності перешкод для течії. Нещодавно були запропоновані альтернативи цьому коефіцієнту, які включають детальний мікротопографічний аналіз для оцінки шорсткості. Для природних каналів n зазвичай дорівнює приблизно 0,030, тоді як у нерегулярних каналах це значення може бути вдвічі більшим. Інші раціональні або емпіричні рівняння, що використовуються для розрахунків витрат і глибин у рівномірних режимах течії, включають: Рівняння Чезі (2.6) та Дарсі-Вейсбаха (2.7) [88]:

$$v = c \cdot \sqrt{R \cdot S}, \quad (2.6)$$

$$F_f = \frac{8 \cdot g \cdot R \cdot S}{v^2}, \quad (2.7)$$

де v – середня швидкість потоку, c і F_f – коефіцієнти перерізу, R – гідравлічний радіус (A/P), S – нахил лінії енергетичної класифікації, g – гравітаційне прискорення

Для оцінки глибин при моделюванні нестационарних течій, тобто течій, у яких швидкість змінюється з часом, використовуються різноманітні програмні засоби, які розв'язують рівняння Сен-Венана за допомогою методу характеристик. До таких програм відносяться [88]:

- FLDWAY та її попередники DWOPER (NETWORK) і DAMBRK, які базуються на одновимірних рівняннях Сен-Венана і були розроблені Національною метеорологічною службою США (Fread and Lewis, 1988);

- SWMM (розроблений Агентством з охорони навколишнього середовища США та Університетом штату Орегон) і MIKE 11 HD (розроблений Датським гідравлічним інститутом, Данія). Ці моделі орієнтовані на аналіз проблем якості води та водних ресурсів відповідно, але також містять модулі для аналізу нестационарних течій, такі як EXTRAN;

- ISIS (HR Wallingford, Великобританія);
- FEQ 8.92 та FEQUTL 4.68 (Геологічна служба США);
- UNET (Інженерний корпус армії США).

2.1.5 Двовимірні підходи для моделювання затоплення територій

Під час повені потік води часто виходить за межі односпрямованої центральної лінії основного русла, розливається на береги та заплаву. У таких умовах спрощення потоку до одного виміру є недостатнім для точного моделювання вторинних потоків, перпендикулярних до основного напрямку течії русла. Для ситуацій, таких як злиття річок, течії навколо споруд, складні канали, яскраво виражені кривизни або міські умови, де одновимірне моделювання є недостатнім, доцільніше використовувати двовимірне моделювання. Коли деякі області потоку можна спростити до 1D, а інші вимагають 2D моделювання, об'єднання обох моделей дозволяє досягти найкращих результатів, забезпечуючи відповідність кожного спрощення до конкретних умов. Наприклад, в дослідженнях потоків у міських умовах, де необхідно враховувати каналізаційні системи та водостоки, або в ситуаціях, де моделюються елементи, менші за розмір комірки, такі як зрошувальні канали та невеликі канали. У випадках, коли річкові потоки є фактично тривимірними, використання 2D спрощення є прийнятним, якщо горизонтальні і вертикальні компоненти варіацій невеликі, а вертикальний розподіл тиску є гідростатичним. В таких ситуаціях можна застосовувати вертикально інтегровані рівняння мілководдя. Безперервність [89]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0. \quad (2.8)$$

Динаміка [89]:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{g}{R} \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{g}{R} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad (2.10)$$

де u і v – горизонтальні компоненти швидкості, x і y – відповідні напрямки, h – глибина води, g – прискорення сили тяжіння, R – коефіцієнт шорсткості дна у відповідному напрямку.

Рівняння мілководдя є нелінійними, а система рівнянь є гіперболічною, що може призвести до виникнення розривів у розв'язку, таких як гідравлічні стрибки або хвильові фронти. Для вирішення таких задач використовуються методи чисельної апроксимації, які застосовують різні чисельні схеми, зокрема методи скінченних різниць, скінченних елементів або скінченних об'ємів. Хоча двовимірні моделі зазвичай орієнтовані на регулярні сітки з двома напрямками обчислень (x та y), існують моделі з використанням нерегулярних сіток, які дозволяють значно зменшити похибку обчислень для потоків, що мають нахил до базового елемента або пікселя. Іншими рішеннями є моделі з декількома сітками або криволінійними сітками; для морфодинамічного аналізу річок використовуються гнучкі сітки або сітки, що змінюються в часі.

У сфері гідродинамічного моделювання існує безліч програм, що здійснюють двовимірне гідродинамічне моделювання для вільних поверхневих потоків. Деякі з них спеціалізуються на моделюванні заплав або алювіальних віял. Серед найбільш відомих і доступних моделей можна відзначити Sobek, Mike21, Guad2D, TUFLOW, RMA2, FESWMS та River2D. Федеральне агентство з надзвичайних ситуацій (FEMA) також включає до свого «білого списку» деякі 2D гідравлічні моделі для прогнозування повеней і картографування ризиків повеней, зокрема TABS (пакет, що включає RMA2, RMA4, RMA10, SED2D та GFGEN), MIKE FLOOD (комбінація Mike21 та Mike11) та FLO-2D. Для деяких конкретних випадків FEMA допускає також моделі S2DMM і DHM21. Основними відмінностями між цими моделями є тип сітки, метод чисельної апроксимації, можливість інтеграції з іншими моделями, зручність для користувача, швидкість обчислень, обробка контурних умов, кількість і якість представлених результатів, тощо.

Sobek, розроблений Delft Hydraulic (Нідерланди), є одним з найбільш розповсюджених інструментів для аналізу гідравлічних систем поверхневих вод. Він складається з понад двадцяти модулів для вирішення різних проблем, пов'язаних з водою, включаючи 1D, 2D та 1D+2D моделювання річок, естуаріїв, міських каналів, дренажних систем, якості води, морфодинаміки річок, проникнення солей, транспортування наносів тощо.

MIKE FLOOD, розроблений DHI Water & Environment (Данія), з 2008 року є інтегрованим 1D-2D інструментом для моделювання повеней. Лінійка продуктів «Майк» включає більше десяти інструментів для розподіленої гідрології, гідравліки міських дренажних систем, морфодинаміки річок, транспортування наносів, аналізу і прогнозування в реальному часі, якості води та ін.

Guad2D, розроблений Університетом Сарагоси і проданий компанією INCLAM (Іспанія), є інструментом 2D гідравлічного аналізу з декількома модулями, що забезпечують високу ефективність обчислень порівняно з іншими інструментами, хоча він не має 1D-зв'язку [90].

Всі вищеописані моделі розв'язують рівняння мілководдя у двовимірному просторі. Однак існують спрощення (ігнорування менш значущих факторів), які можуть бути корисними для економії обчислень у деяких випадках. Такі спрощення, хоча й застарілі, включають кінематичну хвильову модель і модель дифузних хвиль. У кінематичній хвильовій моделі енергетичний нахил дорівнює нахилу дна каналу, а в моделі дифузних хвиль нахилу водної поверхні. В роботі [91] автори пояснили вплив цих двох спрощень з точки зору зміни глибини в часі та просторі. Кінематична хвиля створює чистий ефект трансляції, де існує лише одне значення глибини для даного розряду, тоді як дифузійна хвиля створює ефект ослаблення під час трансляції і може бути кілька значень глибини потоку для однакових значень розряду. Це вказує, що кінематична хвиля може бути корисною для крутих схилів (до 0,2%), якщо не виникають ситуації з територіальною динамікою, в той час як дифузійна хвиля краще підходить для річок.

2.2 Геолого-геоморфологічні методи

Геоморфологія досліджує форми рельєфу Землі, їх просторові та часові зміни, а також процеси, що формують і модифікують ці форми, включаючи пов'язані з ними відкладення та поверхневі утворення. Морфологія річок відіграє ключову роль у формуванні затоплень територій, проявляючись у трьох основних просторових сферах: водозбірний басейн, гідрографічна мережа та окремі ділянки річок.

По-перше, водозбірний басейн визначає генезис і тип затоплень територій через фізико-географічні та морфометричні аспекти рельєфу. Склад рельєфу, включаючи висоту і розташування, може впливати на метеорологічні умови, такі як інтенсивні та рясні опади. Наприклад, басейни, що межують з гірськими хребтами, можуть зазнавати орографічних опадів через блокування атмосферної циркуляції. Орієнтація басейну в напрямку атмосферних фронтів може посилити опади.

По-друге, структура річкової мережі на регіональному та місцевому рівнях впливає на гідравліку річок і розподіл паводкових витрат. Морфологічні характеристики річкових русел, такі як їх форма і розміри, визначають динаміку флювіальних процесів і впливають на форму гідрографа, що характеризує паводкові витрати.

По-третє, на локальному рівні детальні характеристики окремих ділянок річок, включаючи їх мікроморфологію, мають значний вплив на формування специфічних моделей гідравлічного потоку та затоплень територій [92].

Геоморфологічні фактори, що визначають затоплення територій, можна досліджувати з таких перспектив: морфографічної (форми рельєфу), морфодинамічної (процеси формування рельєфу та їх результати) і морфолого-еволюційної (зміни рельєфу з часом). Для кількісного опису морфологічних факторів використовуються різні морфометричні індекси,

такі як площа водозбірного басейну, периметр, середня висота, довжина водозбору та амплітуда рельєфу.

Морфологія річок традиційно асоціюється з характеристиками затоплень територій, зокрема, з типом річок. Це стосується не тільки вигляду русел, але й пов'язаних з ними елементів, таких як рівнина, балки, долина та відклади. Початковим критерієм для класифікації річок є врахування характеристик матеріалу, що формує їхнє русло. Корінні річки, вкорінені в гірські породи, характеризуються динамікою і геометрією русла, визначеною характером порід субстрату, уламками, що падають на нього, а також потоком води. На відміну від корінних річок, річки з алювіальним руслом мають русла, врізані в самі наноси, що переносяться річкою, тому геометрія їхніх русел залежить від руху води та наносів. Корінні канали набагато стабільніші в часі, тоді як морфологія та положення алювіальних річок змінюються швидше через динамічні процеси ерозії та відкладення.

Для річок з алювіальними руслами запропоновано багато класифікацій, які можна згрупувати у дві основні групи: геоморфологічні, що зосереджуються на структурі русел, використовуючи такі параметри, як синусоїдальність, кількість русел та звивистість; і седиментологічні, що пов'язують морфологію потоку з його динамікою (наносами, стабільністю) та характерними послідовностями відкладень.

В останні десятиліття обидві системи класифікації зблизилися, що призвело до похідних класифікацій, які інтегрують обидва критерії. Хорошими прикладами є класифікації Раства, що є функцією синусоїдальності та кількості каналів, і Міолла, що є функцією синусоїдальності та переплетення каналів. Обидві включають чотири основні типи: прямі, звивисті, переплетені та анастомозовані. Іншою альтернативою є система класифікації Росгена, яка залежить від нахилу русла, матеріалу русла, співвідношення ширини і глибини, звивистості і коефіцієнту заглиблення.

Щодо взаємозв'язку типу русла з типами і наслідками затоплень територій, можна визначити базову схему затоплень територій для кожного

типу потоку. Затоплення на плетених річках пов'язані з послідовним заповненням руслової системи через з'єднання ниток суміжних потоків, тоді як меандруючі річки асоціюються зі швидким заповненням заплави та сувої балки. Тип потоку також впливає на гідрограф затоплення територій, вирівнюючи його у випадку звивистих і анастомозуючих річок (флювіальні затоплення) або швидко поширюючи у випадку прямих річок (торентіальні затоплення територій).

Важливим аспектом, пов'язаним з типом русла, є стабільність русла в часі та типи морфологічних змін, які можуть відбуватися. Прямі річки зазвичай дуже стабільні через наявність глинистих берегів, що не піддаються ерозії. Якщо є донні наноси, вони можуть мігрувати вниз за течією, піддаючи береги ерозії. У звивистих і анастомозуючих річках, де переважають завислі наноси, стійкість берегів також висока, але можуть відбуватися переміщення або бічна міграція наносів, що призводить до обвалення берегів. Аллювіальні річки ще більш нестабільні через постійну міграцію тальвегів і балок, що спричиняє значну ерозію берегів та авульсію, або раптову зміну русла на нове положення.

Збільшення загальної кількості наносів і частки донних наносів у поєднанні з нестабільними процесами, характерними для меандруючих річок, створюють інші типи нестабільності в руслі. Міграція руслових бар'єрів спричиняє постійні зміни потоку і, як наслідок, зміни в місцях розмиву берегів.

Встановлено тісний взаємозв'язок між морфометричними параметрами річок та їх гідрологічними наслідками. Це включає вплив довжини потоку (L) та ухилу русла (S_0) на характерні часи, отримані за допомогою синтетичних одиничних гідрографів.

Час відставання до піку, розрахований за гідрометеорологічною методикою [87], залежить виключно від морфометричних параметрів потоку, у якому поширюється затоплення територій, та кривої номера водозбору.

Середній час (у годинах), розрахований за рівнянням, запропонованим Інженерним корпусом армії США, залежить від довжини, нахилу та відстані вздовж головного русла, від точки, найближчої до центру ваги басейну до місця виходу з басейну (L_c , в км) [87]:

$$T_m = 0,164 \left(\frac{L \cdot L_c}{S_0^{0,5}} \right)^{0,38}, \quad (2.11)$$

де L – довжина потоку; S_0 – ухил русла.

Час концентрації, запропонований в роботі [85] на основі порівняння різних іспанських водозборів, також залежить від довжини головного русла та його нахилу [85]:

$$T_c = 0,3 \left(\frac{L \cdot L_c}{S_0^{0,25}} \right)^{0,76}. \quad (2.12)$$

Басейновий лаг (t_p , у годинах) за гідрографом Снайдера залежить від довжини головного потоку (L , у км), відстані від витoku басейну до його центроїда (L_c) та коефіцієнта, що базується на сусідніх інструментальних басейнах (C_t) [87]:

$$T_p = 0,75 \cdot C_t (L \cdot L_c)^{0,3}. \quad (2.13)$$

2.3 Метод комп'ютерного моделювання затоплення територій при виникненні надзвичайної ситуації на гідроелектростанції

Протягом багатьох століть людство докладає величезних зусиль для захисту від повеней, але не досягає успіху в цій справі. Збитки від повеней продовжують зростати. У другій половині минулого століття актуальність цієї проблеми зростає приблизно в десять разів. Небезпеку становлять зони затоплення в низинних районах, де зруйновані дамби та гідротехнічні системи [93, 94]. Безпосередню небезпеку становить швидкий і сильний рух води, який спричиняє пошкодження, підтоплення та руйнування будівель [95], споруд і може призвести до екологічних [96], техногенних катастроф

[97]. Внаслідок великої швидкості та об'єму води, що рухається, можуть виникати різні руйнування будівель та жертви серед населення. Висота і швидкість хвилі прориву залежать від розмірів руйнування гідротехнічної споруди, перепаду висот між головною і хвостовою водою. Для рівнинної місцевості швидкість хвилі прориву коливається від 3 до 25 км/год, в гірській місцевості вона досягає 100 км/год. Зазвичай, значна частина населеного пункту через 15-30 хвилин виявляється затопленою шаром води товщиною від 0,5 до 10 м і більше [98].

Для ефективного застосування сил і засобів аварійно-рятувальних формувань необхідна достовірна інформація про наслідки прориву напірного фронту водосховища. Ця інформація отримується в найкоротші терміни і з максимальною точністю. Тому, необхідно спільно використовувати прогнозування параметрів територій затоплення та проводити заходи з розрахунку площ затоплення територій. За комплексного вирішення цих завдань людські жертви можуть бути зведені до мінімальних значень за рахунок більш ефективних, цілеспрямованих і своєчасних дій аварійно-рятувальних формувань [99].

Модель Сен-Венана, заснована на системі двовимірних рівнянь мілководдя, була представлена в роботі [100]. Ця модель широко використовується для моделювання розповсюдження паводків на широких і плоских заплавах. Об'єктом моделювання була Бельковська ГЕС та територія навколо берегів водосховища. Розрахунок параметрів Бельковська гідроелектростанції (ГЕС) використовується для оцінки параметрів паводкової хвилі. Це дозволяє ідентифікувати та картографувати зони затоплення та аналізувати ризики затоплення територій. Запропоновано використовувати математичну модель двовимірного потоку води на вільній поверхні, залежного від часу, для чисельного моделювання паводку. На картах небезпеки затоплення територій представлені результати розрахунків у зонах затоплення. Карти були використані місцевою владою та власником дамби для управління ризиком повеней, пов'язаних з експлуатацією

гідроелектростанцій на річці Радуня. Запропоновано імітаційну модель HES-Res Sim, засновану на щомісячних спостереженнях за притоком води з приток до водосховища [71]. Для оцінки ефективності моделі використовуються дві статистичні метрики: коефіцієнт кореляції та ефективність коефіцієнта Неша-Саткліфа. Тестування проводилось на Доканській греблі для вивчення експлуатаційної поведінки водосховища та моделювання системи в реальному часі. Автори роботи [101] описують комбінований підхід гідрологічного та гідравлічного моделювання для оцінки паводконебезпечних територій. Цей метод був протестований для річки По (Північна Італія). Новий набір даних про опади для Італії базується на гідрологічній моделі, створеної за допомогою GRIPHO. Вона допомагає розрахувати витрату води в річці та стік. Це дозволило розрахувати карту небезпеки повеней з роздільною здатністю 90 м. Запропонований підхід забезпечує хороший потенціал для подальшого використання, наприклад, для точного аналізу небезпеки повеней за майбутніх кліматичних умов.

Недоліком вищезгаданих досліджень є те, що для отримання точної імітаційної моделі підтоплення територій не використовуються: геометричний підхід, гідрологічний підхід, одновимірна та двовимірна системи рівнянь Сен-Венана.

В останні роки було проведено багато досліджень методів контролю та прогнозування затоплень територій з використанням дистанційного зондування та ГІС-технологій. В роботі [98] автори розробили методологію, спрямовану на полегшення громадського розуміння причинно-наслідкових зв'язків, еволюції та результатів селевих потоків. Використовуючи 3D моделювання та інтеграцію суспільних знань у процес відбору об'єктів сцени, автори розробили метод, який сприяє покращенню сприйняття ризиків надзвичайних ситуацій громадськістю. Це відображається у здатності громадськості адекватно сприймати й реагувати на потенційні небезпеки селевих потоків, що є ключовим для ефективного управління ризиками природних катастроф [102]. Автори представили передові методи та

технології, спрямовані на картографування водних ресурсів, прогнозування повеней та управління ризиками. Вони використовували дистанційне зондування, геоінформаційні системи та гідрологічні моделі для аналізу супутникових вимірювань кількості опадів, моделювання стоку та картографування водних об'єктів і повеней. У дослідженні, проведеному автором в роботі [103], розглянуто застосування дистанційного зондування та геостатистики для моніторингу міських водних ресурсів. Виявлено, що ці методи можуть сприяти вирішенню проблем водних ресурсів у містах, що стикаються з урбанізацією та підкреслено потенційну користь використання відповідних технологій для покращення стану міських водних ресурсів.

Автори в роботі [104] розробили метод прогнозування повеней, що виникають раптово, використовуючи гідрологічні та морфологічні дані річкових басейнів із застосуванням методів дистанційного зондування та ГІС. У дослідженні [105] використано методи ГІС для аналізу та планування евакуації в зонах, схильних до повеней, у муніципалітеті Накхонсі-Тхаммарат. Результати надали важливу інформацію для прийняття рішень та зменшення ризику повеней. Основні висновки включають визначення факторів, що викликають повені, оцінку вразливості та встановлення оптимальних маршрутів евакуації.

Проблема прориву дамб була предметом численних досліджень, зосереджених на статистичних, експериментальних і чисельних рішеннях. Авторами [105], розробили емпіричні формули, засновані на статистичному аналізі минулих проривів дамб із надійними даними для оцінити такі параметри, як середня ширина прориву, піковий розряд і час руйнування для потенційного прориву дамби.

Дослідження проривів дамб використовувались для аналізу гідравлічних параметрів, таких як геометрія прориву, динаміка річкового стоку з плином часу, швидкість та глибина потоку, а також для перевірки чисельних моделей, пов'язаних з проривами дамб [106, 107]. В роботі [108] автори експериментально досліджували раптові прориви дамби в

горизонтальному прямокутному руслі за різних глибин водосховища та вологих і сухих умов нижньої течії. Вони порівняли придатність класичних аналітичних розв'язків для умов різних стадій прориву.

Для передбачення географічного та часового розподілу паводкових вод, а також оцінки збитків і небезпек, що з ними пов'язані, потрібно розробляти математичні моделі, які відтворюють гідрологічні та гідравлічні процеси, що спричиняють повені [109]. Один із найбільш поширених [110] підходів є на основі подій, що включає створення моделі зони затоплення територій для конкретної події та використання її для прогнозування наслідків цієї події. Цей підхід може надати детальну інформацію про зону затоплення територій, але він може бути витратним та непридатним для масштабних програм або реального часу. Інший метод – це підхід безперервного моделювання, який передбачає прогнозування ймовірності різних сценаріїв затоплення, що корисно для довгострокового планування та прийняття рішень. Незалежно від використовуваної моделі або методу, точність і надійність моделей затоплення територій залежать від калібрування та доступності даних, таких як гідрологічні, гідравлічні, метеорологічні та дані про землекористування. Для побудови реалістичних моделей повені важливо мати надійні гідрологічні дані, а також урахувати складність та вимоги до обчислень, що можуть потребувати значних обчислювальних ресурсів. Для вирішення цих проблем застосовуються різноманітні методи асиміляції даних та оптимізації моделі, включаючи Байєсівський висновок, генетичні алгоритми та оптимізацію роїв частинок [111].

Ще одним ключовим аспектом у моделюванні зони затоплення територій є оцінка невизначеності. Для вирішення цього було розроблено кілька методів вимірювання невизначеності, таких як Байєсівський висновок, моделювання Монте-Карло [112] та ймовірнісний аналіз чутливості [113]. Ці підходи допомагають у кращому управлінні ризиками зон затоплення територій та прийнятті рішень, шляхом оцінки ймовірності різних сценаріїв

повені. Математичне моделювання, статистичні методи, а також гідрологічні та гідравлічні концепції знаходяться у межах міждисциплінарної сфери моделювання повеней. Навіть з усіма викликами, моделювання повеней в останні роки досягло значних успіхів і залишається важливим інструментом для зменшення ризику повеней і прийняття обґрунтованих рішень. Важливо зробити моделі більш точними та надійними, щоб краще розуміти та передбачити поведінку та наслідки затоплення територій, а також підтримувати ефективні методи управління ризиками затоплення територій та пом'якшення їх наслідків.

З іншого боку, в останні роки з'явилися методи глибокого навчання. Алгоритми семантичної сегментації, засновані на згорткових нейронних мережах (CNN), отримали широке визнання завдяки своїм відмінним результатам і простоті навчання. Отже, вони найбільш широко використовуються для аналізу супутникових зображень. Це дозволило розробити стратегії використання супутникових зображень для різних цілей, таких як класифікація земельного покриття, вилучення водойм, картування повеней тощо. В роботі [114] запропоновано модель FCN для картографування областей затоплення територій на основі 2D супутникових знімків Landsat. Авторами [115] була вдосконалена мережа з повністю зв'язаних шарів на базі моделі VGG для вилучення областей затоплення територій зі знімків, отриманих безпілотними літальними апаратами. Запропонована модель, навчена на основі CNN з використанням 100 вручну позначених зображень, досягла точності понад 95% при виявленні затоплених ділянок.

Реалізація методу складається з наступних етапів:

- розв'язання одно-, двовимірних систем рівнянь Сен-Венана;
- геометричний підхід, заснований на аналізі триангуляційної моделі поверхні;
- гідрологічний підхід використовується для аналізу на макрорівні, тобто для територій площею в десятки і сотні квадратних кілометрів.

Вихідні дані для розрахунків та візуалізації результатів:

- HERE Maps API [116];
- обсяг водосховища – W , м³;
- глибина води перед греблею (глибина прорану) – H , м;
- ширина прорану або ділянки переливу води через гребінь греблі – B , м;
- середня швидкість руху хвилі прориву (попуску) – V , м/с;
- відстань від греблі (водойми) до створу – R , км.

Структурна схема моделі затоплення території наведена на рис. 2.2. Для розв'язання поставленої задачі потрібні дані про гідровузол і територію, розташовану вище (водосховище) і нижче за течією річки. Для цього територія нижче за течією річки розбивається на так звані створи – перерізи, перпендикулярні до течії річки з кроком 5 км. У відповідних перерізах визначаються необхідні параметри. Найважливішими з них є відстань від гідровузла, відмітки горизонталей рельєфу та відстань між ними. Важливими для гідровузла і водосховища є дані про об'єм водосховища, ширину і глибину водосховища в греблі і хвостовому б'єфі.

Дані про конструкцію гідроагрегату були взяті із засобів масової інформації. Крім того, для забезпечення максимальної безпеки населення необхідно розглянути найгірший варіант розвитку подій, щоб уникнути збитків. В якості інструменту прогнозування та оцінки масштабів затоплення територій використовується геоінформаційна система.

На рис 2.3 представлено блок-схему програмного алгоритму, запропонованого в роботі.

Гідротехнічні споруди (ГТС) – це інженерні споруди, призначені для використання водних ресурсів або боротьби з руйнівною дією води. До основних гідротехнічних споруд, руйнування (прорив) яких призводить до гідродинамічної аварії (ГА), належать греблі (шляхопроводи тощо), водозабірні та водозбірні споруди (шлюзи).

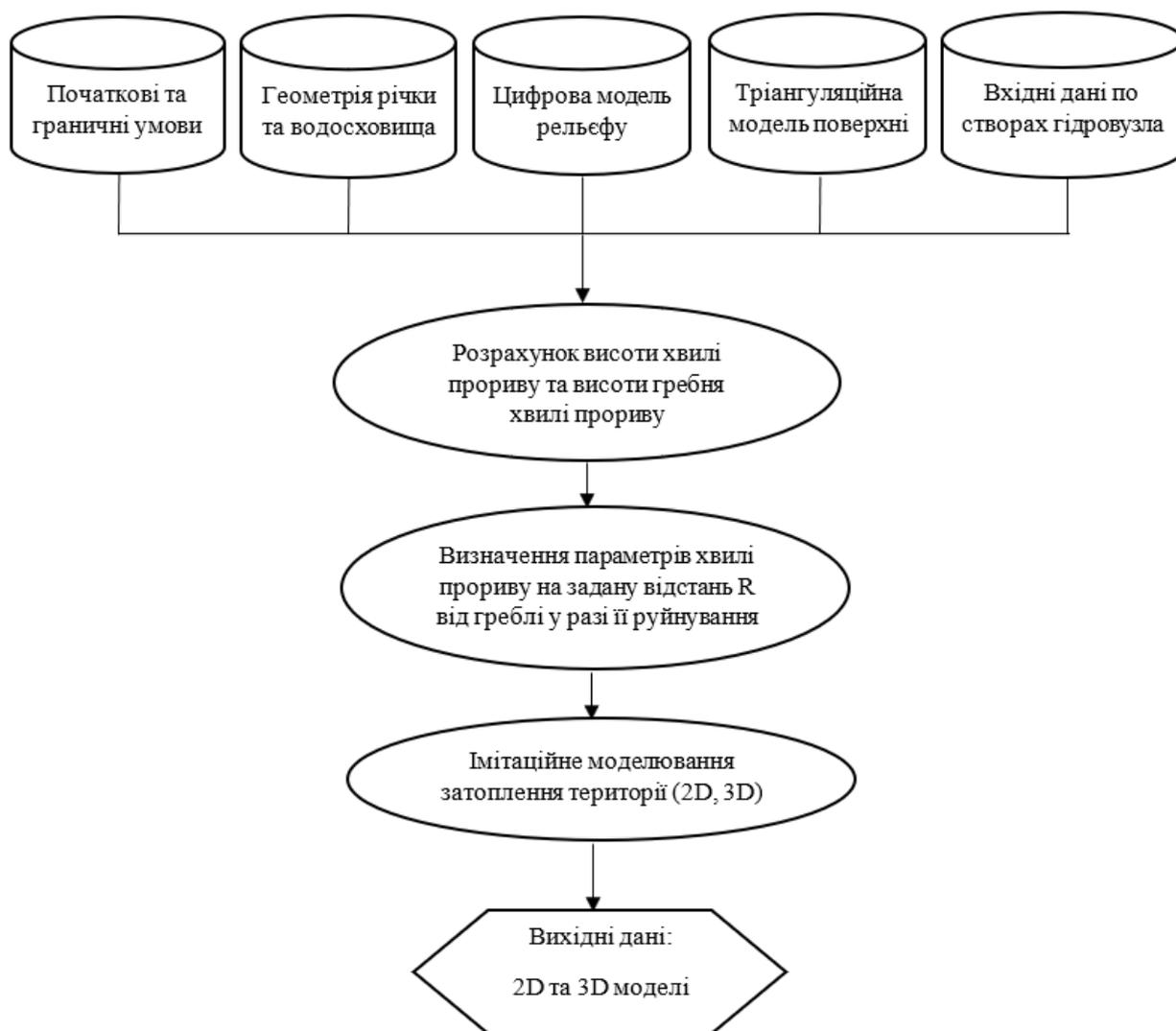


Рисунок 2.2 – Структурна схема методу затоплення територій

Греблі – це гідротехнічні споруди напірного типу (штучні греблі) або природні утворення (природні греблі), які створюють різницю рівнів води від русла річки. Отже, гребля (шлюз, естакада тощо) перегороджує річку або інший стік, щоб підняти рівень води перед нею, створити напір води на її площу і утворити водосховище.

Штучні греблі – це гідротехнічні споруди, створені людиною для своїх потреб і включають греблі гідроелектростанцій, водозаборів, іригаційних систем, дамби, мости, гаки тощо. За висотою греблі поділяються на низьконапірні до 10 м, середньонапірні від 10 до 50 м та високонапірні понад 50 м. А залежно від використовуваних будівельних матеріалів розрізняють бетонні, залізобетонні, гравітаційні, контрфорсні, арочні, кам'яні, ґрунтові

(дамби тощо) та дерев'яні дамби. Перед греблею вода накопичується вище за течією, утворюються штучні та природні водойми.

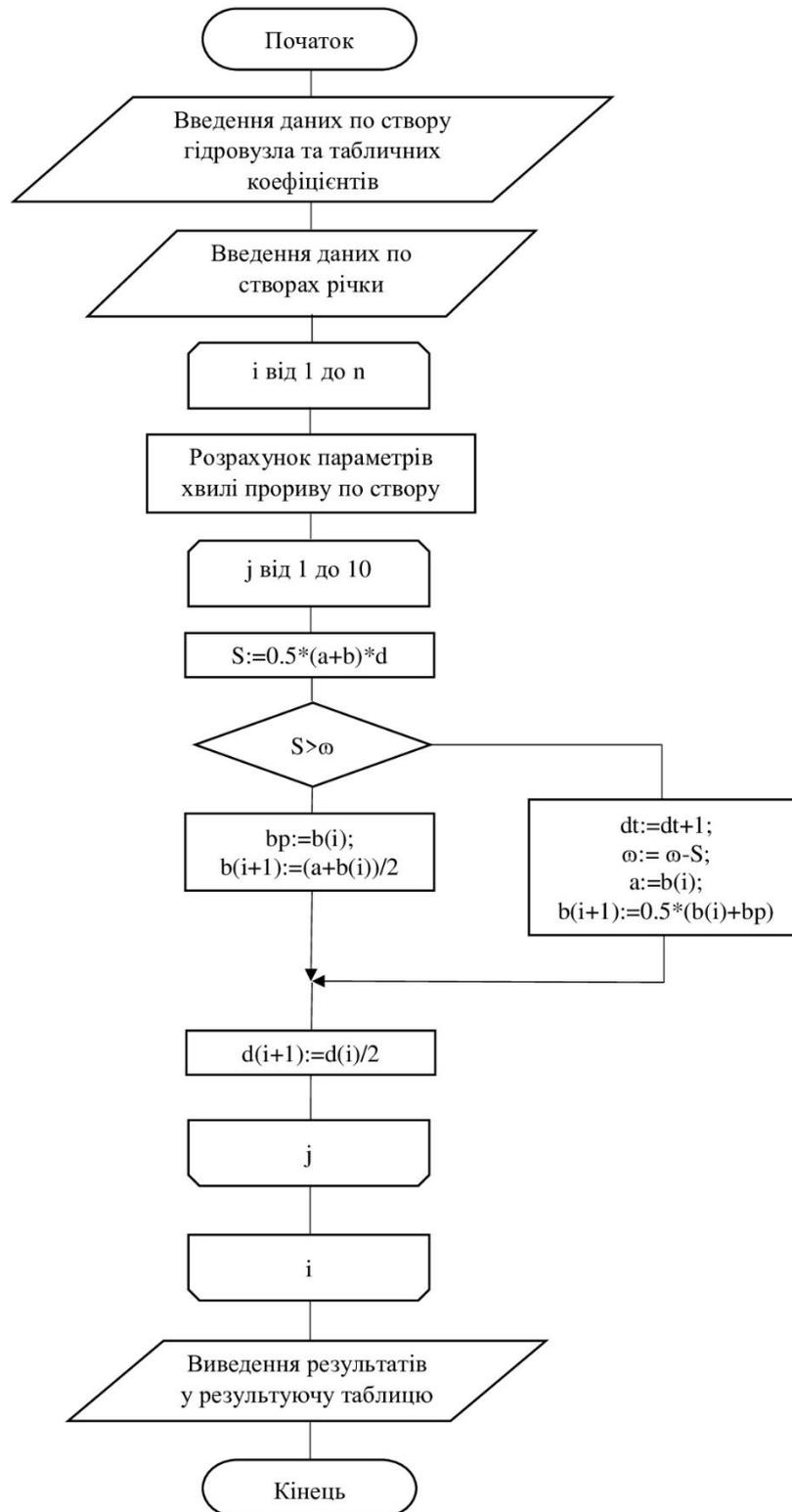


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритму розрахунку параметрів зони затоплення територій

Ділянка річки між двома сусідніми греблями на річці або ділянка каналу між двома шлюзами називається фунтом каналу. Гідравлічний ухил річки – це перевищення (в метрах) висоти рівня річки на 1000 м довжини. Частина річки, що знаходиться вище опорної споруди (греблі, шлюзу), називається верхнім б'єфом греблі, а частина річки, що знаходиться нижче такої споруди, – нижнім б'єфом. Остов греблі утворює нульовий б'єф. Висота рівня води у верхньому б'єфі греблі – це рівень води у водосховищі.

Причинами руйнування гідротехнічної споруди можуть бути такі природні явища або стихійні лиха, як землетруси, обвали, зсуви, паводки, ерозія ґрунтів, урагани тощо; техногенні фактори – руйнування конструкцій, експлуатаційні та технічні дефекти або помилки проектування, порушення режиму водозбору, військові дії тощо.

Початковою фазою ГА є прорив греблі, який є процес утворення прорану та некерованого потоку води водосховища з верхнього б'єфу через проран у нижній б'єф. У фронті потоку води, що спрямовується в проран, утворюється хвиля прориву.

Проран – вузька протока в тілі (насипу) греблі, косі, мілини, в дельті річки, або спрямлена ділянка річки, що утворилася в результаті розмиву закруту в повінь. Хвиля прориву – хвиля, що утворюється у фронті потоку води, що проходить в проран, що має значну швидкість руху і володіє великою руйнівною силою.

Отже, вражаюча дія хвилі прориву ГА пов'язана з поширенням із великою швидкістю води, що створює загрозу виникнення надзвичайної ситуації. Вражаючий чинник ГА – хвиля прориву гідротехнічної споруди. Основними параметрами її дії є швидкість, висота і глибина хвилі прориву, температура води, час існування хвилі прориву.

За своєю фізичною природою хвильовий прорив – це рух водного потоку, при якому ширина, глибина, поверхня стелі та швидкість течії змінюються в часі (рис.2.4). Висота хвилелому і швидкість руху залежать від об'єму і глибини водосховища; площі водного дзеркала; розмірів

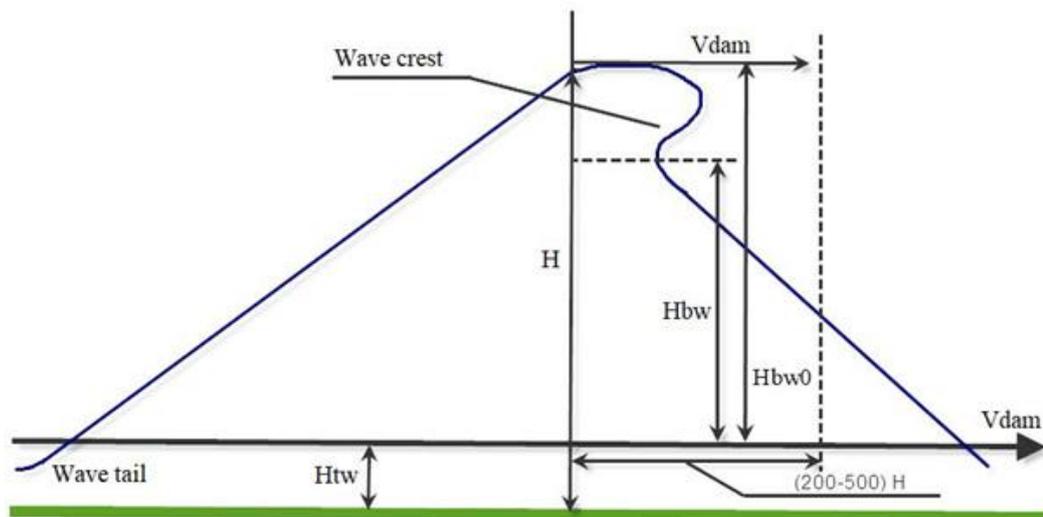
замикаючого каналу; перепаду висот головних і хвостових вод; гідрологічних і топографічних умов русла і заплави річки. На ділянці нульового б'єфу (будівництво греблі) величина хвильового опору (H_{bw0}) визначається за формулою [117]:

$$H_{bw0} = (8.42 \cdot \ln H)^{1/2.126} \cdot \sqrt{H_{tw}}, \quad (2.14)$$

де H – глибина водосховища в греблі, м; $\gamma = 0,5772$ – стала Ейлера; H_{tw} – висота хвостового б'єфу, м.

Відповідно, висота гребеня хвилі прориву (H_{bw}) (рис. 2.4) становить [117]:

$$H_{bw} = (8.42 \cdot \ln H)^{1/2.126} \cdot (1 + \gamma / 2.126 \cdot \ln H) \cdot \sqrt{H_{tw}}. \quad (2.15)$$



Легенда: V_{dam} – швидкість гребеня хвилі, м/с; H_{bw0} – висота хвилі прориву, м; H_{bw} – висота гребеня хвилі прориву, м; H – глибина водосховища в греблі, м; H_{tw} – висота хвостового б'єфу, м

Рисунок 2.4 – Хвиля прориву та її сутність

Зазвичай величина хвилі прориву знаходиться в межах 2-12 м і може досягати 10-30 м. Швидкість поширення хвилі прориву становить 3-25 км/год, а для гірських і передгірських районів - до 100 км/год. Швидкість хвилі прориву руху становить $V=2,5-5$ м/с і приймається для зон катастрофічного затоплення територій і небезпечного затоплення територій, а для зон можливого затоплення $V=1,5-2,5$ м/с. При цьому статичний тиск

водного потоку становить не менше 20 кПа з тривалістю дії не менше 0,25 години.

Характер впливу на об'єкт визначається такими факторами, як гідродинамічний напір водного потоку; висота, глибина і швидкість водного потоку; рівень і час затоплення територій; деформація русла річки; забруднення гідросфери, ерозія, перенесення ґрунтів. Основним наслідком гідродинамічної аварії є катастрофічне затоплення територій.

Катастрофічне затоплення це стихійне лихо внаслідок гідродинамічної аварії, яке є наслідком руйнування греблі і полягає у швидкому затопленні хвилию прориву нижче розташованої території та виникненні повені. Наступними параметрами катастрофічного затоплення територій є:

- максимально можлива висота і швидкість хвилі прориву;
- розрахунковий час прибуття хвилі прориву у відповідний населений пункт);
- максимальна глибина затоплення територій;
- тривалість затоплення територій;
- в межах зони можливого затоплення.

Катастрофічна повінь рухається зі швидкістю хвилі прориву і призводить (через деякий час після прориву греблі) до затоплення великих територій шаром води 0,5-10 м. При цьому утворюються зони затоплення. Зона затоплення зруйнованої ГЕС це частина річки (або озера, водосховища), що прилягає до території, яка утримує воду. Наслідки руйнування ГЕС поблизу можливого розливу води можуть призвести до виникнення зони катастрофічного затоплення територій. Частина зони затоплення, в межах якої поширюється хвиля прориву, викликає масову загибель людей, руйнування будівель і споруд, знищення інших матеріальних цінностей. Вона називається зоною катастрофічного затоплення. На її зовнішніх межах висота гребеня хвилі прориву (H_{bw}) перевищує 1 м (рис. 2.4), а швидкість її руху - понад 10 м/с. Час, протягом якого затоплені ділянки можуть перебувати під поверхнею, коливається від 4 годин до

декількох діб. Параметри зони затоплення територій залежать від розмірів водосховища, напору води та інших параметрів конкретного гідровузла, а також гідрологічних і топографічних особливостей місцевості.

Основними факторами катастрофічного затоплення територій є руйнівна хвиля прориву, водний потік і спокійні води, що затопили територію місцевості та об'єкта. Вплив хвилі прориву на людей подібний до впливу ударної хвилі ядерного вибуху. Суттєві відмінності між цими факторами полягають у значно меншій швидкості та більшій щільності речовини у хвилі прориву. Тому, визначимо параметри хвилі прориву (спаду) на заданій відстані R від дамби у випадку її руйнування.

Нижче наведено послідовність розрахунків для математичної моделі методу.

Час наближення хвилі прориву (викиду) на задану відстань R (до цілі) дорівнює [117]:

$$t_{bw} = \frac{R}{3600 \cdot V}, \text{ год.} \quad (2.16)$$

Для зон надзвичайно небезпечного затоплення приймаються значення $V=2,5-5$ м/с; для зон можливого затоплення – $V=15-24$ м/с.

Висота хвилі руйнування (падіння) h на відстані R від об'єкта становить [115]:

$$h = m \cdot H, \text{ м,} \quad (2.17)$$

де m – коефіцієнт, що залежить від відстані ГЕС до об'єкта.

Час спорожнення водосховища знаходиться за формулою:

$$T = \frac{W}{3600 \cdot N \cdot B}, \text{ год,} \quad (2.18)$$

де N – максимальна витрата води на 1 м ширини каналу перекриття

Час проходження хвилі прориву (викиду) t на заданій відстані до об'єкта R становить:

$$t = m_1 \cdot T, \text{ год,} \quad (2.19)$$

де m_1 – коефіцієнт, що залежить від відстані до греблі (водосховища).

Вода буде витікати з водосховища до тих пір, поки весь об'єм води не буде вичерпаний. Нехай об'єм води в нормальному стані русла є незмінним, оскільки вода в річці тече постійно і не може повністю вичерпатися. Таким чином, розрахунок буде проводитись тільки для об'єму водосховища. Вода з водосховища, спрямована в канал закриття в режимі прориву, пройде через площину за розрахунковий час t (б). Для визначення витрати води (об'єм за одиницю часу [$\text{м}^3/\text{с}$]) використовуємо формулу:

$$Q = \frac{W}{t} . \quad (2.20)$$

З іншого боку:

$$Q = \omega \cdot V , \quad (2.21)$$

де ω – площа поперечного перерізу каналу.

Визначаємо площу поперечного перерізу каналу в даному створі як:

$$\omega = \frac{W}{t \cdot V} . \quad (2.22)$$

Для каналів з трапецієподібним поперечним перерізом (рис. 3.4) геометричні елементи визначаються за наступними формулами:

– площа поперечного перерізу (площа трапеції):

$$\omega = (b + m \cdot h) \cdot h, \quad (2.23)$$

де m – коефіцієнт ухилу, що дорівнює відношенню закладання ухилу до висоти (рис.2.5):

$$m = \frac{a}{h}. \quad (2.24)$$

– змочуваний периметр:

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2} . \quad (2.25)$$

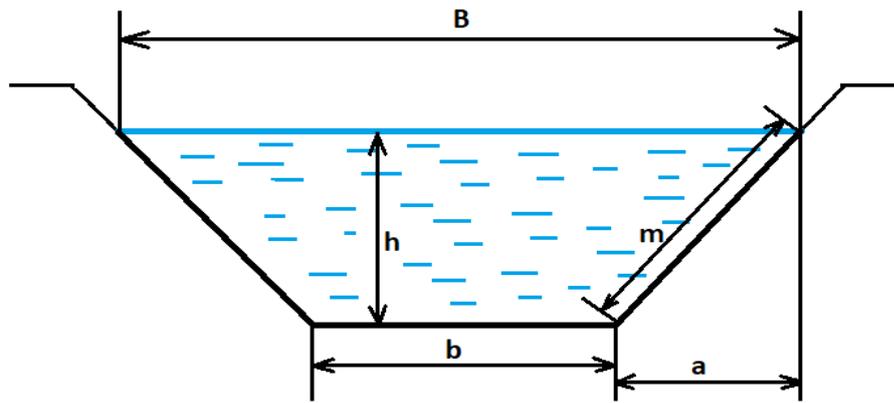


Рисунок 2.5 – Параметри трапецеїдального русла

Потім апроксимуємо перетин русла трапецією, нижньою основою якої є природний рівень води в річці. Розраховуємо його як суму відстаней від осі річки до горизонту берега. Знаючи відмітку горизонтальної висоти та урізу води за нормальних умов, обчислюємо площу трапеції. Яку утворює хвиля прориву, потім порівнюємо її з аналітично розрахованою. Якщо вона менша за витрату, отриману з рівняння, то розраховуємо площу відносно наступної горизонтальної відмітки. Далі методом половинного ділення (кількість ітерацій обмежуємо до 10) знаходимо площу поперечного перерізу, що дорівнює аналітично розрахованій. Обчислюємо рівень підйому води від площі поперечного перерізу (рис. 2.6).

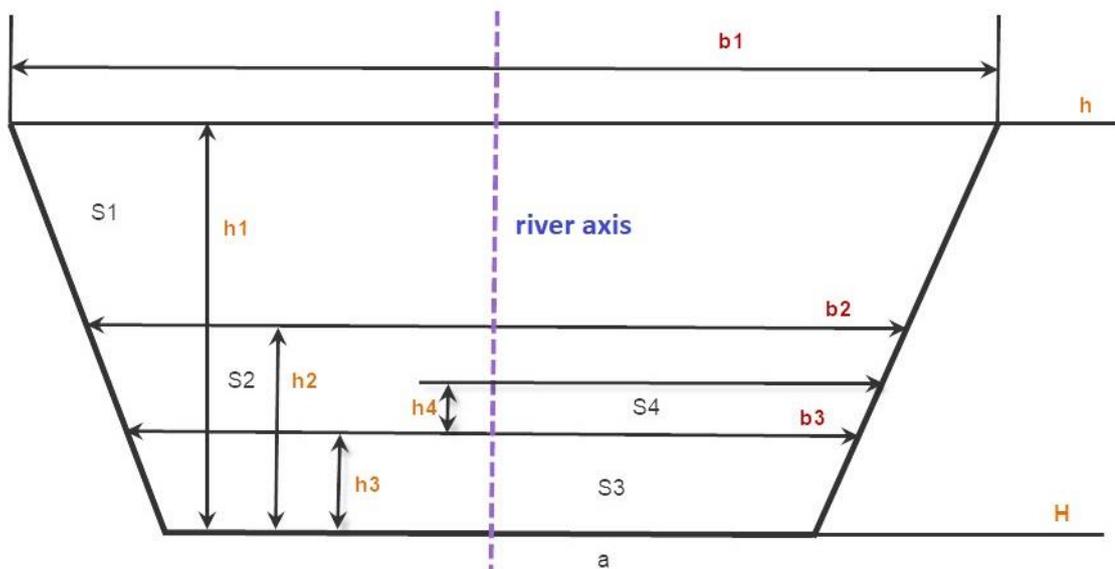


Рисунок 2.6 – Параметри трапецієподібного каналу

2.4 Висновки по другому розділу

1. У розділі проведено аналіз методів і технологій для оцінки ризику затоплення територій. Вивчено різноманітні підходи, включаючи гідролого-гідравлічні, геолого-геоморфологічні, історичні, палеогідрологічні та комп'ютерні моделювання, що дозволяє оцінити проблематику ідентифікації та моделювання затоплених зон.

2. Гідролого-гідравлічні методи виявилися основними для розрахунку параметрів затоплення територій, забезпечуючи точні оцінки гідродинамічних процесів та їх впливу на території. Геолого-геоморфологічні методи надали важливу інформацію про вплив геологічних і морфологічних факторів на затоплення територій, що є важливим для розробки моделей прогнозування.

3. Запропоновано метод комп'ютерного моделювання затоплення територій при виникненні надзвичайної ситуації на гідроелектростанції на основі методів імітаційного моделювання, геометричного та гідрологічного підходів, зокрема на основі розрахунку висоти хвилі прориву та половинного ділення площі перерізу русла ріки. Це дозволило проводити розрахунки для одновимірних та двовимірних систем рівнянь Сен-Венана, провести аналіз на макрорівні з урахуванням тріангуляційної моделі поверхні.

4. Усі досліджені методи мають свої переваги та обмеження, що підкреслює важливість комплексного підходу до моделювання затоплення територій і управління ризиками. Розробка та інтеграція нових технологій для аналізу підвищення ефективності і точності прогнозування затоплених зон при надзвичайних ситуаціях.

Основні результати даного розділу опубліковані в роботах автора [1, 2, 7, 8].

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ Й ОЦІНКИ НАСЛІДКІВ ЗАТОПЛЕННЯ ТЕРИТОРІЇ

3.1 Геоінформаційна технологія прогнозування та картографування небезпеки затоплення при антропогенних надзвичайних ситуаціях

Затоплення територій є результатом поєднання метеорологічних і антропогенних факторів. Незважаючи на їх походження, вони мають катастрофічні наслідки, такі як руйнування будівель, інфраструктури та сільськогосподарських посівів. Однією з головних змін у землекористуванні стало зростання урбанізації, що впливає на гідрологічні процеси [118]. Ця тенденція є особливо актуальною в сучасному світі, де мегаполіси та міські агломерації постійно зростають, а земельні ресурси стають обмеженими. Урбанізація призводить до збільшення площі асфальтованих поверхонь, що знижує водопроникність ґрунтів та збільшує ризик затоплення під час сильних дощів або відтавання снігу. Крім того, зміни в природному середовищі, такі як вирубка лісів та руйнування екосистем, також сприяють збільшенню ризику повеней. Зменшення природних бар'єрів, що поглинають воду, призводить до швидшого відведення великих кількостей води, що в результаті може призвести до затоплення низинних районів та міст. Тому, важливо звертатись до сучасних методів аналізу зон підтоплення територій. Очевидно, що своєчасне та оперативне виявлення таких зон є важливим завданням для збереження життя людей, рослинного та тваринного світу.

Отримання інформації про елементи та явища, які не можна безпосередньо спостерігати на місці, є важливою складовою для управління ризиками повеней, особливо в умовах військових конфліктів. Виготовлення спеціальних карт зон затоплення з додатковими даними стає необхідним

інформаційним ресурсом для ефективного планування та управління в ситуаціях надзвичайних подій. Ці карти містять різноманітні спеціальні відомості, необхідні для розробки тактичних рішень військовими структурами, у тому числі для організації бойових дій та координації дій управління військами та бойовими засобами. Для їх побудови використовують супутникові знімки, які забезпечують оперативну та достовірну інформацію щодо географічних об'єктів і зон ризику, зокрема зон затоплення територій. Виявлення цікавих об'єктів і аномалій на супутникових знімках є актуальним завданням уже протягом десятків років, і кількість застосувань, де вона використовується, постійно зростає. Серед них програми, пов'язані з дистанційним зондуванням Землі [119], наземним моніторингом [120], радаром, сільським господарством [121, 122], тощо.

Запропонована геоінформаційна технологія моделювання та картографування зони затоплення представлена на рис.3.1 та складається з основних етапів:

1. Підготовка та аналіз даних для створення детальної топографічної карти досліджуваної місцевості.
2. Завантаження супутникових даних.
3. Розробка цифрової моделі місцевості.
4. Розробка класів водно-болотного та гідротехнічного режиму на основі машинного навчання:
5. Побудова карт тривимірної місцевості.
6. Гідродинамічне моделювання водосховища.
7. 3D-Моделювання зони затоплення територій.

Для кращого розуміння застосування геоінформаційної технології прогнозування та картографування небезпеки затоплення при антропогенних надзвичайних ситуаціях розглянемо її використання на прикладі Дніпровської гідроелектростанції.

Дніпровська гідроелектростанція знаходиться в центральній частині України, яка є однією з найбільш населених та промислово розвинених

територій країни. Ця гідроелектростанція є однією з найбільших у Європі за потужністю та відіграє важливу роль у виробництві електроенергії та складається з шести енергетичних блоків. Площа території, що контролюється гідроелектростанцією, становить кілька тисяч квадратних кілометрів. На цій території розташовані не лише гідротехнічні споруди, але і деякі населені пункти, що можуть бути під загрозою затоплення територій у разі підвищення рівня води внаслідок роботи ГЕС.

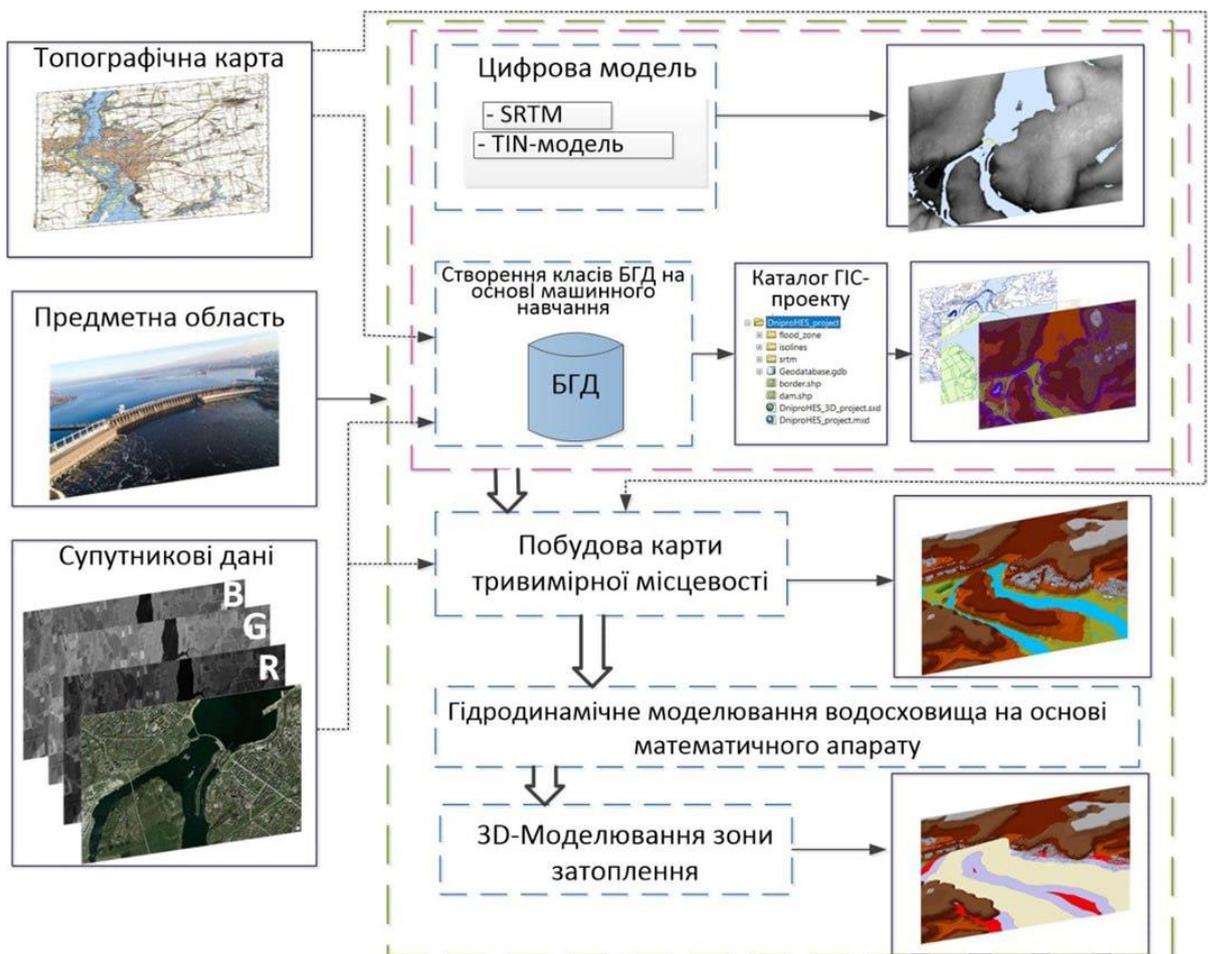


Рисунок 3.1 – Блок-схема геоінформаційної технології для прогнозування та картографування зони затоплення

3.1.1 Цифрові дані

З платформи Copernicus Open Access Hub завантажуюємо оптичні знімки з супутника Sentinel-2 (рис.3.2). Після завантаження зображень проводимо

ряд корекцій, спрямованих на усунення різноманітних спотворень, що можуть виникати під час зйомки та передачі зображень з космосу [123]. Один з важливих етапів попередньої обробки – геометрична корекція цифрових супутникових зображень [124]. Це необхідно для усунення спотворень, що виникають через геометричні особливості процесу зйомки [124]:

$$\begin{aligned} x_c &= x_0 \frac{r_{oo}}{r_{oc}}, \\ y_c &= y_0 \frac{r_{oo}}{r_{oc}}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де (x_c, y_c) – координати пікселя після корекції, (x_o, y_o) – початкові координати пікселя, r_{oo} – відстань від центру обертання до початкового пікселя, r_{oc} – відстань від центру обертання до виправленого пікселя.



Рисунок 3.2 – Оптичний знімок з супутника Sentinel-2: а) первинний знімок; б) після обробки

Також проводиться радіометрична корекція, спрямована на виправлення впливу атмосферних умов на зображення:

$$DN = m \cdot TOA + b, \quad (3.2)$$

де DN – цифровий номер пікселя, TOA – відносна оптична товщина атмосфери, m – калібрувальний нахил, b – зміщення.

Однією з проблем при роботі з оптичними знімками є наявність хмарного покриву, який може перешкоджати чіткому спостереженню земної поверхні. Для зменшення впливу цього фактора застосовується відносне

радіометричне калібрування. Атмосферна корекція полягає у конвертації радіометрично скоригованих пікселів зображення в спектральну яскравість верхнього шару атмосфери з найменшими відхиленнями. Це допомагає отримати більш точні та надійні дані, які використовуються в дослідженнях та аналізі земельних покривів.

Створення детальної топографічної карти включає наступні кроки:

1. Збір вихідних даних, таких як геодезичні вимірювання, аерофотознімки, супутникові зображення та інші джерела геопросторової інформації.

2. Вибір масштабу та проєкції для представлення топографічних даних на карті. На цьому етапі визначається масштаб, у якому будуть представлені дані на картах, а також обирається проєкція для їх відображення. Це важливо для забезпечення правильності і зрозумілості карти. Похибка топографічних об'єктів населених пунктів в плановому положенні не має перевищувати 0,5 мм в масштабі карти (25 м – на місцевості), в гірських районах – 0,75 мм в масштабі карти (37,5 м – на місцевості).

3. Виділення контурів місцевості, що відображають лінії рівного рівня висоти на карті. Тут проводиться робота з контурами місцевості, що включає у себе визначення ліній одного рівня висоти на карті, а також розділення вулиць і кварталів на різні категорії відповідно до їх характеристик і функцій. Вулиці поділяються на магістральні та немагістральні, квартали на щільно (не перевищує 50 м) та рідко (перевищує 50 м) забудовані, а також напівзруйновані. Будівлі відображаються точково або полігонально, а межі населених пунктів повторюють конфігурацію кварталів. Дорожня мережа векторизується з точністю до 0,5 мм на масштабі карти, утворюючи цілісну лінійно-вузлову мережу.

Об'єкти дорожньо-транспортної мережі повинні утворювати цілісну лінійно-вузлову мережу. Дороги не розриваються через мости, греблі тощо. Дорожня мережа векторизується з точністю аеро-орто і актуальністю супутникового знімка. Залежно від пропускної здатності, кількості смуг руху,

ширини смуг, ширини проїзної частини, ширини земляного полотна, ширини смуги відводу, поздовжнього похилу дороги та радіусу заокруглень дороги, автомобільні дороги поділяють на 5 категорій представлених в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Класифікація дорожньої мережі

Категорія	Ia	Iб	II	III	IV	V
Кількість смуг (в обидві сторони), шт	4;6;8	4;6	2	2	2	1(всього)
Ширина смуги руху, м	3,75	3,75	3,75	3,50	3	4,50
Ширина роздільної смуги, м	6	3	-	-	-	-
Ширина укріпленої смуги на розділювальній смузі, м	0,75	0,50	-	-	-	-
Найменша ширина земляного полотна, м	28,5; 36,0; 43,5	28,5; 36,0	15	12	10	8
Найменший радіус кривої у плані, м	1000	700	450	450	450	450
Найбільший поздовжній похил, проміле	40	50	60	60	60	60

4. Додавання додаткових деталей на карту, таких як дороги, річки, озера, будівлі та інші об'єкти, що можуть бути корисними для користувача.

5. Перевірка точності та достовірності створеної топографічної карти шляхом порівняння з реальними тереновими умовами та іншими незалежними джерелами даних. Точність планового положення об'єктів цифрової топографічної карти оцінюється шляхом порівняння координат контрольних точок, визначених за ортофотопланом, з координатами відповідних точок цифрової карти. На одну трапецію карти необхідно визначити не менше 20-ти контрольних точок. Для контрольних точок слід

вибирати об'єкти місцевості, які чітко розпізнаються, такі як перетини доріг і вулиць, кути будинків, поворотів огорож, тощо (рис.3.3).

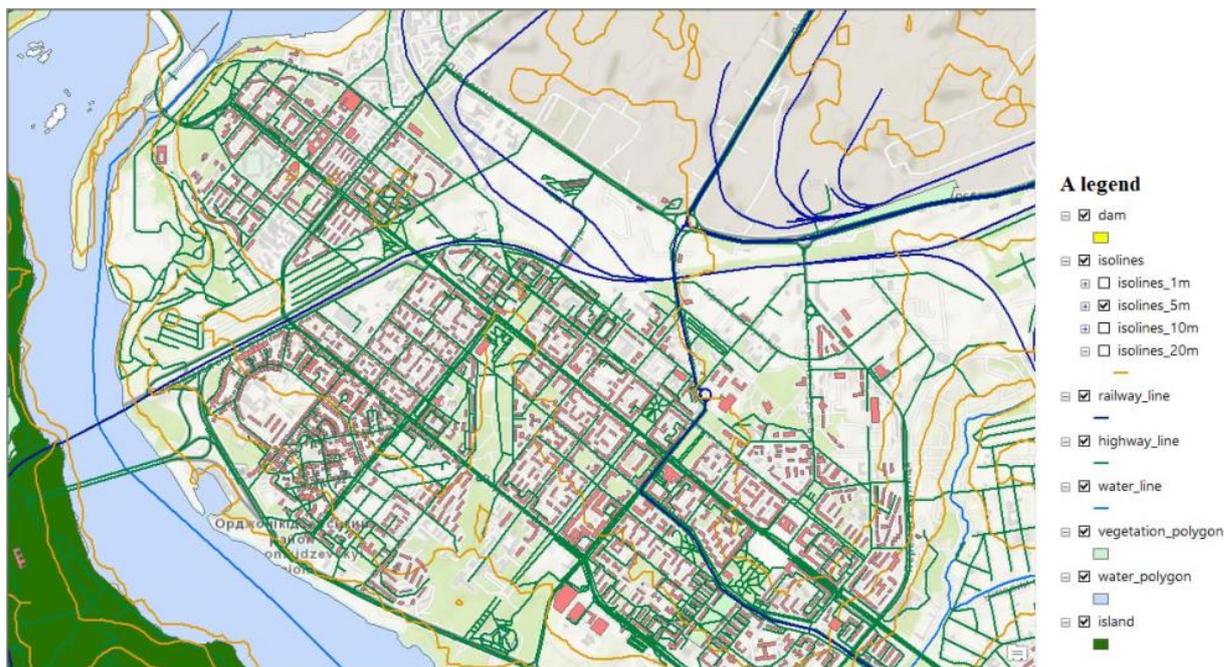


Рисунок 3.3 – Топографічна карта

Середня квадратична похибка оновленої цифрової топографічної карти обчислюється за формулою:

$$M = \sqrt{M_f^2 + M_s^2}, \quad (3.3)$$

де M_f – середня квадратична похибка ортофотоплану масштабу 1:10000, що становить 0,5 мм в масштабі ортофотоплану (5 м на місцевості); M_s – середня квадратична похибка положення контрольних точок цифрової топографічної карти.

Цей етап є важливим у процесі створення топографічних карт, оскільки забезпечує надійну та точну інформацію про рельєф та характеристики місцевості, що може бути використана для різноманітних цілей, включаючи планування розвитку територій, навігацію, дослідження та інші застосування.

3.1.2 Цифрова модель місцевості

Створення цифрової моделі місцевості є ключовим етапом у процесі картографування та аналізу рельєфу певної території. Для створення цифрової

моделі використовуємо SRTM (для глобальних даних) та ТНМ – модель, яка базується на трикутниках, що описують рельєф. ТНМ складається з мережі трикутників, що утворюють безперервні, непересічні полігональні області. Побудова TIN дозволяє отримати більш високе розрешення в нерівномірних або деталізованих областях і нижчий рівень дозвілу в однорідних зонах. Вхідні просторові об'єкти зберігаються на вузлах і ребрах ТНМ, забезпечуючи точність вхідних даних. Для створення ТНМ використовується панель інструментів, що дозволяє вибрати необхідні параметри, такі як координатна система, вхідний функціональний клас, джерело висот та інші. Результатом є побудована TIN-модель, яка відображає поверхню місцевості з високою точністю і деталізацією.

Цифрова модель рельєфу організована у вигляді даних 16-бітних знакових цілих у простому бінарному файлі. В самому файлі відсутні будь-які заголовки. Дані зберігаються в рядково-колонковому порядку, що означає, що всі дані в одному рядку розташовані підряд, а потім переходиться до наступного рядку.

Усі значення висоти в цій моделі зберігаються в метрах відносно геоїда WGS84 EGM96. Цей геоїд базується на еліпсоїді WGS84, а коефіцієнти обчислюються на основі глобальної бази даних 30-хвилинних середніх вільних гравітаційних аномалій, а також на даних, отриманих з супутників і безпосередньої альтиметрії (вимірювання висоти).

Формат байтів відповідає Motorola ("тупокінцевому") стандарту, де більш значущий байт знаходиться на першому місці. Значення висоти можуть бути в діапазоні від -32767 до 32767 метрів, включаючи будь-які значення висот, які зустрічаються на Землі.

Одержана цифрова модель місцевості (рис.3.4) перевіряється на достовірність та точність за допомогою порівняння з реальними тереновими даними та іншими джерелами інформації.

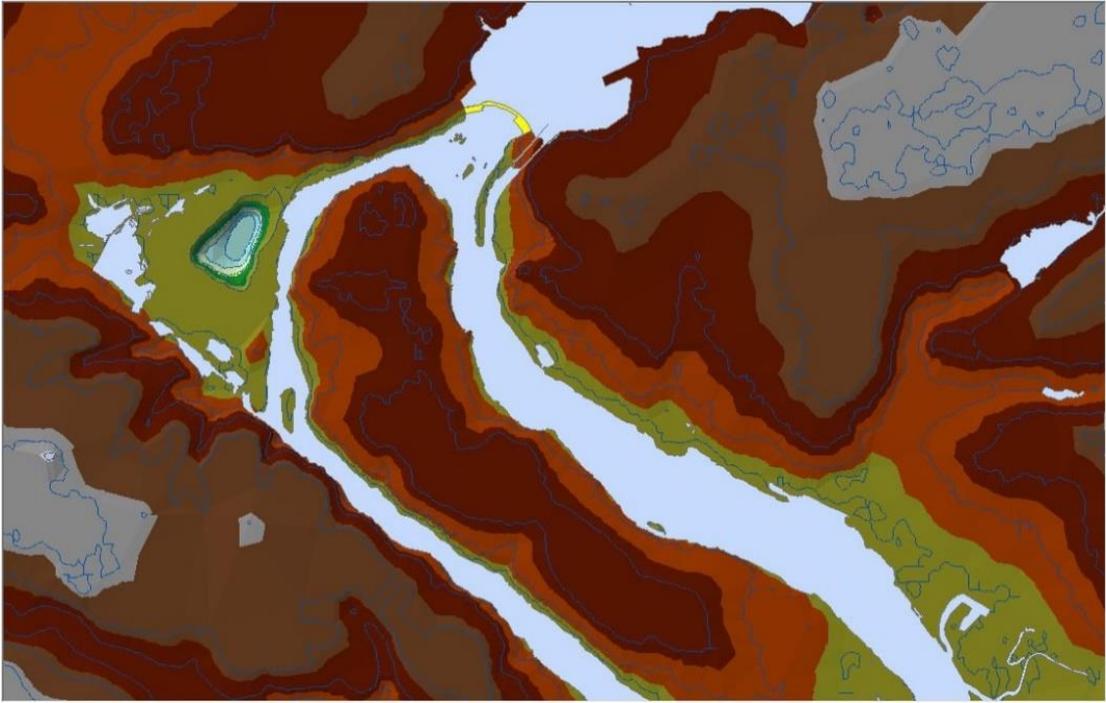


Рисунок 3.4 – Цифрова модель місцевості

3.1.3 Створення класів БГД на основі машинного навчання

Підтримка моделей, заснованих на файлових системах, включає доступ до різних наборів географічної інформації (ГІС-даних), таких як покриття, шейп-файли, ґриди, зображення та нерегулярні триангуляційні мережі (ТНМ). Модель бази геоданих управляє вищеописаними типами географічної інформації в реляційних базах даних, надаючи багато переваг управління даними, пропонувані системами управління базами даних (СУБД). Створення бази геоданих (БГД) для класифікації території та використання машинного навчання, зокрема алгоритму дерева рішень, включає наступні кроки:

1. Спочатку проводиться підготовка вихідних географічних даних, зокрема векторних шейп-файлів та растрових зображень.
2. Далі визначається структура БГД, встановлюються таблиці та поля для зберігання інформації.
3. Після цього створюється сама БГД в середовищі QGIS, з можливістю імпорту вихідних даних з відповідних джерел.

4. У процесі створення БГД також встановлюються зв'язки між таблицями для забезпечення цілісності даних.

5. Наступним етапом є редагування та внесення змін у дані з використанням різних інструментів QGIS. На цьому етапі використовуємо дерево рішень, що є частиною процесу машинного навчання, де проводиться аналіз зв'язку між описовими змінними (ознаками) та цільовими змінними (мітками) для безперервних даних. Суть полягає у визначенні кожної змінної та значення поділу за допомогою домішок, що генеруються в кожному вузлі. Цей метод є дуже простим та легким у використанні, проте його надійність низька через чутливість до переобладнання та відсутність лінійності:

$$\hat{y} = f(X), \quad (3.4)$$

де \hat{y} – цільова змінна, що підлягає прогнозуванню; X – вхідні ознаки (характеристики території); f – функція, що відображає зв'язок між вхідними ознаками та цільовою змінною.

Після цього оптимізуються та індексуються дані для підвищення продуктивності та швидкості доступу до них (рис.3.5).

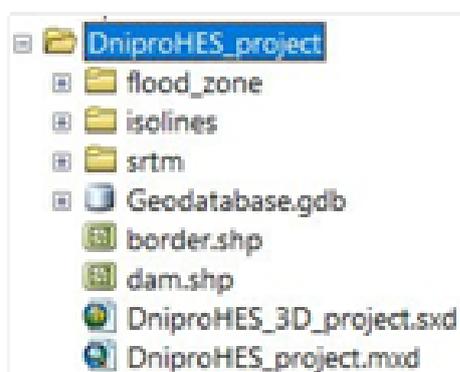


Рисунок 3.5 – Структура БГД

6. Завершується процес валідацією та тестуванням цілісності та ефективності БД, а також впровадженням її в робоче середовище для подальшого використання та підтримки. Такий підхід дозволяє ефективно застосовувати машинне навчання, зокрема алгоритм дерева рішень, для класифікації території та розробки геоінформаційних систем.

3.1.4 Гідродинамічне моделювання водосховища на основі математичного апарату

Гідродинамічне моделювання водосховища полягає у використанні математичних рівнянь та числових методів для розуміння руху води, розподілу тиску, а також інших параметрів в середовищі водосховища. Метод моделювання територій, що ґрунтується на розв'язанні одновимірних і двовимірних систем рівнянь Сен-Венана [125], які описують рух води у відкритих руслах, є важливим інструментом для прогнозування та аналізу різноманітних гідрологічних сценаріїв [125]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{A}{B} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + U \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{U}{B} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)_{h=const} = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + g \cdot (S_f - J_f) = 0, \quad (3.6)$$

де A – площа поперечного перерізу; T – час; B – витрата; x – горизонтальна координата в напрямку течії; g – гравітаційне прискорення; h – глибина води; J_f – поздовжній ухил дна каналу; S_f – ухил тертя; U – середня швидкість води.

Використання рівнянь нерозривності та рівнянь руху дозволяє отримати числові рішення за допомогою методу послідовного наближення, оскільки аналітичне розв'язання цих рівнянь не є можливим. При цьому важливо враховувати стабільність алгоритму, використовуючи критерій Куранта для уникнення числових нестійкостей [125]:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{(|U| + c)}, \quad (3.7)$$

де Δx – просторовий крок, Δt – крок часу між точками мережі, U – середня швидкість води, c – швидкість поширення, c – швидкість поширення.

Розраховуємо показник ступеня кривої обсягів водосховища N_B :

$$N_B = \frac{H_B \cdot S_B}{W_B}, \quad (3.8)$$

має перебувати в інтервалі [1.1; 6]. В іншому разі необхідно перевірити й уточнити вихідні дані щодо водосховища.

Визначасмо час, який потрібен хвилі прориву, щоб дійти до об'єкта на певну відстань. Цей час залежить від швидкості руху хвилі та відстані до об'єкта:

$$t = \frac{R}{V}, \text{ год.} \quad (3.9)$$

Потім розраховуємо висоту хвилі прориву на вказаній відстані до об'єкта. Ця висота визначається за допомогою відповідного коефіцієнта.

$$h = f(R), \text{ м,} \quad (3.10)$$

де $f(R)$ – функція, яка залежить від відстані від ГЕС до об'єкта.

Далі визначасмо, скільки часу потрібно, щоб водосховище спорожнилося. Цей час залежить від максимальної витрати води та розмірів річкового русла.

$$T = \frac{V}{Q}, \text{ год,} \quad (3.11)$$

де T – час спорожнення водосховища (години), V – об'єм води водосховища (метр кубічний), Q – максимальна витрата води на одиницю часу (метр кубічний за годину).

Тривалість проходження хвилі прориву на певну відстань також розраховується на основі коефіцієнта, який залежить від відстані до об'єкта.

$$S = \frac{q^2}{h}, \text{ м}^2, \quad (3.12)$$

де S – площа поперечного перерізу (квадратні метри), q – витрата води (кубічні метри за секунду), h – висота перерізу (метри).

Отже, розраховуємо всі необхідні параметри для оцінки ризику затоплення територій та спорожнення водосховища.

Незважаючи на переваги рівнянь Сен-Венана у вирішенні гідродинамічних задач, вони мають свої обмеження, зокрема у випадках, коли потрібно моделювати реальні прориви дамб або інші складні сценарії з

активними тривимірними компонентами швидкості та прискорення [126]. В таких випадках стандартні умови гідростатичного тиску можуть не домінувати, що ускладнює моделювання. Тому, для представлення топографії використовується структура даних «Вузли, прості ребра і трикутники», що дозволяє ефективно аналізувати тріангуляційні моделі поверхні. Алгоритм моделювання включає пошук «ребер перелому» та побудову ізоліній для визначення зон затоплення територій. Додатково, проводиться аналіз можливості переповнення та розрахунок обсягу води, що припадає на кожну зону затоплення територій.

Гідрологічний підхід застосовується для аналізу на макрорівні, що охоплює території з площею в десятки і сотні кілометрів у квадраті. У моделюванні поверхні річки використовуються дані про рівні води на гідропостах, включаючи інформацію про фоновий гідрологічний прогноз, штормові попередження, історичні дані про максимальні рівні води протягом останніх 100 років та дані, введені оператором за інформацією оперативних повідомлень.

Отримання векторного полігона зони затоплення територій здійснюється за допомогою просторового аналізу ГІС, порівнюючи паводкову поверхню річки з рельєфом місцевості. Цей аналіз дозволяє визначити населені пункти, промислові підприємства та інженерні комунікації, що потрапляють в зону затоплення територій.

3.1.5 Побудова карти тривимірної місцевості

Тривимірна модель місцевості є представленням місцевості у тривимірному просторі. Вона включає в себе поверхню, яка відображає рельєф місцевості, а також може бути доповнена зображеннями векторних, растрових або матричних карт. На цій моделі можуть бути розташовані тривимірні об'єкти, які відповідають об'єктам, представленим на двовірній карті. Тривимірна модель місцевості дозволяє вибирати об'єкти на моделі для отримання інформації про них, а також редагувати їх вигляд і характеристики.

На основі даних з п.3.1 та п.3.4 (двовірна карта та матриця висот). Для додавання тривимірних об'єктів, які розташовані на карті, необхідна бібліотека тривимірних зображень об'єктів, яка додається до класифікатора будь-якої карти.

Для побудови тривимірної моделі об'єктів потрібно виконати наступні кроки:

1. Додати шар(и) до проекту.
2. У властивостях шару обрати вкладку «Базові висоти» і встановити перемикач на «плаваючі на користувальницькій поверхні». Задати масштабний коефіцієнт.
3. Виконати операцію витягування, щоб створити тривимірне зображення будинків.
4. Повторити аналогічні дії для шарів ізоліній та ТНМ – моделі рельєфу.

3.2 Геоінформаційна технологія виявлення можливих затоплених зон при природних надзвичайних ситуаціях

3.2.1 Напівкероване машинне навчання

Останніми роками спостерігається зростання інтересу до використання топографічних карт затоплення територій в областях комп'ютерного зору, фотограмметрії та дистанційного зондування. При створенні цифрових моделей рельєфу, ландшафтних моделей та тривимірних (3D) моделей урбаністичних територій використовують масиви опорних точок. Для класифікації вищеописаних даних застосовуються контрольовані та неконтрольовані методи. Контрольовані використовують розпізнавання зв'язків між даними та їх мітками. Але навчання керованих моделей вимагає точних навчальних вибірок, які часто створюються вручну, що є затратним процесом і потребує часових ресурсів. Неконтрольовані методи орієнтовані на класифікацію даних без попередньої розмітки за допомогою виявлення внутрішніх структур і закономірностей у даних. У роботі [127]

запропоновано використати неконтрольовані методи для маркування масивів точок у тривимірних наборах функцій структурного зв'язку. Але при класифікації об'єктів у міських сценах з високим рівнем деталізації ці методи демонструють обмежену ефективність. Це обумовлено тим, що неконтрольовані методи зазвичай орієнтовані на класифікацію об'єктів однієї категорії, таких як рельєф місцевості або дерева.

Основною проблемою є те, що вищеописані традиційні методи є неефективними при створенні та аналізі топографічних карт затоплення територій, особливо для урбаністичних територій. Це створює потребу в розробці нової методології цифрового картографування можливих затоплень територій, яка враховуватиме специфіку міських сцен і забезпечуватиме високу точність та оперативність аналізу даних.

В роботі [128] проведено дослідження для річки Мульде в Саксонії, Німеччина на основі теорії багатоатрибутивної корисності (MAUT) для оцінки ризику затоплення територій. Небезпека повені була оцінена за допомогою квазідвовимірної (2D) гідродинамічної моделі, реалізованої через HEC-RAS. Подібно до методу аналітичної ієрархії (АНР), метод MAUT є широко використовуваним підходом в аналізі багатокритеріальних рішень (MCDM). Але MAUT характеризується високою інтенсивністю обробки даних, оскільки вимагає значної кількості вхідної інформації. Вагові коефіцієнти в цьому методі визначаються експертами, що приймають рішення, а не обчислюються автоматично, як у випадку з АНР [129]. У дослідженні [130], що проводилося для регіону Іскандар у Малайзії, для оцінки ваги критеріїв застосовувався метод рейтингів. Для створення карти затоплення територій обрано критерії: відстань до головного потоку та річки, висота, нахил місцевості, землекористування, тип покриву, відстань до стічного каналу та щільність населення. Одним з обмежень цього підходу є відсутність теоретичної основи для рейтингового методу, що ускладнює обґрунтування призначених вагових коефіцієнтів. Авторами в роботі [131] проведено дослідження дельти Червоної річки у В'єтнамі з використанням

методу АНР. Вибрані критерії для оцінки ризику повеней (економічних, соціальних та екологічних втрат) є більш детальними порівняно з попередніми дослідженнями. Але отримання вищевказаних критеріїв є складним завданням. Для оцінки небезпеки затоплення територій запропоновано використати параметри, такі як глибина, тривалість та швидкість водяного потоку. Для оцінки економічних втрат розраховано площі житлових будинків, будівель спеціального призначення, громадської інфраструктури та сільськогосподарських угідь. Соціальні втрати оцінювались за критеріями щільності населення, рівень ризику та рівня доходів. Екологічні втрати оцінювались на основі розрахунків рівня забруднення (викиди від промисловості, відходи та застій паводкових вод), ерозії та наявності відкритих просторів. Таким чином, оцінка ризику повеней для великих територій або в регіонах з обмеженою деталізацією інформації може бути ускладнена через необхідність використання вищеописаних критеріїв, що потребує значних ресурсів і може ускладнити впровадження запропонованої методології в роботі [131]. У роботі [132] розроблено два набори ознак на основі координат і вокселів, що використовуються для неконтрольованого маркування масивів точок. На основі цих ознак запропоновано дерево рішень, орієнтоване на знання, для неконтрольованого маркування. Експерименти показали, цей підхід досяг показника F1 більше 85% для планарно-домінантних класів. Однак точна класифікація об'єктів у масивах точок великомасштабних міських середовищ за допомогою неконтрольованих методів залишається складною задачею. Деякі методи були запропоновані для класифікації лише однієї категорії, наприклад, рельєфу або рослинності. Авторами в роботі [133] представлено алгоритм для створення класифікаційних карт на основі неконтрольованого навчання. Але експерименти показали, що ефективність фільтрації зменшується при зниженні щільності точок.

Загальний аналіз показує, що застосування надто складних або надто простих критеріїв може призвести до створення ненадійних карт рівня затоплення територій.

В роботі розроблена технологія, яка використовує комплексний підхід поєднання неконтрольованого навчання і географічних інформаційних систем (рис.3.6). Цей підхід дозволяє створювати карти затоплення території, які відображають просторовий розподіл затоплення територій та його інтенсивність, класифіковану від дуже високого до дуже низького рівня.

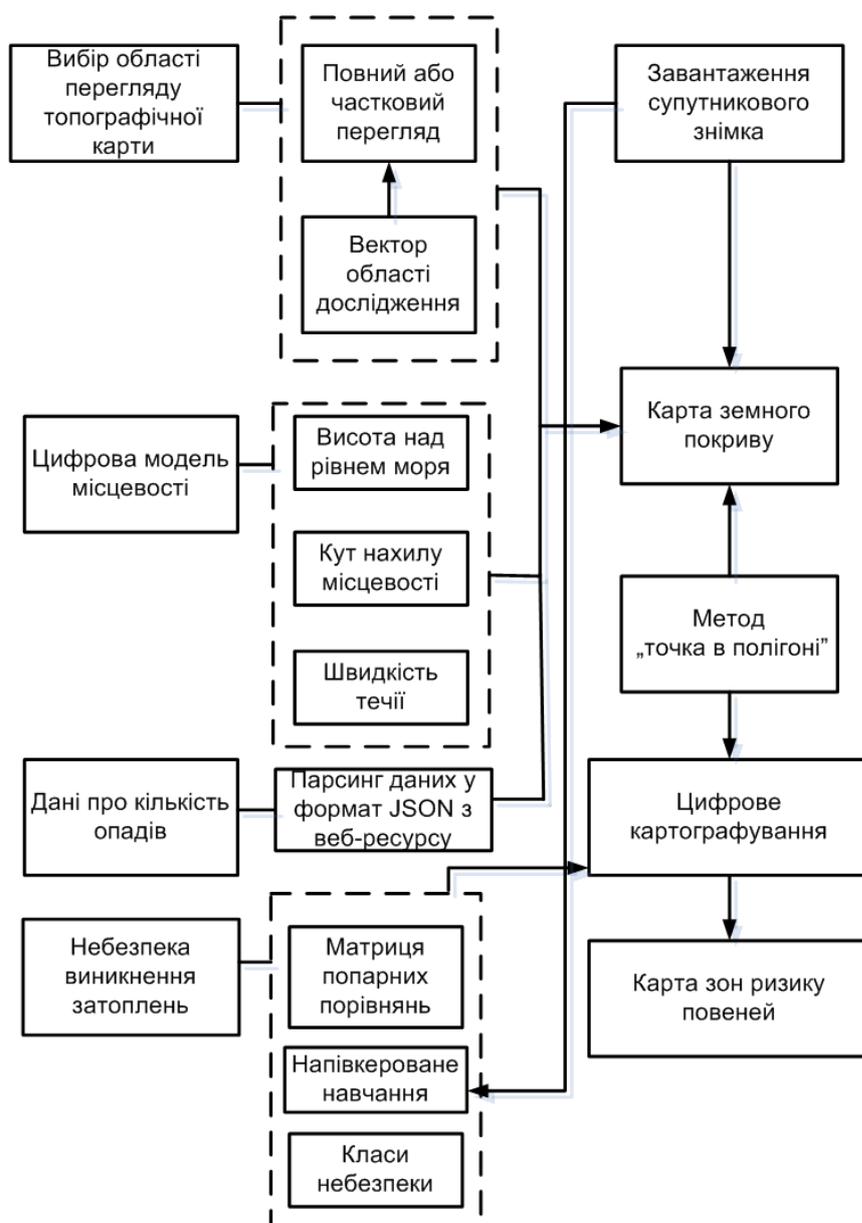


Рисунок 3.6 – Структурна схема технології виявлення можливих затоплених зон при природних надзвичайних ситуаціях

Першим етапом є вибір області перегляду топографічної карти. Цей етап передбачає визначення меж досліджуваної території. У даному дослідженні він складався з окреслення 1% заплави за допомогою інструментів QGIS та розширення для моделювання затоплень територій. Використовувався масштаб 1:25000, що дозволяє отримати детальне уявлення про територію. Після цього створюється векторне представлення області дослідження. Це дозволяє більш точно визначити межі території, яка підлягає аналізу. Векторне представлення забезпечує чіткі контури та форми об'єктів, що робить подальший аналіз більш точним та ефективним.

Отримання цифрової моделі місцевості є другим етапом у методології. ЦМР включає ключові параметри: висоту над рівнем моря, кут нахилу місцевості та швидкість течії води. Ці дані дозволяють оцінити потенційні ризики можливого затоплення територій, впливаючи на напрямок і інтенсивність водних потоків під час повеней. Числова модель рельєфу місцевості була розроблена з просторовою роздільною здатністю 5 м і коефіцієнтом корекції похибки дискретизації 0,5 шляхом інтерполяції нівелірної та дренажної мережі, взятої з військових топографічних карт у масштабі 1:25000 з контурною еквідистантністю 10 м. Метод інтерполяції, спеціально розроблений для створення гідрологічно правильних цифрових моделей рельєфу, реалізований у програмному забезпеченні QGIS.

Паралельно необхідно зібрати дані про кількість опадів. Дані про опади отримані з метеорологічних станцій, супутникового спостереження та веб-ресурсів. Важливо парсити ці дані у формат JSON для зручності їх подальшого використання у цифрових моделях. Запропоновано використати методику парсингу даних з веб-ресурсів представлену в роботі [134]. Спочатку форматується HTML-код для визначення XPath тегів, потім вибір актуального контейнера для парсингу. Обробляються індивідуальні та повторювані об'єкти, зберігаючи вміст тегів та посилання на файли. Дані зберігаються в базі даних як дочірні елементи або в окремих таблицях.

Метод «точка в полігоні» застосовується для точного визначення границь зон затоплення територій на основі супутникових знімків (рис.3.7). Це дозволяє створити детальну карту земного покриття для моніторингу та аналізу затоплення територій. На першому етапі точки розділяються на опорні (не наземні) та наземні за допомогою цифрової моделі місцевості, що дозволяє чітко визначити їх просторове розташування. Другий етап включає обробку топографічної карти для створення полігональних шарів, які представляють різні категорії, такі як вода, транспортна інфраструктура, будівля та рослинність, з відповідними мітками класів. На третьому етапі виконується операція «точка в полігоні». Для опорних точок спочатку перевіряється, чи потрапляє точка в межі полігону транспортної інфраструктури; у разі попадання їй присвоюється мітка «транспортна інфраструктура». Якщо точка не потрапляє в полігон транспортної інфраструктури, проводиться перевірка на належність до полігону води; у разі підтвердження належності точці присвоюється мітка «вода». Якщо точка не потрапляє в жоден з цих полігонів, їй присвоюється мітка «місцевість». Для наземних точок процес є спрощеним: точки перевіряються на належність до полігонів для транспортної інфраструктури, будівель та рослинності. Точкам, що потрапляють у ці полігони, присвоюється відповідна мітка. Якщо точка не потрапляє в жоден з полігонів, їй присвоюється мітка «0», що вказує на відсутність маркування. Після завершення процесу «точка в полігоні» кожна точка отримує відповідну мітку, що забезпечує точну класифікацію даних і дозволяє провести подальший детальний просторовий аналіз затоплень.

Для визначення небезпеки затоплень територій застосовується комплексний підхід, що включає матрицю попарних порівнянь, напівкероване навчання та класи небезпеки. Матриця попарних порівнянь є ключовим інструментом для визначення ваги критеріїв: висота над рівнем моря, ступінь нахилу, максимальна кількість опадів, акумуляція стоку, дані про ґрунти та відстань до затоплених доріг. Відносна важливість цих

критеріїв оцінюється за шкалою від 1 до 8 рівні підвищення води при затопленні, де 1 – означає мінімальний рівень затоплення, а 8 – максимальний рівень затоплення. Нормалізація матриці дозволяє визначити ваги для кожного критерію [134]:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}}, \quad (3.13)$$

де w_i – вага критерію i , a_{ij} – оцінка відносної важливості критерію i порівняно з критерієм j . Ваги використовуються для подальшого аналізу і створення карт зон затоплення територій.

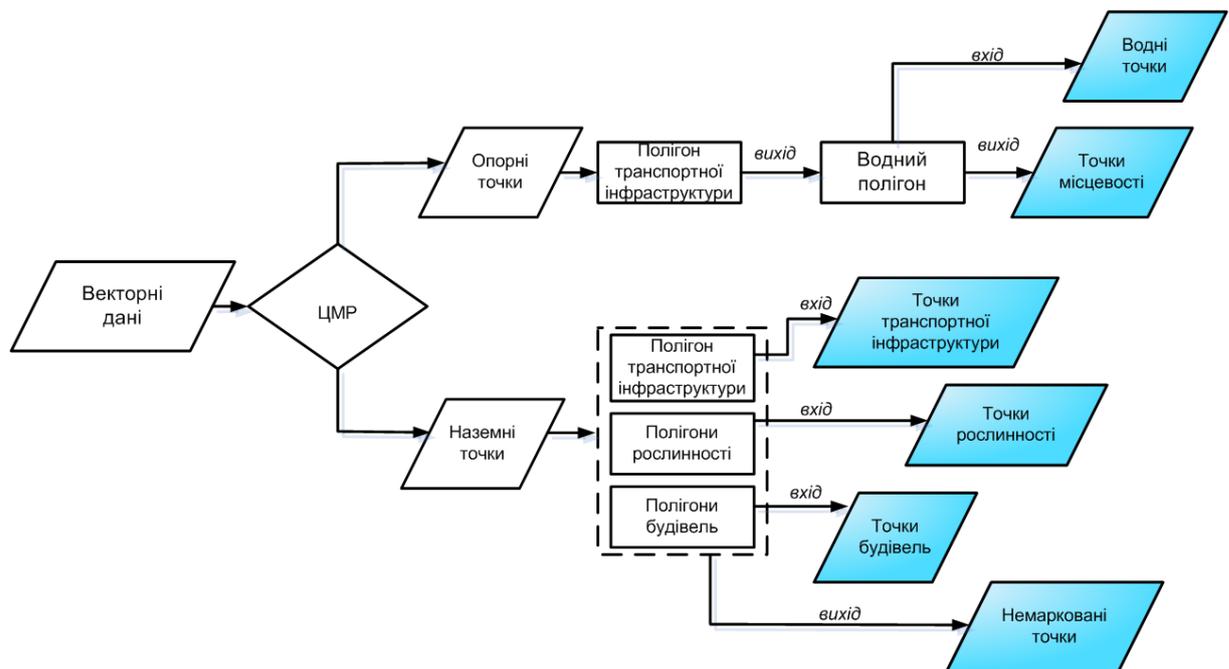


Рисунок 3.7 – Алгоритм методу «точка в полігоні»

Для забезпечення коректності розрахунків необхідно провести аналіз узгодженості матриці попарних порівнянь. Цей аналіз включає перевірку узгодженості оцінок відносної важливості критеріїв. Матриця попарних порівнянь формується на основі оцінки відносної важливості кожного критерію по відношенню до інших. Вона містить інформацію про те, наскільки один критерій важливіший за інший. Процес перевірки узгодженості включає розрахунок вектора узгодженості та власного значення матриці. Вектор узгодженості отримується шляхом множення матриці попарних порівнянь на вектор ваг. Власне значення матриці визначається як

середнє арифметичне відношень кожного елемента вектора узгодженості до відповідного елемента вектора ваг.

Напівкероване навчання, що включає дані з визначеними класами та дані без визначених класів використовується для покращення точності моделей класифікації. На початковому етапі навчання модель використовує обмежену кількість даних з відомими класами для формування базових класифікаційних шаблонів. Велика кількість даних без визначених класів використовується для подальшого коригування моделі, що дозволяє підвищити продуктивність:

$$L = \alpha L_{label} + (1 - \alpha) L_{unlabel}, \quad (3.14)$$

де L_{label} – функція втрат для мічених даних, $L_{unlabel}$ – функція втрат для нерозмічених даних, α — ваговий коефіцієнт.

Інтеграція матриці попарних порівнянь у процес напівкерованого навчання здійснюється шляхом використання ваг для моделювання впливу різних критеріїв на класифікацію. Ваги, отримані з матриці попарних порівнянь, інтегруються в модель напівкерованого навчання, що дозволяє моделі більше уваги приділяти критеріям з високими вагами. Вісім класів небезпеки використовуються для категоризації територій за рівнем ризику затоплень територій. Клас 1 представляє найнижчий рівень ризику, що відповідає територіям з мінімальною ймовірністю затоплень або незначними наслідками у разі затоплення територій. Клас 8, навпаки, вказує на найвищий рівень ризику затоплення територій, що відображає території з високою ймовірністю затоплень територій або значними наслідками у випадку затоплення територій.

3.2.2 Згорткова нейронна мережа

Контрольовані методи класифікації часто використовуються для задач бінарної або багатовимірної класифікації. Ці методи, такі як класифікатор K-Nearest Neighbor (K-NN) [135], класифікатор Random Forest (RF) [136] і опорна векторна машина (SVM) були застосовані до зображень Sentinel-1 SAR для виявлення повеней. Штучні нейронні мережі (ШНМ), наприклад, є

популярною технікою машинного навчання, яка використовується в супутниковому дистанційному зондуванні та обробці зображень і демонструє великий потенціал для виявлення повеней із супутникових зображень дистанційного зондування. Методи ШНМ успішно застосовувалися для процесів виявлення затоплення територій, проте ще існує багато не вирішених проблем [137].

Крім того, розроблено системи на основі машинного навчання для виявлення змін між сухими зображеннями та зображеннями повеней, що дозволяє маскувати водойми та нормальний рівень води в озерах і річках. Для виявлення змін (Change Detection) [138] необхідні принаймні два зображення: контрольне зображення (перед подією) та цільове зображення (під час події) з того самого супутника, орбітальної траєкторії, поляризації та покриття. Визначення порогу між водяними та неводними пікселями за зображеннями зворотного розсіювання Sentinel-1 SAR є критично важливим кроком для виявлення затоплених територій місць. Для оцінки порогового значення та необхідності відрізнити затоплені території від інших наземних покривів зазвичай використовується метод порогового визначення Оцу [139].

Для визначення порогового значення можуть використовуватися класичні показники текстури спільного входження. Однак у реальних додатках і через дефіцит наземних правдивих даних для швидкого картографування повеней краще використовувати неконтрольовані методи виявлення змін. Алгоритми неконтрольованого машинного навчання є більш надійними завдяки вищій швидкості, меншим вимогам до навчальних даних і часу виконання обчислень, що забезпечує кращу ефективність обчислень [140].

Неконтрольовані методи виявлення змін використовуються для автоматичного визначення змін у зображеннях без попереднього навчання на мічених даних. Це робить їх особливо цінними в умовах, коли швидкість та ефективність обробки є критичними, а доступ до наземних даних обмежений. Такі методи дозволяють оперативно реагувати на ситуації надзвичайного

стану, такі як повені, і забезпечують точне картографування затоплених територій.

В роботі [141] підкреслюється критична важливість виявлення повеней в режимі, близькому до реального часу, з акцентом на використанні методів глибокого навчання для збору даних з 16 паводків у басейні річки Янцзи. Це дослідження представляє ефективні методи створення наборів даних, пристосованих для навчання, тестування та застосування. Зокрема, дослідження показує, що згорткові нейронні мережі перевершують традиційні методи виявлення повеней, підкреслюючи їх стійкість в умовах, близьких до реального часу.

У роботі [142] представлено нову та надійну систему виявлення повеней у реальному часі на основі методів машинного навчання та глибокого навчання, включаючи Random Forest, Naive Bayes, J48 та згорткові нейронні мережі. Ця система спрямована на виявлення підвищення рівня води та прогнозування потенційних повеней з гуманітарними наслідками до того, як вони відбудуться. Це дослідження робить внесок у галузі штучного інтелекту, інтелектуального аналізу даних та глибокого навчання, впроваджуючи інноваційний підхід до запобігання повеней за допомогою Arduino з GSM-модемами.

Робота [143] зосереджена на точній ідентифікації затоплених територій за допомогою використання повністю згорткової мережі (FCN) на основі подвійних патчів, яка використовує злиття ознак на основі глибокого навчання. FCN незалежно навчаються на радарних із синтезованою апертурою і мультиспектральних зображеннях, що дозволяє їм фіксувати відмінні риси, які згодом комбінуються для покращення можливостей виявлення повеней.

У роботі [144] представлено виявлення повеней на основі часових послідовностей супутникових знімків. Вони використовують комбінацію підходів класичного комп'ютерного зору і машинного навчання. Їхні результати підкреслюють ефективність їхніх методів у вирішенні проблем,

пов'язаних із завданням MediaEval, і роблять внесок у ширшу сферу аналізу катастрофічних подій і використання супутникових даних.

Існуючі методи виявлення та картографування повеней мають ряд обмежень. Контрольовані методи, такі як K-NN, RF та SVM, залежать від наявності великої кількості мічених даних для навчання, що може бути проблематичним у реальних умовах. Методи глибокого навчання, такі як CNN та FCN, хоч і демонструють високу точність, потребують значних обчислювальних ресурсів і можуть бути повільними при обробці великих обсягів даних у режимі реального часу. Неконтрольовані методи виявлення змін, хоча і є більш надійними та швидкими, можуть бути менш точними через відсутність попереднього навчання на мічених даних. Це може призводити до високої частоти хибнопозитивних або хибнонегативних виявлень. Крім того, велика різноманітність міських середовищ, різні типи затоплень та неоднорідність даних ускладнюють розробку універсальних моделей для виявлення повеней. Обмежена доступність даних з високою просторовою та часовою роздільною здатністю також є важливою перешкодою для точного і своєчасного моніторингу повеней.

Загальна структура запропонованої інформаційної технології представлена на рисунку 3.8 і включає наступні етапи: завантаження супутникових знімків, векторизація первинних даних, інтеграція кліматичних та гідрографічних даних, розробка бази геоданих, створення карти досліджуваної території, застосування методів машинного навчання, моделювання затоплення територій та отримання карти зон небезпеки затоплення територій.

З платформи Copernicus Open Access Hub завантажуються оптичні знімки з супутників Sentinel-2 або Landsat-8,9. Після завантаження зображень виконується ряд попередніх обробок, включаючи радіометричну та атмосферну корекції. Ці корекції спрямовані на усунення різноманітних спотворень, таких як вплив атмосфери, сонячне освітлення та інші фактори, що можуть виникати під час зйомки та передачі зображень з космосу.

Радіометрична корекція забезпечує відповідність даних реальним фізичним величинам, що досягається шляхом перетворення цифрових значень пікселів у значення відбивної здатності. Це включає корекцію впливу сенсора та калібрування інструменту [144]:

$$\text{Відбивна здатність} = \frac{L_{TOA}}{E_{sun} \cdot \cos(\theta) \cdot d^2} \quad (3.15)$$

де L_{TOA} – радіометрична яскравість на вершині атмосфери; E_{sun} – спектральна сонячна константа; θ – зенітний кут сонця; d – відстань між Землею і Сонцем в астрономічних одиницях.

Атмосферна корекція усуває ефекти розсіювання та поглинання світла в атмосфері, що значно покращує якість зображень для подальшого аналізу.

В роботі запропоновано використати метод Dark Object Subtraction, що базується на припущенні, що найтемніші об'єкти в зображенні (зазвичай вода або тінь) мають нульову відбивну здатність, і будь-яке значення, відмінне від нуля, є результатом атмосферного розсіювання [144]:

$$\text{Відкориговане значення} = DN - DN_{\min}, \quad (3.16)$$

де DN_{\min} – мінімальне значення DN у зображенні.

Після завантаження та попередньої обробки супутникових знімків здійснюється їх перетворення у векторний формат для полегшення подальшої обробки. Векторизація – це процес перетворення растрових зображень (пікселів) у векторні дані (геометричні форми, такі як точки, лінії та полігони) [145]. Цей етап дозволяє більш ефективно працювати з даними, забезпечуючи кращу інтеграцію з іншими геопросторовими даними та зменшуючи обсяг даних. Векторизація супутникових знімків включає кілька ключових етапів. Спочатку зображення сегментуються для визначення різних об'єктів на основі їхніх спектральних характеристик. Після сегментації виділяються контури об'єктів, які згодом будуть перетворені у векторні форми. Контури об'єктів перетворюються у точки, лінії та полігони, що

формують векторні шари. Для цього використовуються алгоритми, такі як алгоритм Дугласа-Пекера для спрощення ліній та полігонів.

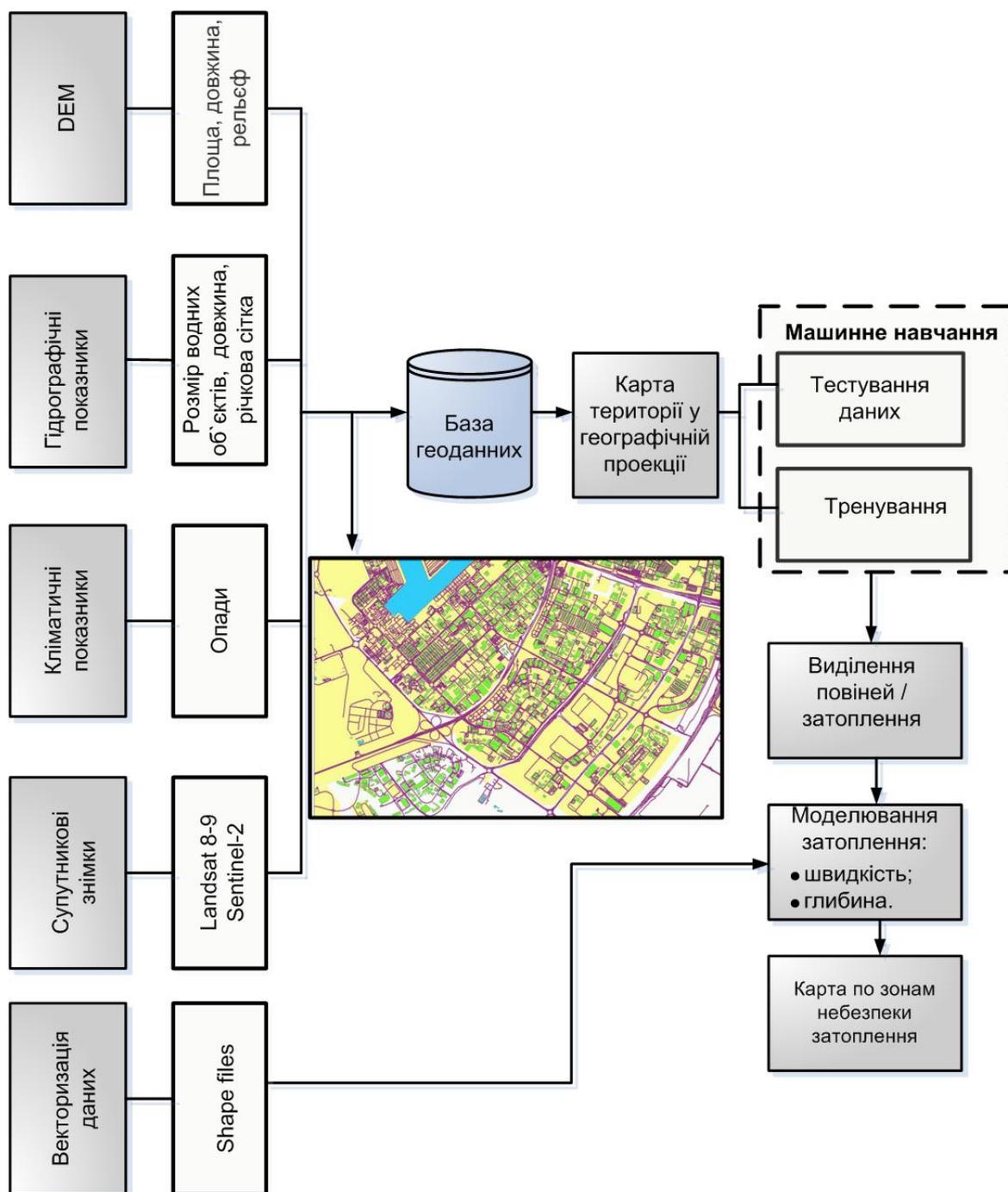


Рисунок 3.8 – Схема запропонованої інформаційної технології

Наступним етапом є завантаження кліматичних показників, включають дані про опади, температуру, вологість, швидкість вітру та інші кліматичні фактори, які можуть впливати на ймовірність та масштаб повеней. Ці дані

зазвичай отримуються з метеорологічних станцій або кліматичних моделей. Для дослідження в регіоні Дубай обрані дані з чотирьох метеорологічних станцій, які значною мірою сприяють аналізу затоплень територій у цьому регіоні. Вони включають станції Дубай, Шарджа, Аль-Айн і Джебель-Алі, оскільки дані про кількість опадів з цих станцій є критичними для моделювання повеней у регіоні.

Гідрографічні показники включають інформацію про річки, озера, водосховища та інші водні об'єкти. Вони містять дані про рівень води, швидкість течії, об'єм води та інші характеристики, що впливають на динаміку затоплень територій. Цифрова модель рельєфу є ключовим компонентом для аналізу та моделювання повеней. ЦМР представляє собою тривимірну цифрову модель поверхні Землі, яка включає висоти на певній площі. Ця модель використовується для розрахунків потоків води та визначення зон можливого затоплення територій. ЦМР завантажується з відповідних джерел, таких як USGS або платформи, що надають дані LIDAR. Обробка ЦМР включає згладжування даних, виправлення помилок та заповнення прогалів для забезпечення точного представлення рельєфу. Аналіз рельєфу використовується для розрахунку нахилів, напрямків стоку та інших характеристик, важливих для моделювання водного потоку та зон затоплення територій. Усі значення висоти в цій моделі зберігаються в метрах відносно геоїда WGS84 EGM96. Цей геоїд базується на еліпсоїді WGS84, а коефіцієнти обчислюються на основі глобальної бази даних 30-хвилинних середніх вільних гравітаційних аномалій, а також на даних, отриманих з супутників і безпосередньої альтиметрії (вимірювання висоти).

Після виконання векторизації супутникових знімків та інтеграції кліматичних, гідрографічних даних і ЦМР, система готова до подальшого аналізу та моделювання. Ці етапи потрібні для точного визначення зон затоплення територій та розробки карт небезпеки, що є важливими для ефективного управління ризиками повеней.

Створення бази геоданих. Спочатку підготовлюються векторні шейп-файли та растрові зображення, які є основою для подальшого аналізу. Визначаються таблиці та поля для зберігання інформації, встановлюється структура бази геоданих, яка забезпечить цілісність та ефективність зберігання даних. База геоданих створюється в середовищі QGIS, де імпортуються вихідні дані з відповідних джерел. Цей етап включає імпорт векторних та растрових даних у визначену структуру бази. Для забезпечення цілісності даних встановлюються зв'язки між таблицями, що дозволяє зберігати логічні відносини між різними наборами даних. Використовуючи інструменти QGIS, проводиться редагування та внесення змін у дані. На цьому етапі застосовується алгоритм дерева рішень, частина процесу машинного навчання, для аналізу зв'язків між описовими ознаками та цільовими мітками для безперервних даних. Алгоритм дерева рішень використовує методи визначення змінних та значень поділу за допомогою домішок, що генеруються в кожному вузлі. Після створення БГД дані оптимізуються та індексуються для підвищення продуктивності та швидкості доступу до них.

Класифікація під контролем є поширеним методом для вилучення інформації із зображень, що включає два основних етапи: навчання та класифікацію. На етапі навчання для кожного класу вибирається набір репрезентативних зразків, який служить основою для навчання моделі класифікації. На етапі класифікації використовуються навчені моделі для оцінки ймовірності того, що кожен піксель зображення належить до одного з класів. Пікселі класифікуються відповідно до класу, що має найбільшу ймовірність, визначену класифікатором. Архітектура нейронної мережі для картографування затоплених територій базується на використанні згорткової нейронної мережі для класифікації територій за трьома класами: водний простір, затоплені території та суша (рис.3.9). Основні етапи її роботи включають підготовку навчальних даних, обробку зображень, послідовну

обробку за допомогою згорткових шарів, інтеграцію характеристик через повнозв'язний шар та остаточну класифікацію.

На першому етапі формується навчальний набір на основі супутникових знімків Sentinel-2 до та після затоплення територій. Зображення проходять попередню обробку для покращення якості вхідних даних. Після цього знімки подаються на вхід згорткової нейронної мережі. Основна частина архітектури складається зі згорткових блоків, які дозволяють виявити локальні особливості зображень, такі як границі води та затоплених територій. Після кожного згорткового шару використовується шар максимального підсумовування, який зменшує просторову розмірність даних та зберігає ключові особливості. Друга гілка мережі містить повнозв'язний шар, який додатково інтегрує отримані ознаки та сприяє кращому узагальненню характеристик. Навчання здійснюється за допомогою трансферного навчання, використовуючи попередньо навчену архітектуру ResNet50 як основу для екстракції ознак. Для оптимізації ваг використовується Adam-оптимізатор та функція втрат бінарної перехресної ентропії. Процес навчання триває 100 епох із поступовою адаптацією вагових коефіцієнтів.

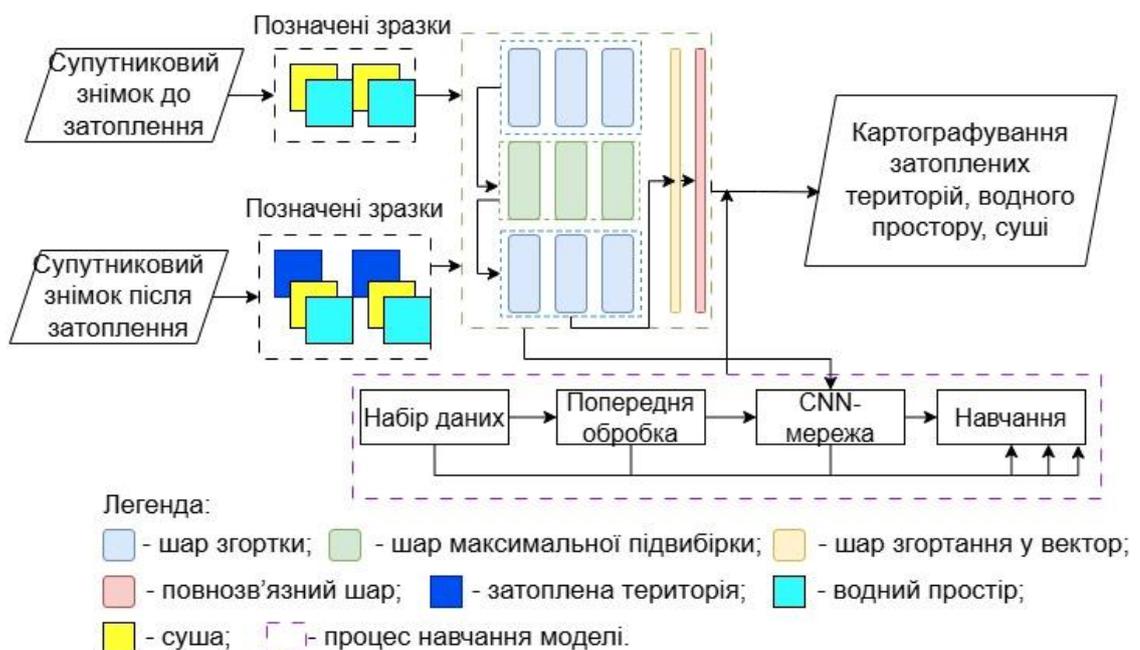


Рисунок 3.9 – Архітектура нейронної мережі

Оцінка ефективності моделі проводиться на валідаційному наборі з використанням метрик точності та втрат. На фінальному етапі пікселі зображення класифікуються до приналежності до одного з трьох класів (водний простір, затоплені території та суша). Запропонована архітектура НМ дозволяє ефективно ідентифікувати затоплені території, інтегруючи методи згорткових мереж і трансферного навчання, що покращує точність сегментації та класифікації територій.

Вхідний шар приймає зображення розміру:

$$H \times W \times C, \quad (3.17)$$

де H – висота, W – ширина, C – кількість каналів.

Конволюційний шар застосовує фільтри для виділення ознак:

$$Y_{i,j,k} = \sum_{m,n} X_{i+m,j+n} \cdot W_{m,n,k} + b_k, \quad (3.18)$$

де X – вхідні дані, W – ваги фільтрів, b – зсув, Y – вихідні ознаки.

Максимальне підсумовування зменшує розмірність карт ознак

$$Y_{i,j,k} = \max_{m,n} X_{s(i,m),s(j,n),k}, \quad (3.19)$$

де s – розмір вікна підсумовування.

Шар згортання у вектор перетворює багатовимірні дані в одновимірний вектор.

Повнозв'язний шар використовує функцію активації для навчання:

$$Y_i = f\left(\sum_j W_{ij} \cdot X_j + b_i\right), \quad (3.20)$$

де f – функція активації, наприклад, ReLU або сигмоїдна функція.

Моделювання затоплення територій є ключовим етапом в оцінці та прогнозуванні потенційних зон затоплення територій. Воно включає використання як гідрологічних, так і гідравлічних моделей для детального аналізу обсягів водного стоку та умов течії потоку, що допомагає у визначенні зон потенційного затоплення територій. На першому етапі використовуються гідрологічні моделі для оцінки обсягів річкового стоку, що генерується під впливом екстремальних погодних подій або комбінацій

різних серій подій у часі. Гідрологічна модель обчислює екстремальні значення, враховуючи дані про опади, топографію, тип ґрунту та умови землекористування, такі як рослинний покрив. Це дозволяє створити криву ґрунтового номера і гідрограф, які відображають поведінку водного стоку на території. Наступний етап передбачає використання гідравлічної моделі для розрахунку умов течії потоку, зокрема швидкості потоку, глибини води та розміру потенційного затоплення територій. Моделювання затоплення територій починається з імплементації цифрової моделі рельєфу у форматі файлу сітки ASCII. Цей файл імплементується у геоінформаційну систему QGIS для подальшої обробки. Обчислення сітки виконуються на основі ASCII файлу, при цьому розмір сітки визначається на рівні 30 м. Розмір сітки обирається за формулою:

$$0.3 \text{ м/с} \leq \frac{Q_{\max}}{A_{\text{elem}}} \leq 3 \text{ м/с} , \quad (3.21)$$

де Q_{\max} – максимальний стік, розрахований для елемента сітки, A_{elem} – площа елемента сітки. Інтерполяція сітки забезпечує визначення репрезентативної висоти кожного елемента.

Для моделювання небезпеки затоплення територій використовуються кумулятивні значення періодів повернення (10, 30, 50, 100 і 300 років) кліматичного та гідрологічного моделювання. Результати моделювання, такі як максимальна глибина потоку та максимальна швидкість потоку, обробляються у програмному забезпеченні QGIS.

Для оцінки небезпеки затоплення карти класифікуються на зони високого, середнього та низького ризику, використовуючи критерії Гарсії та Лопеса. Зони визначаються за глибиною води h :

$$v \cdot h , \quad (3.22)$$

де v – швидкість потоку.

Наприклад, зона $h > 1,5$ м і $v \times h > 1,5$ м/с класифікується як зона високої небезпеки. Зони з $0,5 < h < 1,5$ м і $v \times h < 1,5$ м/с класифікуються як зона середньої небезпеки. Зони з $0,1 < h < 0,5$ м і $v \times h < 0,5$ м/с вважаються зонами низького

рівня небезпеки. Результати класифікації відображаються на картах із кольоровою індикацією рівня небезпеки: червоний для високого рівня, жовтий для середнього та зелений для низького рівня.

3.3 Програмна реалізація геоінформаційної системи

3.3.1 Архітектура геоінформаційної системи

В роботі запропоновану нову архітектуру геоінформаційної технології для прогнозування та оцінки затоплень територій складається з багатокомпонентної системи, яка включає функціональні блоки (рис. 3.10):

- Cloud Server (хмарний сервер для обчислень та зберігання даних);
- DBMS (система керування базами даних для управління доступом та обробки інформації);
- Storage Data (сховище для зберігання великих масивів даних);
- Virtual Desktop (віртуальний робочий стіл для віддаленого доступу до ресурсів);
- GIS Software Applications (ГІС-додатки для аналізу та візуалізації даних);
- Web-service "Interactive map" (веб-сервіс для відображення інтерактивної карти результатів);
- GUI (графічний інтерфейс користувача для взаємодії з системою).

Всі елементи архітектури працюють у взаємозв'язку, забезпечуючи ефективно збирання, зберігання, аналіз та візуалізацію інформації для прогнозування повеней.

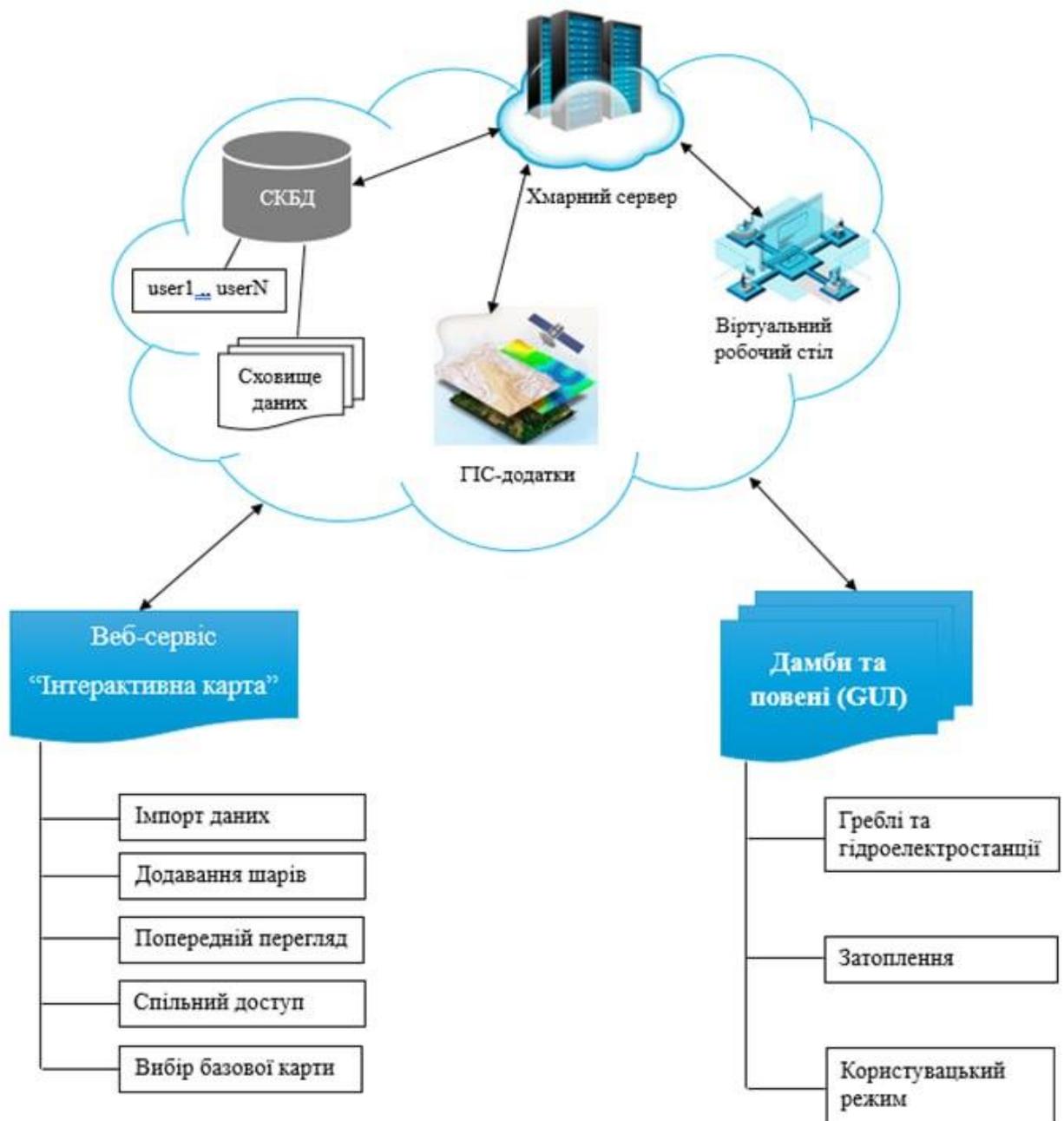


Рисунок 3.10 – Структурна схема архітектури геоінформаційної системи

3.3.2 Хмарна інфраструктура та база даних

Запропонована архітектура геоінформаційної технології використовує хмарне середовище для ефективного зберігання, обробки та доступу до великих обсягів геопросторових даних. Хмарна інфраструктура забезпечує централізоване управління інформацією, яка надходить з різних джерел, таких як супутникові знімки, метеорологічні

спостереження та дані про рельєф місцевості. Це дозволяє оптимізувати роботу системи, роблячи її масштабованою, надійною та доступною для користувачів у будь-якій точці світу.

На рис. 3.11 показано, як сервери в хмарному середовищі виступають центральним вузлом для обробки запитів. Вони здійснюють взаємодію з іншими компонентами системи через веб-сервіси та REST API, що дозволяє здійснювати швидке зберігання та обробку даних за допомогою спеціалізованих програмних додатків. Основними елементами архітектури є веб-сервіс для візуалізації інтерактивних карт, бекенд-система для обробки геопросторових даних і програмне забезпечення ГІС, що оперує файлами та базами даних.

Хмарні сервери підтримують швидке зберігання інформації в базах даних, що дозволяє ефективно працювати з великими обсягами геопросторових даних. СУБД обробляє дані різних типів – супутникові зображення, метеорологічні спостереження, інформацію про рельєф і гідрографічні характеристики, необхідні для прогнозування можливих зон затоплення.

Перевагою хмарної інфраструктури є її здатність масштабувати обчислювальні ресурси залежно від обсягу даних та складності операцій, що виконуються в режимі реального часу. Це забезпечує швидку реакцію на запити користувачів, підтримує процеси аналізу і прогнозування затоплень, а також дозволяє зберігати високу продуктивність системи при збільшенні кількості оброблюваних даних.

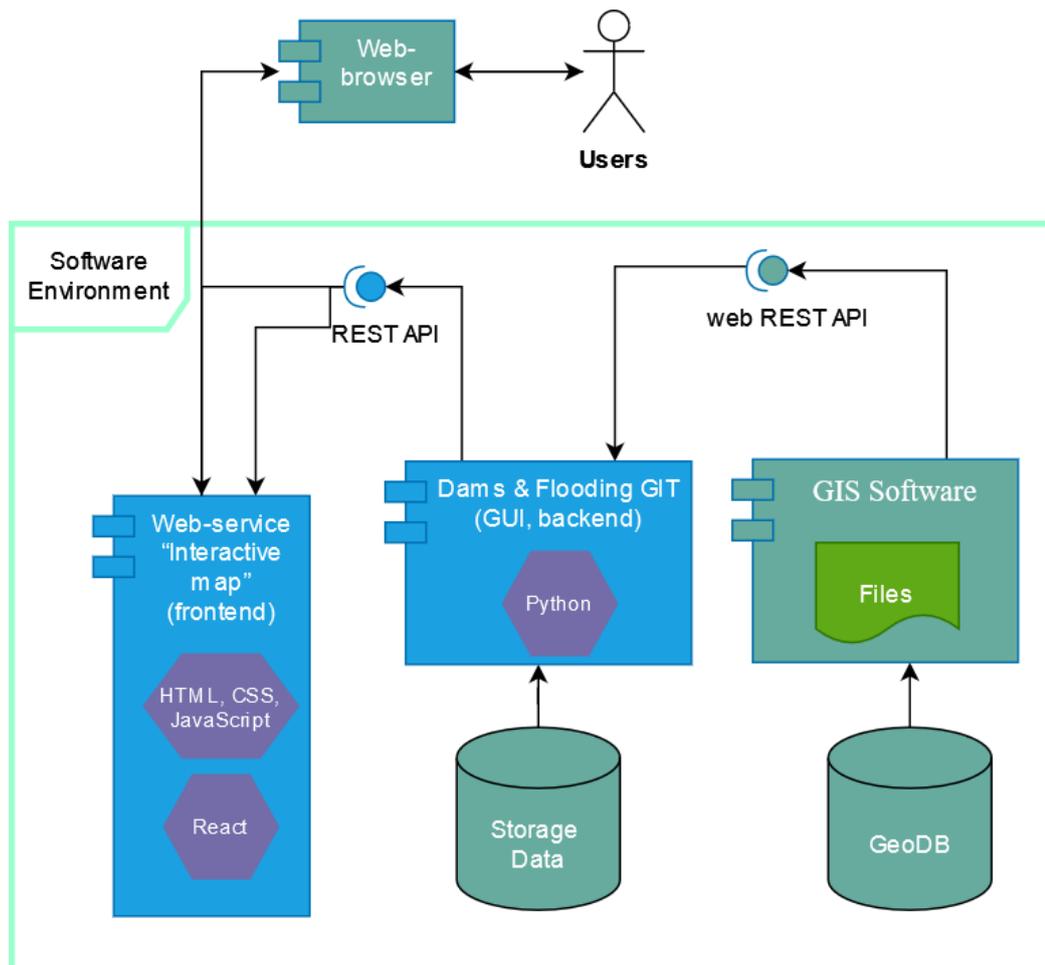


Рисунок 3.11 – Структурна схема хмарної архітектури геоінформаційної системи прогнозування затоплень

3.3.3 Геоінформаційні програмні додатки

Програмне забезпечення для роботи з геопросторовими даними є необхідним для аналізу та візуалізації інформації в геоінформаційній системі. Воно надає користувачам можливість обробляти супутникові зображення, аналізувати рельєф місцевості та будувати моделі затоплення на основі заданих параметрів, таких як кількість опадів або топографія. Ця система інтегрує супутникові дані та цифрові моделі місцевості (наприклад, SRTM), що дозволяє точно прогнозувати потенційні зони затоплення.

Функціонування всієї архітектури забезпечується завдяки розгорнутій серверній частині на хмарному сервісі, де встановлено

необхідне програмне забезпечення для обробки геопросторових даних. ГІС додатки, налаштовані на сервері, забезпечують масштабованість і продуктивність системи, дозволяючи ефективно аналізувати великі масиви даних та забезпечувати користувачів необхідною інформацією в режимі реального часу.

3.3.4 Віртуальне середовище та доступ до даних

Користувачі взаємодіють із системою через віртуальне середовище, які дозволяють їм віддалено працювати з даними та додатками. Цей компонент архітектури забезпечує гнучкість та мобільність у роботі, даючи змогу користувачам мати доступ до потужних обчислювальних ресурсів та великого масиву даних незалежно від їх фізичного розташування. Також через віртуальні інтерфейси користувачі можуть завантажувати власні набори даних та налаштовувати параметри для аналізу зони затоплення.

3.3.5 Інтерактивна карта

Інтерактивна карта дозволяє користувачам візуалізувати результати аналізу, такі як карти затоплених територій, зміни рельєфу та метеорологічні умови. Користувачі можуть імпортувати додаткові шари даних, налаштовувати базову карту, переглядати прогнозовані зони ризику затоплення на різні часові інтервали, а також ділитися цими даними з іншими користувачами. Це сприяє оперативному прийняттю рішень на основі наданих аналітичних результатів.

Через веб-браузер підсистема інтерактивної карти надає можливість імпортувати та додавати шари векторних або растрових даних, вибирати базову карту і переглядати результати моделювання затоплення. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати систему для аналізу та прогнозування ризиків затоплення в реальному часі.

3.3.6 Графічний інтерфейс користувача

Для полегшення доступу до системи та роботи з даними використовується графічний інтерфейс користувача. Він розроблений таким чином, щоб забезпечити зручну та інтуїтивну взаємодію з програмним забезпеченням. Через GUI користувачі можуть вводити необхідні параметри (такі як тривалість та кількість опадів, кут зеніту Сонця тощо), проводити валідацію даних, здійснювати розрахунки зон затоплення та переглядати результати. Інтерфейс також дозволяє завантажувати супутникові дані, моделі місцевості та інші допоміжні файли, необхідні для аналізу.

Основна структура інтерфейсу складається з трьох вкладок: Dams & HPS, Flooding та User Mode та представлено на рис.3.12. Кожна з цих вкладок відповідає за окремий аспект моделювання затоплення. Вкладка Dams & HPS дозволяє користувачеві вводити гідродинамічні параметри для розрахунку наслідків аварій на гідротехнічних спорудах, таких як дамби та гідроелектростанції. Тут можна ввести такі параметри, як час розрахунків, швидкість потоку води, глибина води та інші показники, що визначають поведінку водних мас під час аварій. Для зручності користувач може завантажити супутникові дані, провести валідацію даних та виконати моделювання зони затоплення.

Вкладка Flooding (рис. В.1 та рис. В.2) орієнтована на моделювання природних затоплень, зокрема через інтенсивні опади або інші гідрометеорологічні фактори. Користувач вводить дані про кількість опадів, тривалість дощу, радіометричну яскравість та інші гідрологічні параметри, які впливають на виникнення повеней. Крім цього, за допомогою вкладки користувач може завантажити необхідні топографічні карти та моделі висот (наприклад, дані SRTM) для подальшого аналізу.

Окрема вкладка User Mode (рис.3.13, рис. В.3 та рис. В.4) дозволяє персоналізувати процес роботи з програмою, адаптуючи її до потреб конкретного користувача.

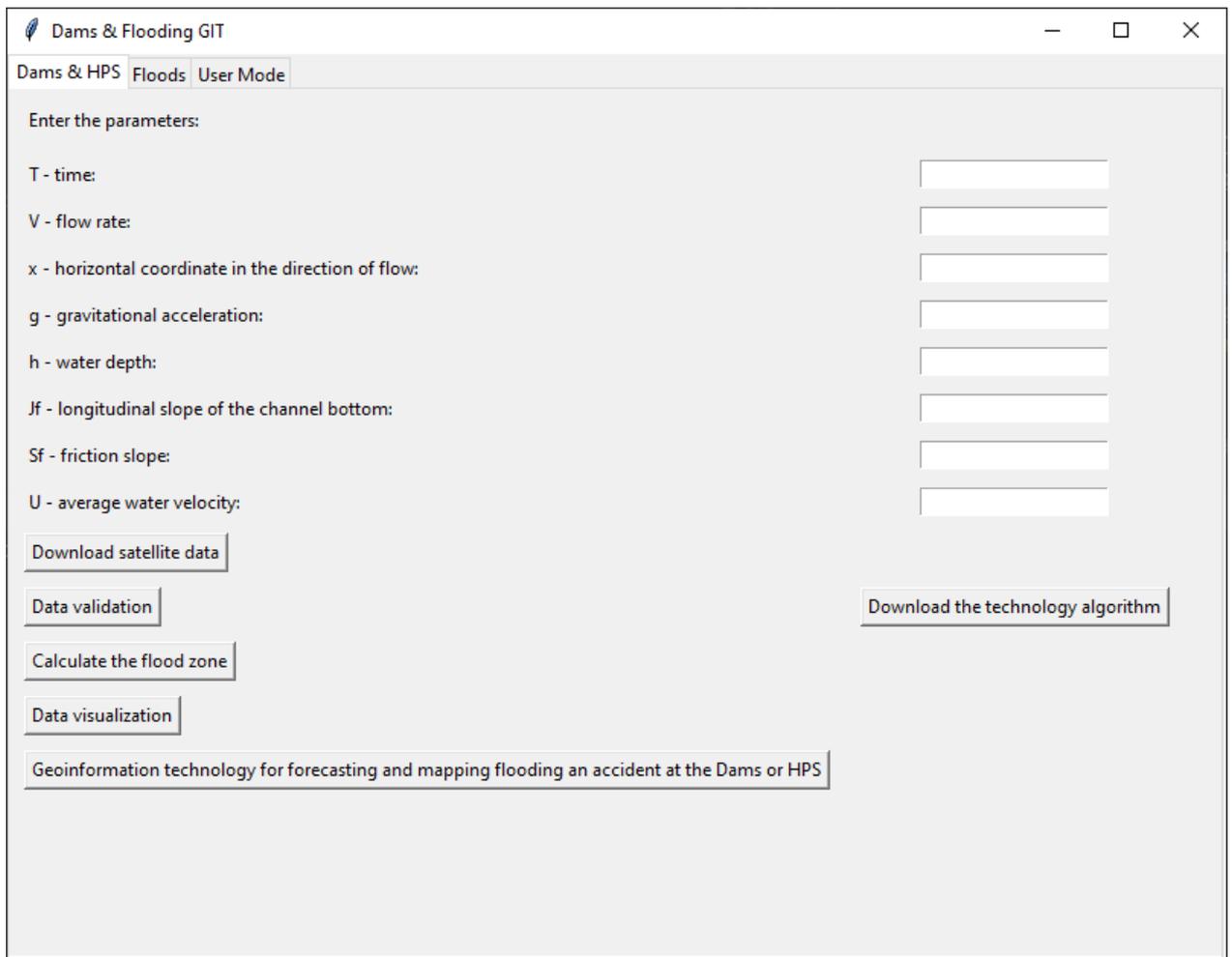


Рисунок 3.12 – Графічний інтерфейс користувача

Усі вкладки містять стандартні функції для завантаження супутникових даних, проведення валідації та обробки параметрів, розрахунку зон затоплення та візуалізації результатів. Такий підхід забезпечує уніфіковану та просту взаємодію з програмою, дозволяючи користувачам легко налаштовувати розрахунки та аналізувати результати моделювання.

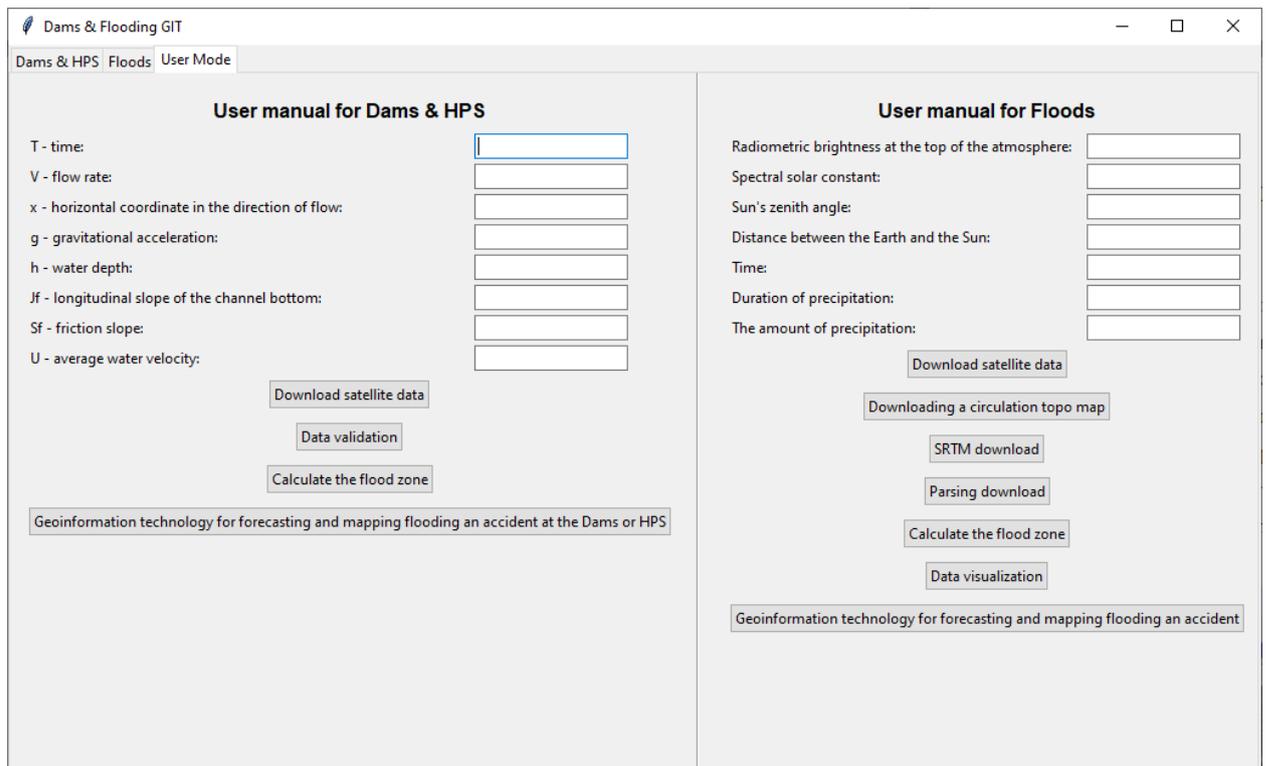


Рисунок 3.13 – Графічний інтерфейс вкладки User Mode

3.4 Висновки по третьому розділу

1. У розділі запропоновано метод комп'ютерного моделювання затоплення території внаслідок прориву дамби на гідроелектростанціях. Описано методику розрахунку глибини затоплення залежно від відстані від ГЕС із застосуванням алгоритмів розрахунку хвилі прориву та методів оцінки гідродинамічних параметрів водного потоку. Це забезпечує можливість прогнозування наслідків затоплення на основі різних сценаріїв руйнування дамби та дозволяє визначати зони потенційної небезпеки.

2. Запропоновано метод нейромережевого виявлення затоплених зон, який складається з попередньої обробки даних, векторизації супутникових знімків та інтеграції цифрової моделі рельєфу. Це дозволяє підвищити точність прогнозування зон затоплення. Використання цифрових моделей рельєфу та кліматичних даних сприяє більш точному моделюванню потоків води та зон ризику, що є важливим для завчасного реагування на надзвичайні ситуації.

3. Запропоновано методологію цифрового картографування потенційних затоплень на основі комплексного використання напівкерованого машинного навчання та геоінформаційної системи QGIS, що дозволяє точно визначати зони затоплення і створювати детальні карти затоплень. Отримання цифрової моделі місцевості та парсинг даних про опади є важливими етапами для оцінки можливих затоплень територій. Метод «точка в полігоні» виявився ефективним для класифікації зон затоплення на основі супутникових знімків, що сприяє створенню точних карт земного покриву та підвищує ефективність управління природними ризиками. Таким чином, інтеграція машинного навчання в процес картографування затоплених зон відкриває нові можливості для покращення моніторингу та управління ризиками повеней.

4. Розроблено програмну архітектуру геоінформаційної технології для прогнозування та моделювання затоплених територій, яка включає інтеграцію хмарних сервісів, баз даних та інструментів для обробки великих обсягів інформації. Це дозволяє автоматизувати процеси аналізу та візуалізації зон затоплення, забезпечуючи ефективне управління даними та надання інтерактивного доступу до результатів.

Основні результати даного розділу опубліковані в роботах автора [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 11].

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОЦІНКИ ЗАТОПЛЕННЯ ТЕРИТОРІЙ ПРИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Результати комп'ютерного моделювання затоплення території при виникненні надзвичайної антропогенної ситуації на Середньодніпровській ГЕС

Військові дії на території України з боку російських військових призвели до виникнення багатьох соціальних та гуманітарних проблем. Це спричинило серйозні загрози виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок застосування ракет великої потужності. Так, виникла загроза затоплення берегів Дніпра через прорив дамби. Руйнування греблі Середньодніпровської гідроелектростанції, Дніпровської гідроелектростанції небезпечно раптовим і неконтрольованим викидом великої кількості води з водосховища, швидким поширенням хвилі прориву від зруйнованої греблі, затопленням берегів міст Кам'янське, Київ, Дніпро, Запоріжжя та Херсон нанесенням матеріальних збитків цьому місту, шкоди здоров'ю людей та їх загибеллю [146].

Метод комп'ютерного моделювання затоплення території на Середньодніпровській ГЕС описано в п.2.3. Це досягається на основі методів розрахунку висоти хвилі прориву та поділу площі поперечного перерізу річки навпіл. Отримані дані дозволили побудувати 3D-модель (рис. 4.1) та спрогнозувати зону затоплення на супутниковому знімку (рис. 4.2).

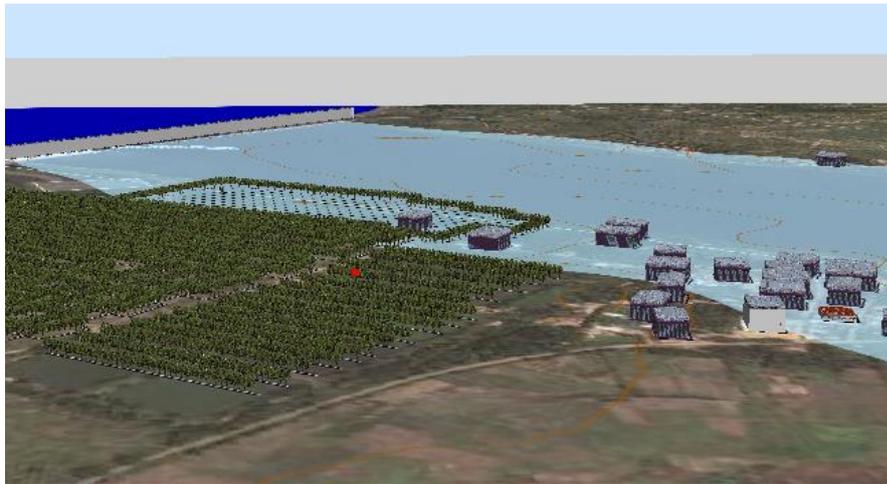


Рисунок 4.1 – Результат тривимірної моделі зони затоплення

Було створено комп'ютерну модель на основі мови Python та програмного забезпечення ArcGIS Desktop. Створений функціонал було реалізовано у вигляді розширення.

На основі побудованої 3D-моделі, було проведено симуляцію надзвичайної ситуації на Середньодніпровській ГЕС. Результати комп'ютерного моделювання показують можливі зони затоплення, позначені на супутниковому знімку (рис. 4.2), що дозволяє оцінити потенційний вплив на прилеглі території. Карта (рис. 4.3) демонструє конкретні зони затоплення з урахуванням гідрологічних та географічних факторів. Згідно з отриманими даними, затоплення може охопити значні території, що включають річки, дороги, та прилеглі інфраструктури.

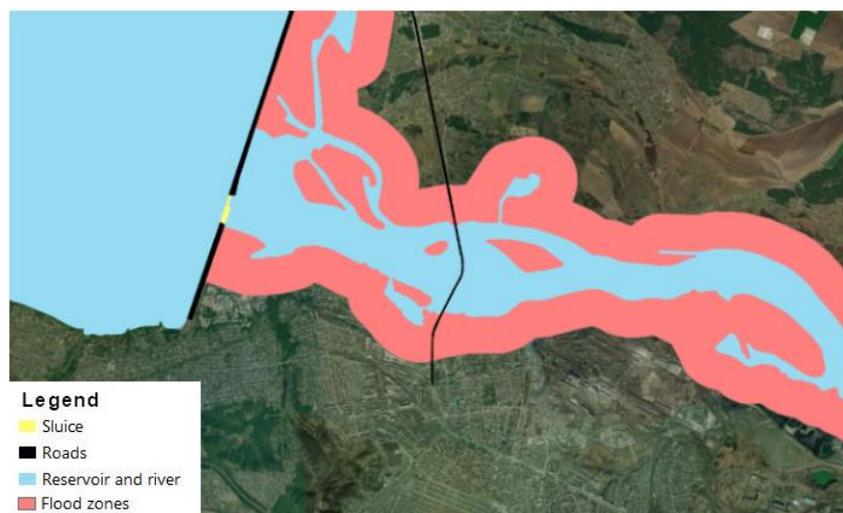


Рисунок 4.2 – Прогнозування зони затоплення на супутниковому знімку

4.2 Результати технології виявлення та моделювання затоплених зон на основі напівкерованого машинного навчання

4.2.1 На прикладі м. Мукачево

Експериментальні дослідження проводилися на основі аналізу знімків супутника Sentinel-2 для міста Мукачево (рис. 4.3а, рис.4.3б). Дослідження включало використання різночасових знімків, отриманих у зимовий та весняний періоди 2024 року. Кожне зображення було попередньо оброблено для корекції атмосферних та спектральних характеристик. Місто Мукачево розташоване в зоні з високим ризиком затоплення через свою близькість до річкових систем та особливості географічного положення. На рисунку 3в наведено карту території міста Мукачево у векторній формі, на якій представлено інфраструктурні та природні елементи. Для реалізації використано систему координат WGS_1984_Web_Mercator_Auxiliary_Sphere (WKID: 3857, Authority: EPSG). Результати напівкерованого навчання після затоплення представлені на рисунку 4.3г у весняний період рис.4.3д після затоплення.

На карті видно класифіковані зони міста Мукачево, де використано кольорове кодування для різних типів поверхонь. Синій колір позначає водні об'єкти, червоний – об'єкти забудови, а жовтий – рослинність та земельні угіддя. Використання напівкерованого навчання підвищує ефективність створення карти затоплення у векторній формі, забезпечуючи точність та детальність відображення результатів. Затоплені зони, позначені синім кольором, свідчать про найбільшу загрозу для інфраструктури та житлових районів, які потребують негайного реагування. Інформація про розподіл затоплених територій дозволяє більш ефективно планувати рятувальні операції та заходи відновлення, забезпечуючи безпеку населення та мінімізацію економічних втрат. На рисунку 4.3г наведено результати картографування затоплення для міста Мукачево, з використанням векторних даних для ідентифікації елементів інфраструктури та зон затоплення. Зони

затоплення представлені різними відтінками синього, зеленого, жовтого та червоного кольорів, що відповідають різним рівням підйому води.

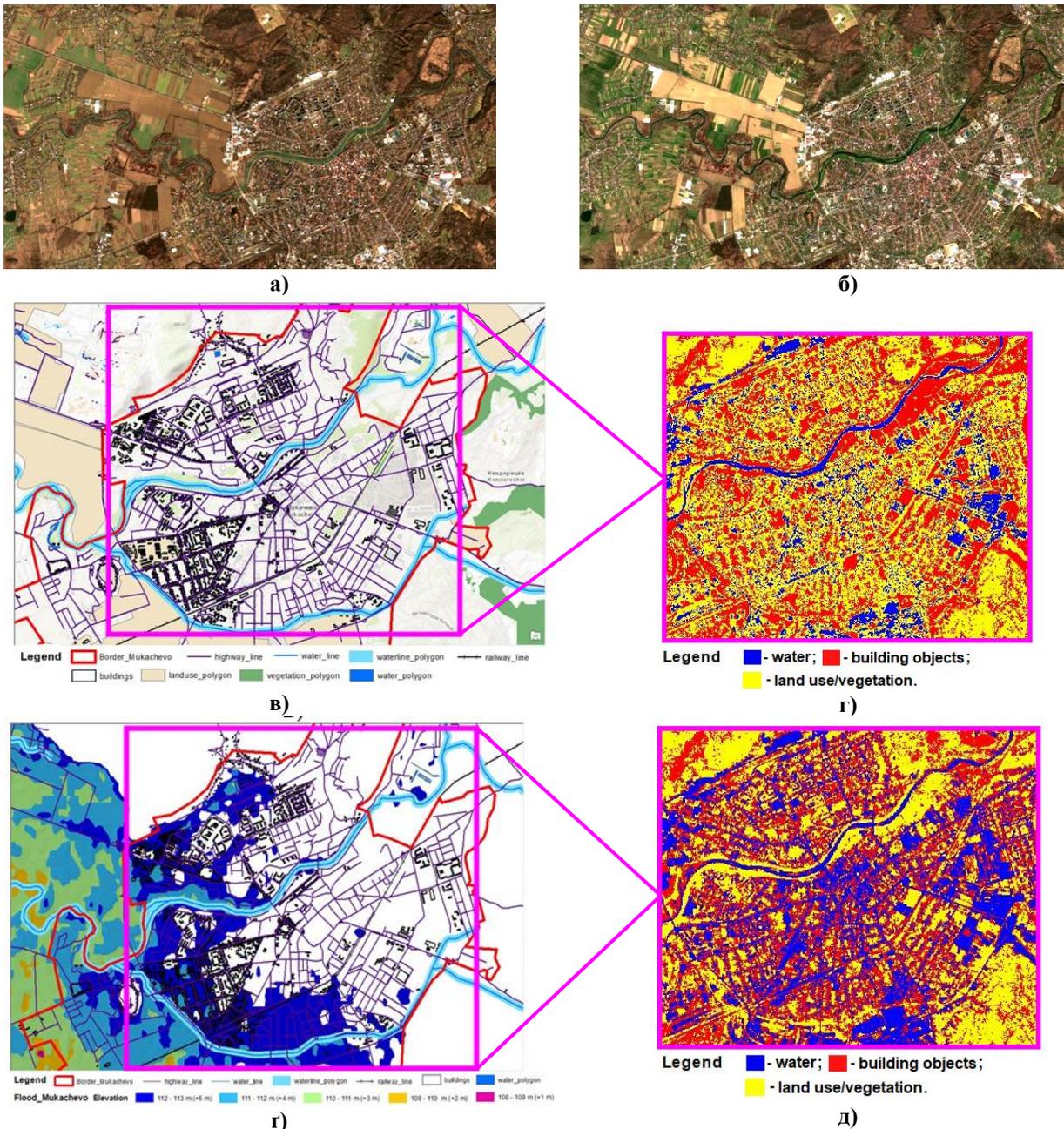


Рисунок 4.3 – Карти території міста Мукачево: а) зображення супутника Sentinel-2 у зимовий період; б) зображення супутника Sentinel-2 у весняний період; в) векторна карта інфраструктурних та природних елементів; г) результат напівкерованого навчання у весняний період; г) карта затоплення після паводку; д) результат напівкерованого навчання у зимовий період

Темно-синій колір відповідає рівню затоплення від 112 до 113 метрів (+5 м), синій колір – від 111 до 112 метрів (+4 м), світло-синій колір – від 110 до 111 метрів (+3 м), зелений колір – від 109 до 110 метрів (+2 м), жовтий колір – від 108 до 109 метрів (+1 м). Центральна частина міста зазнає найбільшого затоплення, з рівнем води до +5 м, що вказує на необхідність особливої уваги до цієї зони під час планування заходів з попередження затоплення. Прилеглі до річки території також сильно затоплені, особливо в зонах ближче до річок та каналів. Південно-східна частина міста має затоплення на рівні до +2 м, що може вказувати на менш значний підйом води в цій частині, проте все одно потребує належної уваги.

На рисунку 4.4 наведено прогнозовані результати затоплення в місті Мукачево. Червоний колір (115-116 м, +8 м) охоплює найвищий рівень затоплення і включає території, які можуть бути затоплені на 8 метрів вище поточного рівня води. Помаранчевий колір (114-115 м, +7 м) включає ділянки з потенційним підвищенням рівня води на 7 метрів. Коричневий колір (113-114 м, +6 м) позначає зону, що може бути затоплена на 6 метрів. Світло-коричневий колір (112-113 м, +5 м) охоплює ділянки, які можуть бути затоплені на 5 метрів. Жовтий колір (111-112 м, +4 м) представляє території з можливим підвищенням води на 4 метри. Світло-жовтий колір (110-111 м, +3 м) позначає ділянки з потенційним підвищенням води на 3 метри. Зелений колір (109-110 м, +2 м) відображає зону затоплення з підняттям води на 2 метри. Світло-зелений колір (108-109 м, +1 м) охоплює найменший рівень затоплення, де вода може піднятися на 1 метр.



Рисунок 4.4 – Цифрова карта прогнозованих затоплень для міста Мукачево

У процесі дослідження була проведена оцінка похибок оновленої цифрової топографічної карти на основі координатних даних. Точність планового положення об'єктів цифрової топографічної карти оцінюється шляхом порівняння координат контрольних точок, визначених за ортофотопланом, з координатами відповідних точок цифрової карти. На одну трапецію карти необхідно визначити не менше 20-ти контрольних точок. Для контрольних точок обрано об'єкти місцевості: перетини доріг і вулиць, кути будинків, поворотів огорож, тощо.

В таблиці 4.1 наведено результати оцінки точності оновленої цифрової топографічної карти: номер – порядковий номер контрольної точки; X' та Y' – первинні координати точок за ортофотопланом системи координат Web Mercator (WGS 84); X'' та Y'' – оновлені координати (WGS 84) точок за цифровою топографічною картою; Δx_i та Δy_i – відхилення координат по широті X та довготі Y в метрах. Вони обчислюються як різниця між первинними (X' та Y') та оновленими (X'' та Y'') координатами та похибка (M_s) – просторова похибка в метрах.

Таблиця 4.1 – Оцінка точності оновленої цифрової топографічної карти

Номер	X'	Y'	X''	Y''	Δx_i	Δy_i	Похибка (M_s)
1	2526678,982	6181938,545	2526677,220	6181935,782	1,76	2,76	3,28
2	2526715,201	6182035,912	2526714,260	6182032,619	0,94	3,29	3,42
3	2527085,383	6181628,100	2527081,150	6181628,570	4,23	-0,47	4,26
4	2526922,164	6181554,722	2526923,576	6181551,900	-1,41	2,82	3,16
5	2526869,013	6181467,233	2526868,072	6181462,529	0,94	4,70	4,80
6	2526553,864	6181580,592	2526551,982	6181578,711	1,88	1,88	2,66
7	2529534,078	6183531,673	2529531,726	6183529,821	2,35	1,85	2,99
8	2529574,529	6183437,128	2529573,589	6183433,365	0,94	3,76	3,88
9	2529218,929	6183395,735	2529217,988	6183393,384	0,94	2,35	2,53
10	2529098,984	6183328,943	2529097,573	6183326,121	1,41	2,82	3,16
11	2529305,477	6183205,705	2529304,546	6183204,765	0,93	0,94	1,32
12	2529293,718	6182889,616	2529290,425	6182891,497	3,29	-1,88	3,79
13	2528993,350	6182736,616	2528991,956	6182735,215	1,39	1,40	1,98
14	2528727,591	6182676,408	2528725,909	6182678,290	1,68	-1,88	2,52
15	2529255,818	6182460,038	2529253,466	6182457,215	2,35	2,82	3,67
16	2529816,030	6182134,541	2529814,619	6182133,330	1,41	1,21	1,86
17	2530532,546	6181151,312	2530528,313	6181149,981	4,23	1,33	4,44
18	2530761,617	6181491,390	2530760,706	6181489,438	0,91	1,95	2,15
19	2532356,737	6182160,703	2532354,621	6182158,986	2,12	1,72	2,72
20	2532663,890	6182120,922	2532662,126	6182119,746	1,76	1,18	2,12

Результати табл.4.1 показують середні квадратичні похибки оновленої цифрової топографічної карти на рівні 3,21 метра, що є прийнятним для багатьох практичних застосувань. З урахуванням коригувального коефіцієнта 1,25 середня похибка становить 2,57 метра. Така точність дозволяє більш ефективно використовувати цифрову карту для моніторингу та управління територіями, зокрема для аналізу та планування заходів у випадку затоплень.

4.2.2 На прикладі м. Дубай

Об'єднані Арабські Емірати (ОАЕ) є державою, розташованою на Аравійському півострові, відомою своїм сухим пустельним кліматом. У квітні 2024 року ця країна зазнала впливу потужної системи повільних штормів, що призвела до значних опадів, які перевищили річну норму за кілька днів. Це викликало раптові повені в східних регіонах країни, що

спричинило затоплення доріг та порушення транспортної інфраструктури. Для аналізу впливу повені на регіон було використано супутникові знімки Landsat-8, отримані до (рис.4.5 а) та після (рис.4.5 б) повені. Знімки до повені, зроблені на початку квітня 2024 року, використовувались для визначення базового стану території. Після завершення штормів, знімки, отримані 19 квітня 2024 року, дозволили оцінити масштаби затоплення та його вплив на інфраструктуру.



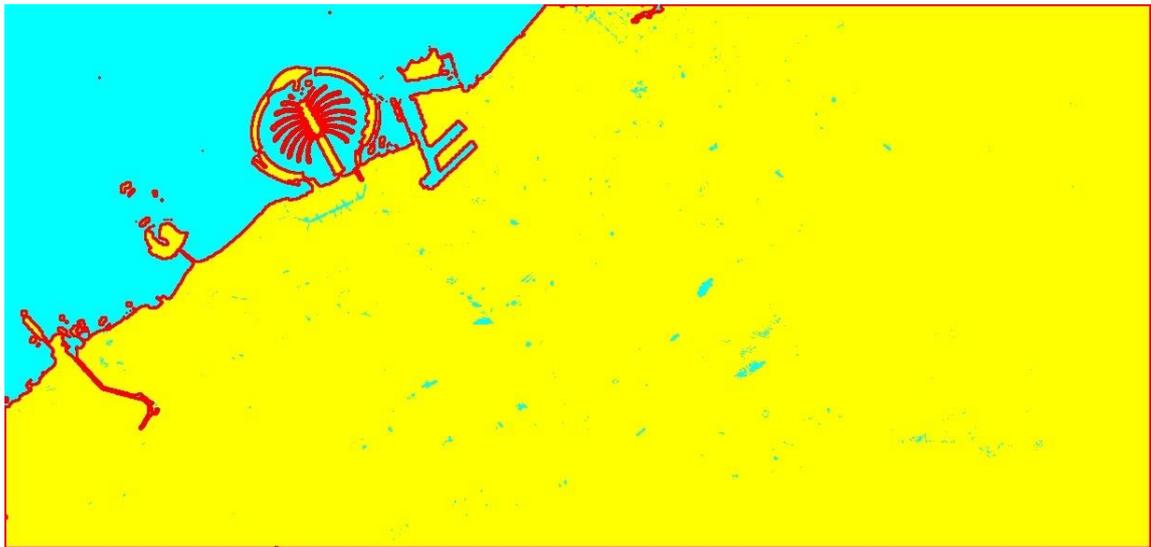
а)



б)

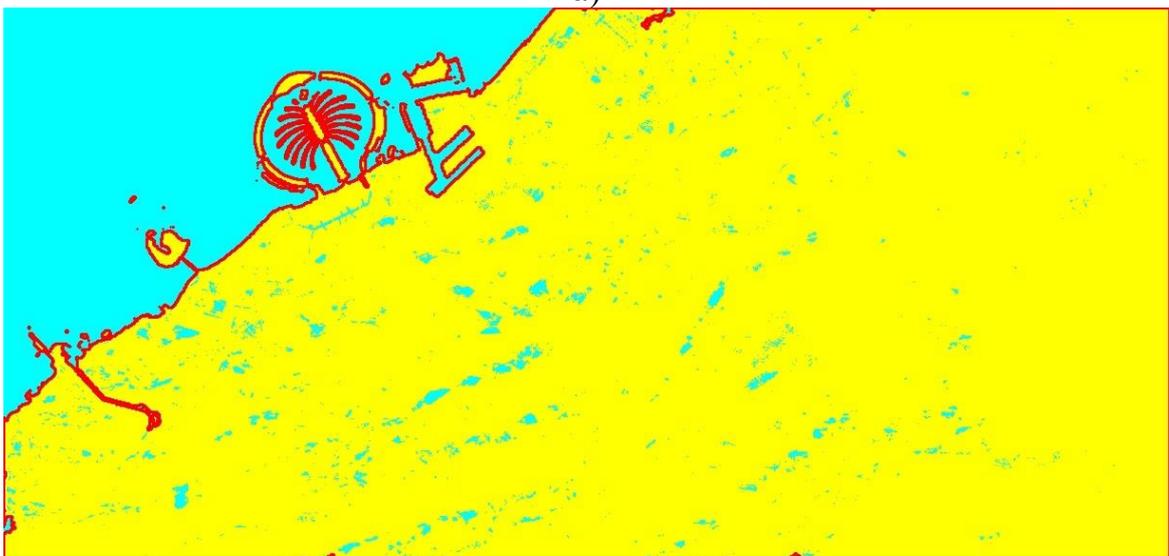
Рисунок 4.5 – Супутникові знімки космічного апарату Landsat 8-9 синтезовані у R-G-B канали: а) 18.03.2024 року; б) 19.04.2024 року

На рис.4.6 наведено результати напівкерованого навчання для м. Дубай у весняний період до повені (рис.4.6 а) та після повені (рис.4.6 б).



Легенда: ■ - суша; ■ - вода; ■ - контури

а)



Легенда: ■ - суша; ■ - вода; ■ - контури

б)

Рисунок 4.6 – Результати напівкерованого навчання для класифікації супутникового знімку Landsat 8-9: а) до повені 18.03.2024 року; б) після повені 19.04.2024 року

До повені, метод на основі напівкерованого навчання успішно класифікував зображення на дві основні категорії: суша та вода, виділяючи ці області на зображенні. Класифікація базувалася на розбитті зображення на

класи, що відповідали найбільш характерним спектральним характеристикам. Зокрема, суша була позначена жовтим кольором, вода – синім, а контури водних об'єктів – червоним. Однак цей метод має суттєве обмеження: він не здатний класифікувати затоплені території як окремий клас, а лише розрізняє водну поверхню та сушу. Після повені метод не зміг коректно ідентифікувати новоутворені водні області, що виникли внаслідок підвищення рівня води. Замість чіткого відображення цих ділянок деякі території залишалися класифікованими як суша, що, спричинено зменшенням контрасту між поверхнею води та навколишніми об'єктами. Крім того, точність класифікації земної поверхні була обмеженою через присутність різноманітних природних об'єктів, зокрема рослинності, забудови та інших текстур. Пікселі, що відповідали цим елементам, могли бути помилково віднесені до класів суші або води. Особливо це проявлялося у зонах змішаних спектральних характеристик, наприклад, уздовж берегових ліній, де сині та зелені відтінки мали схожість із кольорами води та суші.

Додатково, після повені контури води стали менш чіткими, що зумовлено тим, що метод K-means не враховує складні гідрологічні процеси, такі як розмивання берегових ліній під час затоплення. Як наслідок, нові водні поверхні неповноцінно визначені, а їхні контури – класифіковані з недостатньою точністю.

4.3 Результати роботи технології виявлення та моделювання затоплених територій при природних надзвичайних ситуаціях на основі загорткових нейронних мереж

Для подальшого аналізу впливу повені на регіон було застосовано модель згорткових нейронних мереж. Спочатку для отримання бінарних масок (рис. 4.7) було проведено класифікацію пікселів, де водні об'єкти були позначені як 1, а суша – як 0. Це дозволило створити бінарні маски, які наочно відображають присутність водних об'єктів на супутникових знімках.



Легенда: - суша

Рисунок 4.7 – Бінарна маска супутникового знімка 19.04.2024 року

Після отримання бінарних масок було створено знімки з чіткою класифікацією територій як суші або води. На цих знімках водні об'єкти були виділені червоним кольором, що дозволяє візуально ідентифікувати контури затоплених зон. Це дає змогу легко порівняти зміни між зображеннями до і після повені, особливо в областях, що зазнали затоплення. Зміни між зображеннями до і після повені стали очевидними, особливо в областях, що зазнали затоплення. Це наочно демонструє масштаби і розподіл води після повені, що є важливим для планування відновлювальних заходів та управління територіями. На зображеннях після обробки машинного навчання (рис. 4.8) чітко видно зміну класів у затоплених районах, що підтверджує ефективність застосованої методики класифікації.

Для оцінки продуктивності моделі класифікації у даному дослідженні були використані комбінація категоріальної перехресної ентропії та індексу Dice як функція втрат, а також метод Адама як оптимізатор. Метрика точності, яка була застосована для оцінки результатів моделювання, є F1 – score, що дозволяє комплексно оцінити ефективність моделі в умовах дисбалансу класів. Точність визначається як відношення кількості правильно класифікованих позитивних зразків до загальної кількості класифікованих як

позитивні, а повнота – як відношення кількості правильно класифікованих позитивних зразків до загальної кількості позитивних зразків у даних.



Легенда: ■ - суша; ■ - водний простір.

а)



Легенда: ■ - суша; ■ - водний простір; ■ - затоплена територія; - контури затоплених територій.

б)

Рисунок 4.8 – Нейромережева класифікація супутникового знімку Landsat 8-9: а) до повені 18.03.2024 року; б) після повені 19.04.2024 року

Точність [144]:

$$\text{Точність} = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (4.1)$$

де TP – кількість правильних позитивних прогнозів, FP – кількість хибних позитивних прогнозів.

Повнота [144]:

$$\text{Повнота} = \frac{TN}{TN + FP}, \quad (4.2)$$

де FN – кількість хибних негативних прогнозів.

F1 Score [144]:

$$F1 = \frac{2 \cdot \text{Точність} \cdot \text{Повнота}}{\text{Точність} + \text{Повнота}}. \quad (4.3)$$

Отримані результати нейромережевої класифікації земного покриття підтверджують ефективність запропонованої в роботі технології виявлення затоплених територій. Оптимізація моделі за допомогою методу Адама та застосування категоріальної перехресної ентропії в поєднанні з індексом Dice як функції втрат забезпечили стабільне навчання та узагальнюючу здатність моделі. Аналіз метрик точності, повноти та F1-score (табл. 4.2) свідчить про високий рівень відповідності прогнозованих класів реальним даним. Зокрема, точність класифікації на навчальній вибірці досягла 0,88, а на валідаційній – 0,87, що вказує на збалансоване узагальнення без значного перенавчання.

Таблиця 4.2 – Результати нейромережевої класифікації на навчальній та валідаційній вибірках

Вибірка	Точність	Повнота	Повнота
Навчальна	0,88	0,85	0,86
Валідаційна	0,87	0,84	0,85

Таблиця 4.3 демонструє оцінку F1 для кожного класу, розраховану на основі прогнозів моделі, отриманих з тестових даних. Результати вказують на те, що модель демонструє високу точність у класифікації класу водних об'єктів (FL) порівняно з класом земної поверхні (FV). Клас FL, що представляє затоплені території, передбачений з вищою точністю, ніж клас FV.

Таблиця 4.3 – Оцінка F1 для кожного класу на основі тестових даних

Клас	Точність	Повнота	F1
FL	0,91	0,89	0,90
FV	0,84	0,78	0,81

У процесі дослідження було побудовано кілька графіків, які наочно демонструють інтенсивність опадів у місті Дубай під час шторму. На рис.4.9 представлено результат у вигляді графіка з використанням сітки даних з координатами, що охоплюють місто Дубай та прилеглі території. Інтенсивність опадів була відображена методом контурної заливки, що дозволяє детально показати зміни в кількості опадів. Кольорова шкала показує величину опадів у кожній точці, де більш інтенсивні опади позначені темнішими відтінками синього. Графік дозволяє візуально оцінити розподіл опадів по всій території міста Дубай та визначити області з найбільш інтенсивними опадами.

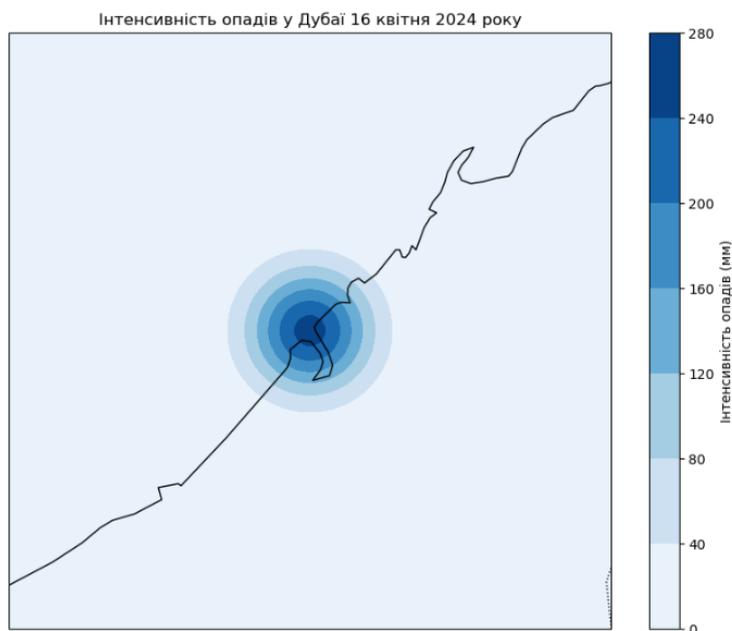


Рисунок 4.9 – Графік інтенсивності опадів в місті Дубай

Рисунок 4.10 а показує площі затоплення за період з 15 квітня по 19 квітня 2024 року. З графіка видно, що площа затоплення поступово

збільшувалась з 10.2 гектарів 15 квітня до 42.61 гектарів 19 квітня. Це відображає наростаючий ефект шторму, що супроводжувався інтенсивними опадами, які викликали значні затоплення. Кругова діаграма на рис.4.10 б допомагає зрозуміти масштаб затоплення в порівнянні з іншими територіями, вказуючи на суттєву частку затоплених земель.

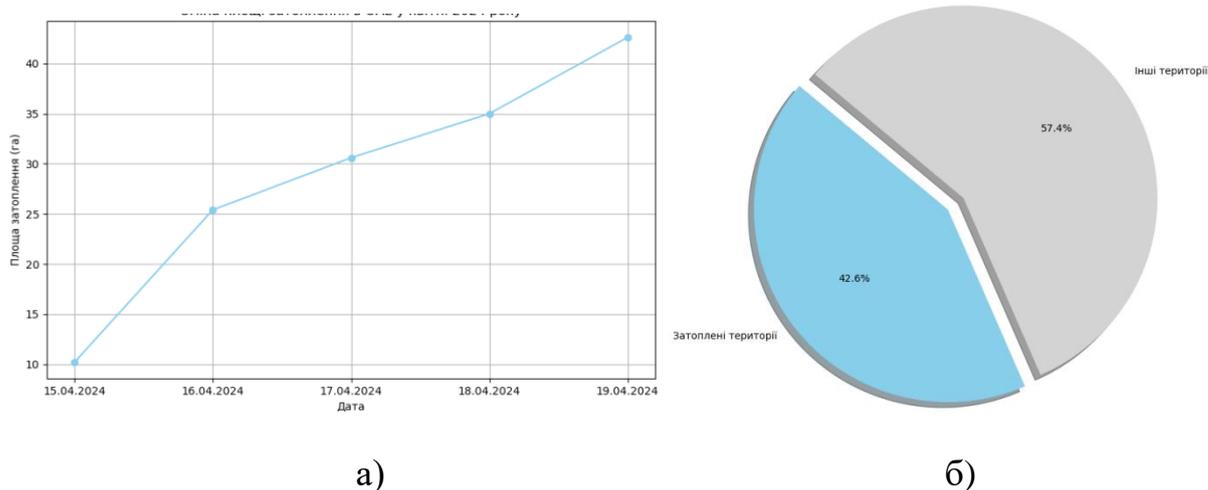


Рисунок 4.10 – Зміни площі затоплення в місті Дубай: а) графік в період з 15.04.2024 року по 20.04.2024 року; б) діаграма співвідношення площі затоплених та інших територій

На рис.4.11 значна частина території міста Дубай (райони: Nasyan 1, Nasyan 2, Jebel Ali, Palm та Jebel Ali) затоплена водою глибиною від 1.75 до 2 метрів, що позначено чорними крапками. Це вказує на серйозний вплив затоплення на ці райони. Інші кольори вказують на поступове зменшення рівня води в різних частинах території. Зображення також показує інші рівні затоплення, розподілені по різних ділянках: рожеві ділянки (1.5 – 1.75 метра) займають меншу площу порівняно з червоними; жовті, світло-зелені, зелені, бірюзові та блакитні ділянки позначають райони, в яких поступово зменшується рівень затоплення.

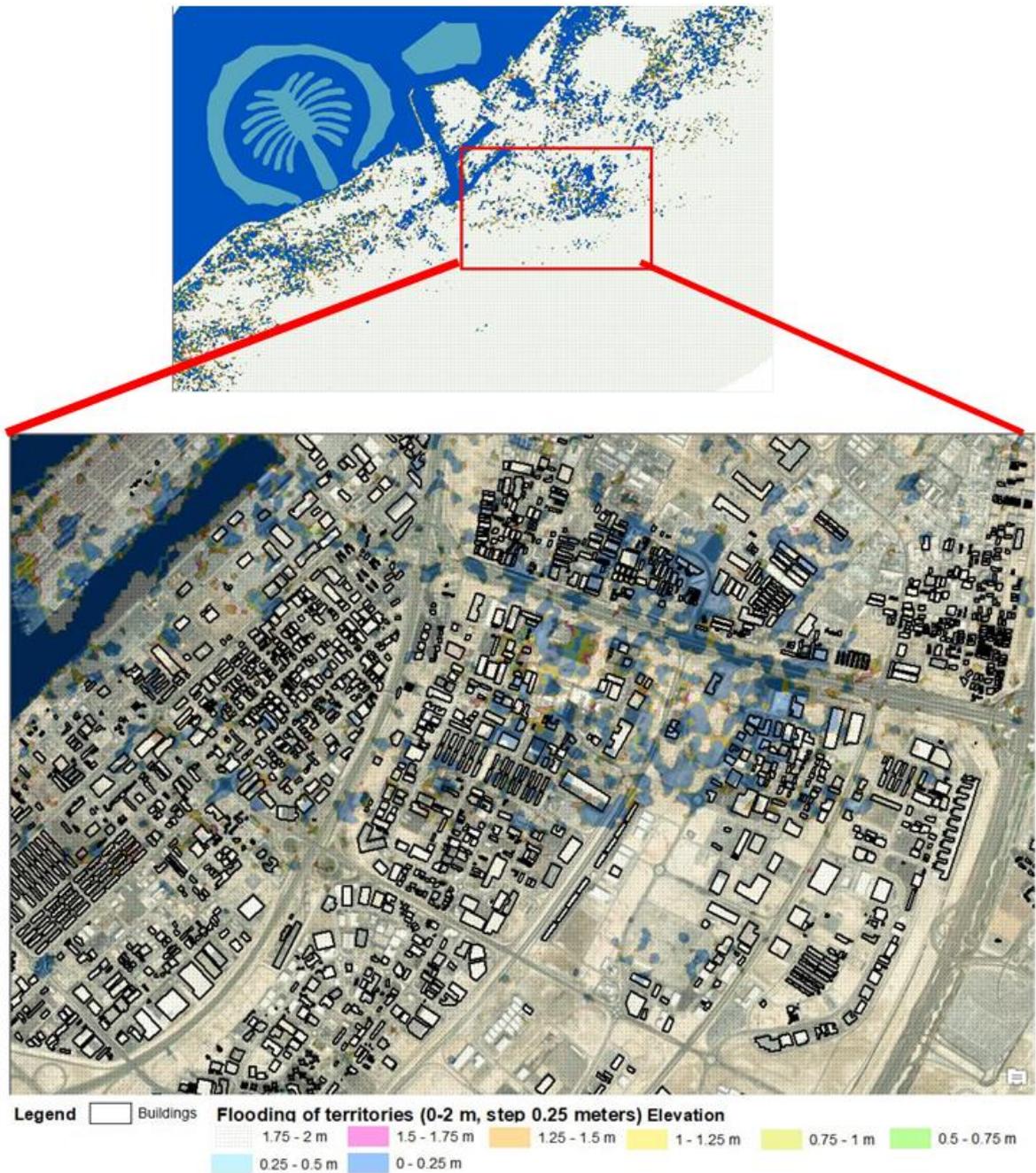


Рисунок 4.11 – Карта зон затоплення міста Дубай

На рисунку 4.12 представлено вісім карт, що відображають зони затоплення району Jebel Ali Industrial 2. Карти демонструють глибину затоплення в діапазоні від 0 до 2 метрів з кроком 0,25 метра. Кожна карта відображає території, які будуть затоплені на певну глибину, що дозволяє здійснити детальний аналіз впливу поступового підвищення рівня води на цей район.

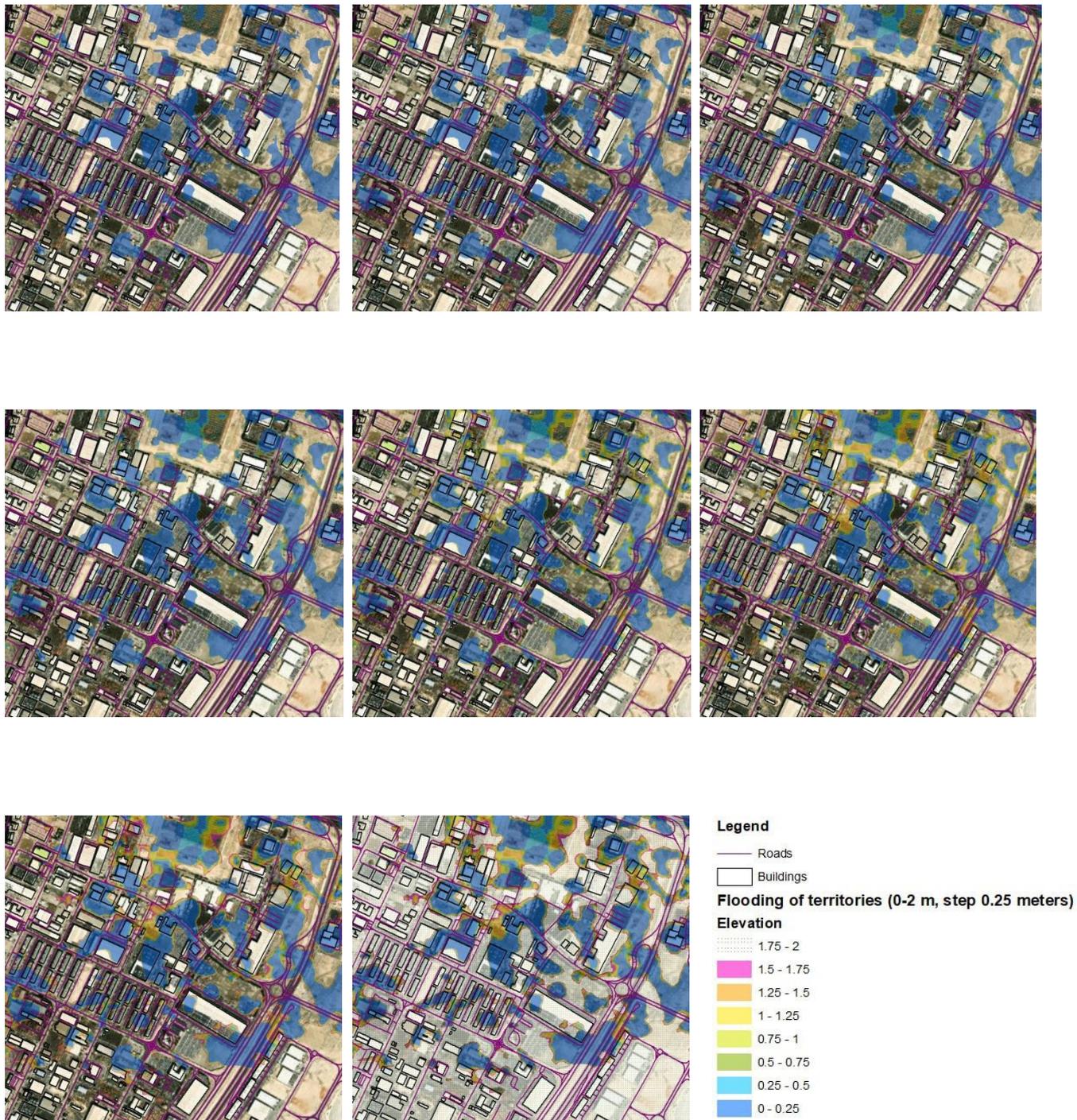


Рисунок 4.12 – Карта зон затоплення району Jebel Ali Industrial 2

Загальний розподіл затоплення вказує на його нерівномірність, з більшою глибиною затоплення в північній і центральній частині району. Деякі території залишаються незатопленими або затопленими на незначну глибину, що вказує на різницю у висоті та особливостях рельєфу. Крок 0,25 метра, який використовується в даних картах, дозволяє детально відобразити

динаміку затоплення та зрозуміти, як поступове підвищення рівня води впливатиме на територію. Початковий етап затоплення (0 – 0,25 метра) охоплює обмежені території, переважно в низько розташованих частинах району. Зі збільшенням рівня води до 0,5 метра затоплені території розширюються, переважно вздовж річок і каналів. При підвищенні рівня води до 0,75 метра спостерігається значне розширення зон затоплення, особливо в низько розташованих районах. Коли глибина затоплення досягає 1 метра, затоплення охоплює ще більше територій, включаючи деякі забудовані райони. Подальше підвищення рівня води до 1,25 метра призводить до затоплення ще більших частин промислових зон. При досягненні рівня води 1,5 метра затоплення поширюється на ще більші території. На глибині 1,75 метра спостерігається майже повне затоплення низькорозташованих частин району, а при максимальній глибині затоплення до 2 метрів охоплюються найнижчі території, з мінімальними залишками незатоплених зон. Виходячи з отриманих даних, райони з низькою абсолютною висотою є найбільш вразливими до затоплення, з максимальним затопленням до 2 метрів. Прогресивне затоплення з кроком 0,25 метра демонструє, як поступове підвищення рівня води впливає на територію, надаючи цінну інформацію для планування заходів щодо захисту та адаптації. Для районів з глибиною затоплення понад 1 метр слід розглянути додаткові захисні заходи, такі як будівництво дамб або підвищення рівня будівель. Отримані результати можуть бути використані для подальшого аналізу та розробки стратегій управління ризиками затоплення, а також для інформування громадськості та планування розвитку інфраструктури в районі Jebel Ali Industrial 2.

4.3.1 Порівняння результатів технології виявлення та моделювання затоплених територій напівкерованого машинного навчання та згорткових нейронних мереж

Метод напівкерованого навчання продемонстрував певні труднощі у точності сегментації, зокрема щодо виявлення водних об'єктів. До повені, на зображеннях видно чітко виділені області суші та води, але контури водних тіл представлені дещо нечітко. Після повені, метод напівкерованого навчання виявив певні зміни, однак на зображеннях після повені частина води була неправильно класифікована як суша, а контури води залишаються нечіткими, що вказує на обмеження методу в умовах високої динаміки змін на зображеннях. Контури, що позначають межу води, мають різну точність в залежності від кольорових відтінків і текстурних змін, які можуть бути не враховані при класифікації пікселів.

Метод згорткових нейронних мереж, порівняно з методом напівкерованого навчання, показав набагато кращі результати. До повені CNN здатний точно сегментувати воду та сушу, чітко визначаючи контури води, навіть у складних умовах з різними відтінками синього та зеленого, що характерні для природних ландшафтів. Після повені модель CNN продемонструвала високий рівень точності, зберігаючи чіткість контурів водних тіл і виявляючи зміни внаслідок підвищення рівня води, таких як нові водяні поверхні або затоплені території. Контури були чіткими і точними, що дозволяє робити висновки про високий потенціал CNN для виявлення таких змін, навіть в умовах складного фону та різних природних бар'єрів.

Порівняння результатів демонструє суттєву різницю між методами. Метод напівкерованого навчання хоча й здатен швидко класифікувати пікселі зображення, проте має низьку точність на зображеннях зі складними фонами та не може точно відобразити контури водних тіл. В результаті, зображення після повені часто містять помилки в класифікації, де водні області можуть бути переплутані з іншими об'єктами. У той же час, CNN

дозволяє не лише чітко сегментувати водні та сухі території, а й виявляти зміну територій до та після повені з високою точністю, що є критичним для завдань моніторингу навколишнього середовища та управління водними ресурсами.

Методи класифікації напівкерованого навчання та CNN показали різні рівні точності для виявлення класів водних об'єктів (FL) і суші (FV). Результати представлено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Порівняння метрик точності класифікації методами напівкерованого навчання та CNN для класів FL та FV

Клас	Метод	Точність	Повнота	F1-міра	Загальна точність	Каппа-коефіцієнт
FL (вода)	K-means	0,83	0,75	0,76	0,82	0,83
	CNN	0,91	0,89	0,90	0,96	0,93
FV (суша)	K-means	0,80	0,75	0,77	0,73	0,77
	CNN	0,84	0,78	0,81	0,91	0,88

Метод класифікації напівкерованого навчання забезпечив достатню ідентифікацію як водних об'єктів, так і територій суші, проте його ефективність є обмеженою через недостатнє врахування просторових та текстурних особливостей водних об'єктів.

CNN демонструє вищі значення точності, повноти та F1-міри, особливо для класу «вода» ($F1 = 0,90$), що вказує на її здатність більш точно виділяти границі водних об'єктів. Водночас метод K-means, хоча й ефективний для швидкої класифікації, виявляє обмежену здатність до обробки зображень зі складною структурою, що відображається нижчими значеннями метрик.

4.4 Результати комп'ютерного моделювання та картографування території затоплення внаслідок прориву греблі Дніпровської ГЕС при антропогенних надзвичайних ситуаціях

Зона затоплення при руйнуванні ГЕС визначається як частина прилеглої до річки (озера, водосховища) місцевості, яка затоплюється водою в результаті цього події. Вона поділяється на дві основні частини: зону катастрофічного затоплення та зону затоплення. ЗКЗ охоплює ту частину зони затоплення, де поширюється руйнівна хвиля прориву, що призводить до серйозних наслідків, таких як масові людські втрати та знищення будівель та інших матеріальних цінностей. Основними вражаючими факторами катастрофічного затоплення є руйнівна хвиля прориву, водний потік та спокійні води, що затоплюють суходіл та об'єкти. Вплив хвилі прориву на об'єкти нагадує дію ударної хвилі від ядерного вибуху, але характеризується меншою швидкістю та більшою щільністю речовини (води). Для аналізу та моделювання зони катастрофічного затоплення використовуються різноманітні методи та техніки, включаючи 3D-моделювання. Під час моделювання використовуються дані про топографію місцевості, розміри водосховища, напір води та інші фактори, що впливають на затоплення територій, описаних в п.3.1 – 3.6.

Один з методів аналізу зони катастрофічного затоплення полягає у використанні трапеційного наближення для перерізу русла, де нижня основа відповідає нормальному рівню води в річці, а верхня основа складається з відстаней від осі річки до відповідних горизонталей по берегах. Це дозволяє визначити площу перерізу, утвореного хвилею прориву, та висоту підйому води. У випадку 3D-моделювання розміри вічка визначаються як 10 м × 10 м × 1 м у регіонах з населеними пунктами та ризиком для жертв, та 20 м × 20 м × 1 м в інших регіонах. Загалом, було створено значну кількість прямокутних комірок сітки у різних блоках сітки для аналізу різних сценаріїв. Візуалізація

чисельної моделі з резервуаром демонструє області затоплення та дозволяє оцінити наслідки руйнівної хвилі прориву у відповідних регіонах.

Для створення тривимірної моделі зони затоплення використовується бібліотека тривимірних видів у форматі r3d. Тривимірний вигляд кожного об'єкта створюється індивідуально з присвоєнням певних текстур. Текстури отримуються за допомогою цифрових знімків і додаються до бібліотеки тривимірних видів. Ця операція повторюється для всіх необхідних об'єктів, після чого тривимірний вигляд зберігається. Після побудови моделі налаштовується її вигляд, параметри, здійснюється переміщення та збереження в графічних форматах.

Для реалізації геоінформаційної технології використано платформу QGIS та мову програмування Python. У Python був розроблений графічний інтерфейс, який дозволяє користувачу взаємодіяти з програмою. У цьому інтерфейсі користувачу необхідно завантажити перевірені супутникові дані та ввести ряд параметрів для аналізу. Ці параметри включають площу поперечного перерізу, час, витрату, горизонтальну координату в напрямку течії, гравітаційне прискорення, глибину води, поздовжній ухил dna каналу, ухил тертя та середню швидкість води (рис.4.13).

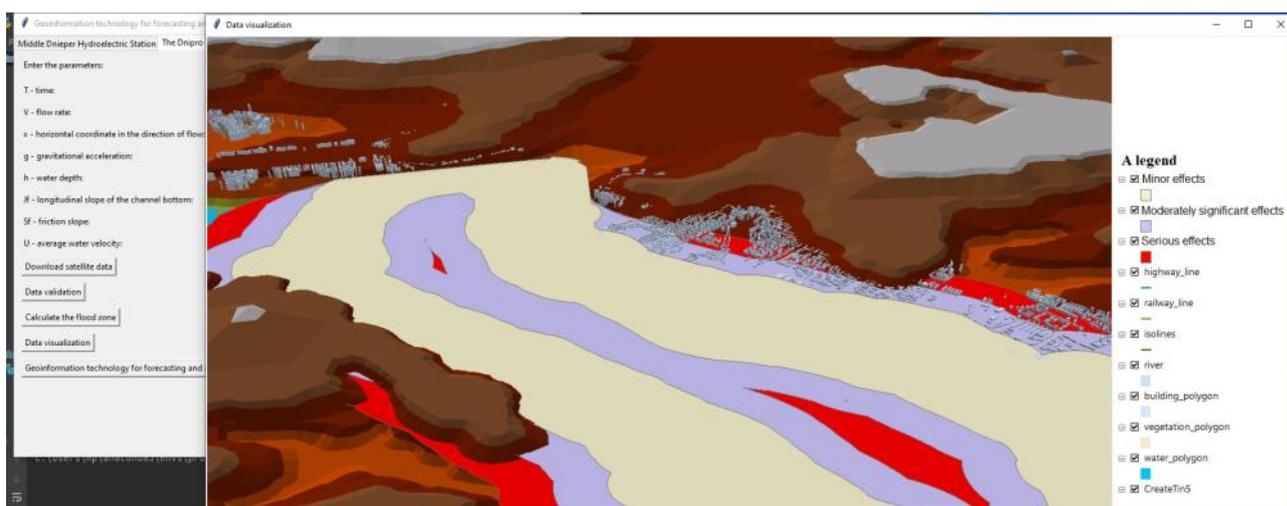


Рисунок 4.13 – Результат програми

Після введення цих даних програма виконує розрахунки та аналізує отримані результати. Графічний інтерфейс дозволяє зручно візуалізувати дані у 3D форматі та отримані результати, що сприяє зрозумінню та аналізу інформації користувачем.

На основі моделювання ситуації, що виникла внаслідок прориву дамби Дніпровської гідроелектростанції, в програмі були отримані результати, які вказують на потенційні зони затоплення. На рисунку 4.14 наведено двовимірні результати моделювання, які відображають можливі райони, що підлягають частковому затопленню. Зокрема, ідентифіковано п'ять районів, які, за отриманими даними, можуть бути піддані впливу затоплення: Комунарський район; Олександрівський район; Вознесенівський район; Хортицький район та Дніпровський район.

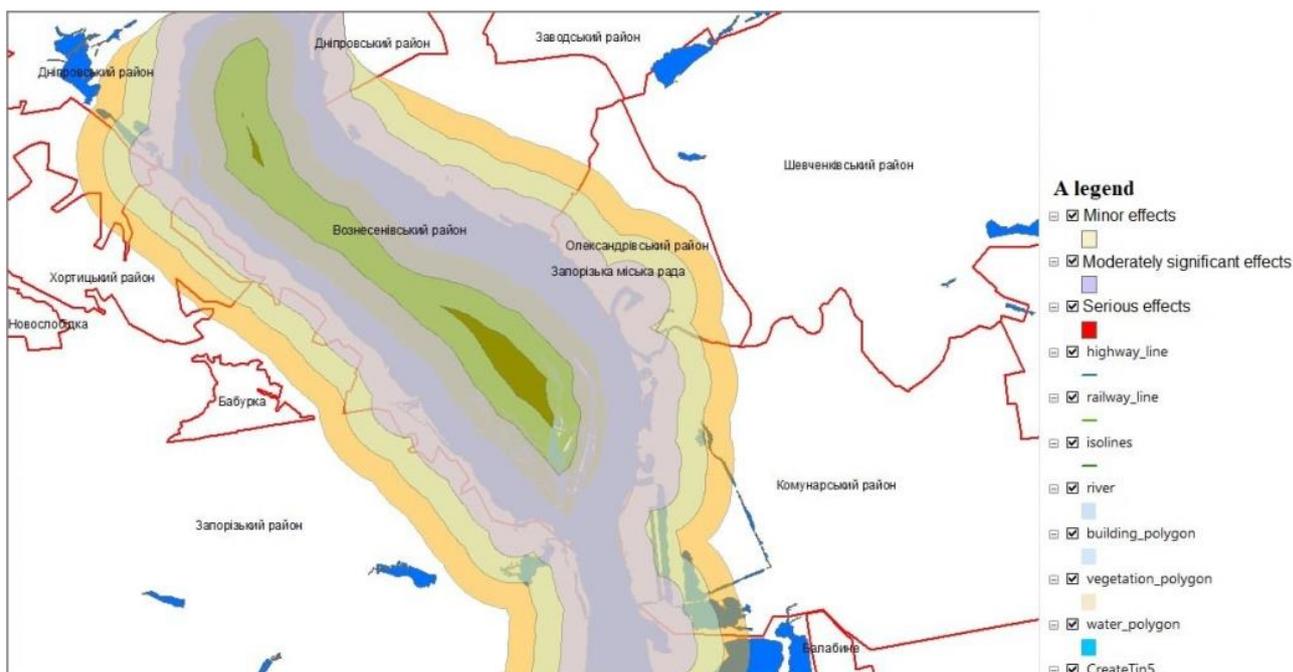


Рисунок 4.14 – Фрагмент карти 2D з рівнями зони затоплення та адміністративними кордонами районів міста Запоріжжя

Для подальшого вивчення впливу прориву дамби на інфраструктуру і населення була побудована карта затоплення доріг (рис.4.15) у результаті внаслідок прориву дамби в місті Запоріжжя вздовж річки Дніпро. На отриманій карті було виділено три категорії доріг, позначені різними

кольорами на легенді. Жовті дороги (позначені як категорія 1 у легенді) – включають вулиці та дороги, які будуть першими піддані впливу затоплення (рис.4.15 а). Ці маршрути можуть бути найбільш небезпечними для руху та евакуації, оскільки вони перетинають області з підвищеним ризиком затоплення. До цієї категорії можуть входити ключові транспортні артерії, магістралі та важливі вулиці, які забезпечують доступ до житлових районів та інших важливих об'єктів.

Помаранчеві дороги (позначені як категорія 2 у легенді) – представляють собою дороги, які можуть бути затоплені на другому етапі події. Ці маршрути також можуть бути важливими для руху та евакуації, тому їх врахування на карті дозволить зробити більш повний аналіз можливих наслідків.

Червоні дороги (позначені як категорія 3 у легенді) – охоплюють дороги, які можуть бути затоплені на третьому етапі розвитку ситуації. Ці маршрути можуть включати в себе менш важливі дороги та вулиці, але їх затоплення також може призвести до ускладнень у руху та безпеки для мешканців.

Карта затоплення доріг буде корисна для рятувальних служб, місцевих влад, а також населення, що проживає в потенційно затоплених районах. Вона дозволить адміністрації міста та екстреним службам ефективно планувати евакуаційні маршрути, спрямовувати допомогу та мобілізувати ресурси для надання допомоги постраждалим. Також ця інформація може бути використана для вдосконалення систем міського планування та підвищення свідомості населення про потенційні ризики повені та необхідність готовності до них.



а)



б)

Рисунок 4.15 – Фрагменти карт: а) затоплення вулиць відповідно до рівнів зон затоплення територій; б) затоплення будинків відповідно до рівнів зон затоплення територій

Побудова карти зони затоплення сільськогосподарських земель в Запорізькому районі має вирішальне значення для прогнозування наслідків прориву дамби та визначення його впливу на посіви основних сільськогосподарських культур, таких як картопля, кукурудза, пшениця, соняшник, тощо (рис.4.16).

Негативні наслідки прориву дамби можуть суттєво позначитися на врожаї сільськогосподарських культур через затоплення та підтоплення полів. Зокрема, вологе середовище, яке виникає внаслідок затоплення, може спричинити руйнування кореневої системи рослин, задушення культур водою, а також розвиток гнилей та інших хвороб, що призводять до втрати врожаю.

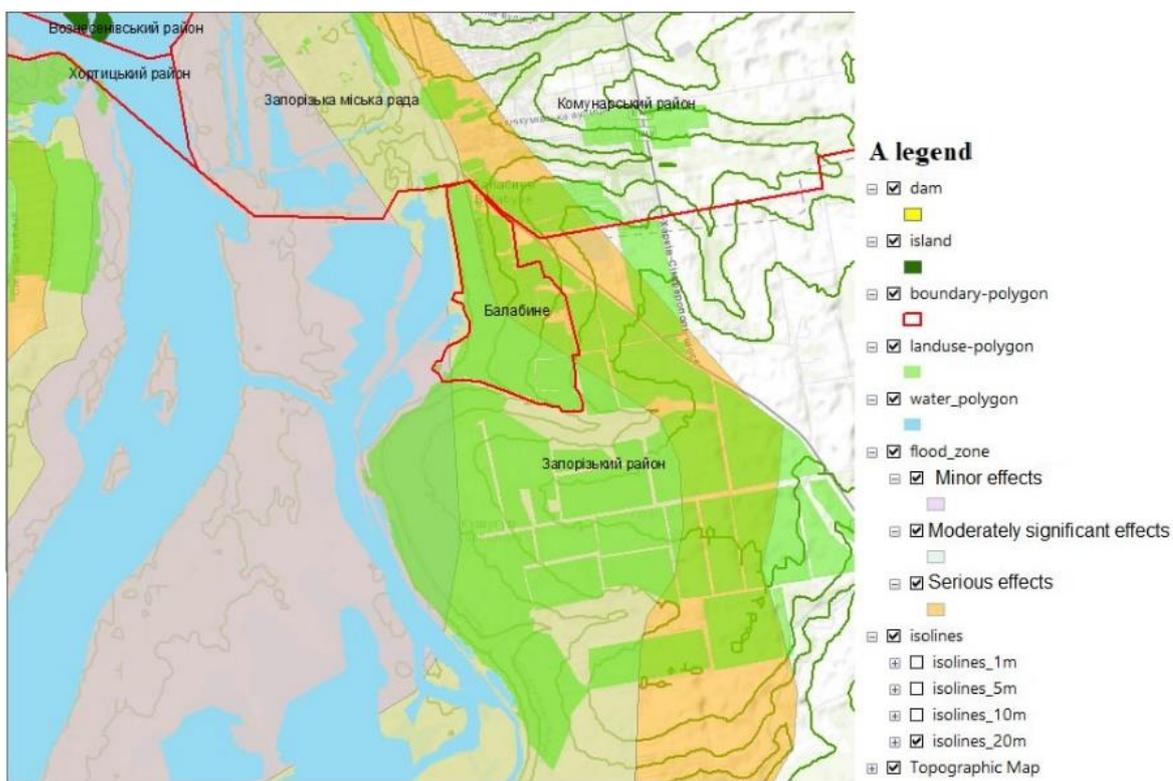


Рисунок 4.16 – Карта затоплення сільськогосподарських угідь

Поширення забруднених водних потоків з прориву дамби також може призвести до забруднення ґрунтів та водойм, що негативно впливає на екологічну ситуацію в регіоні. Наявність шкідливих речовин у воді може призвести до отруєння рослин та знищення біоти ґрунту, що загрожує довкіллю та різноманіттю екосистеми. Таким чином, прорив дамби може створити серйозні екологічні загрози для сільськогосподарських угідь та природних екосистем у районі.

На рис.4.17 наведено результат 3D моделювання місцевості.

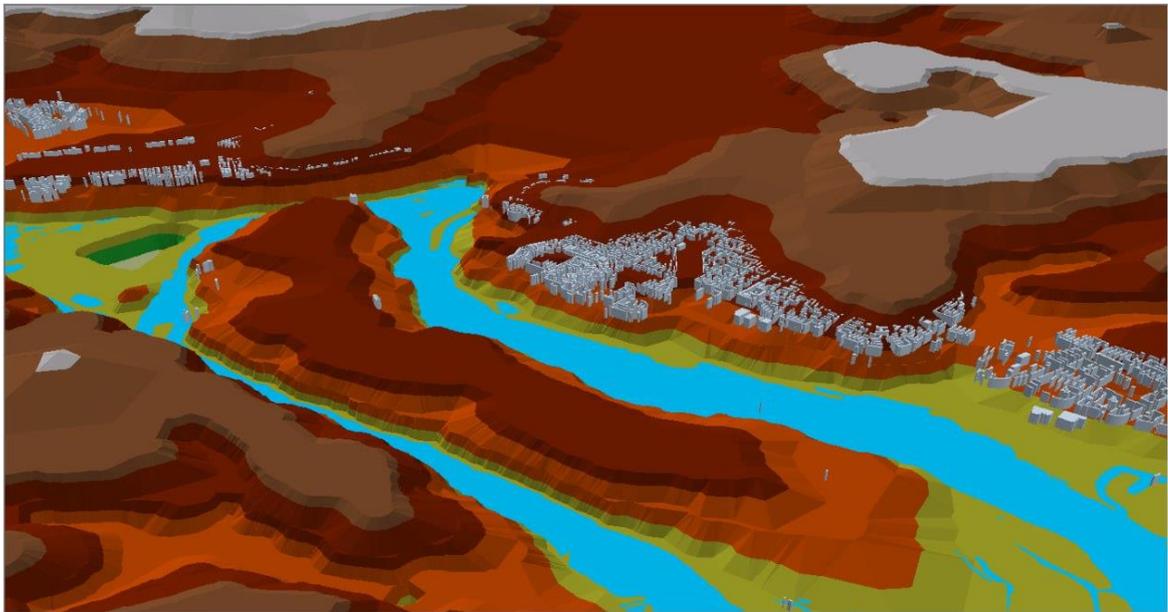


Рисунок 4.17 – Карта тривимірної місцевості

Для розуміння динаміки затоплення будинків та вулиць у залежності від тривалості витоку води у випадку прориву дамби Дніпровської ГЕС наведено графік на рис.4.18. Він може бути важливим інструментом для ефективного планування та координації дій у разі аварійних ситуацій, пов'язаних з проривом дамби, спричиненим надзвичайною ситуацією на Дніпровській ГЕС. Вісь абсцис (X) представляє час витоку води в годинах, від 0:00 до 20:00, з регулярними інтервалами по дві години. На вісі ординат (Y) показана кількість затоплених об'єктів: будинків та вулиць.

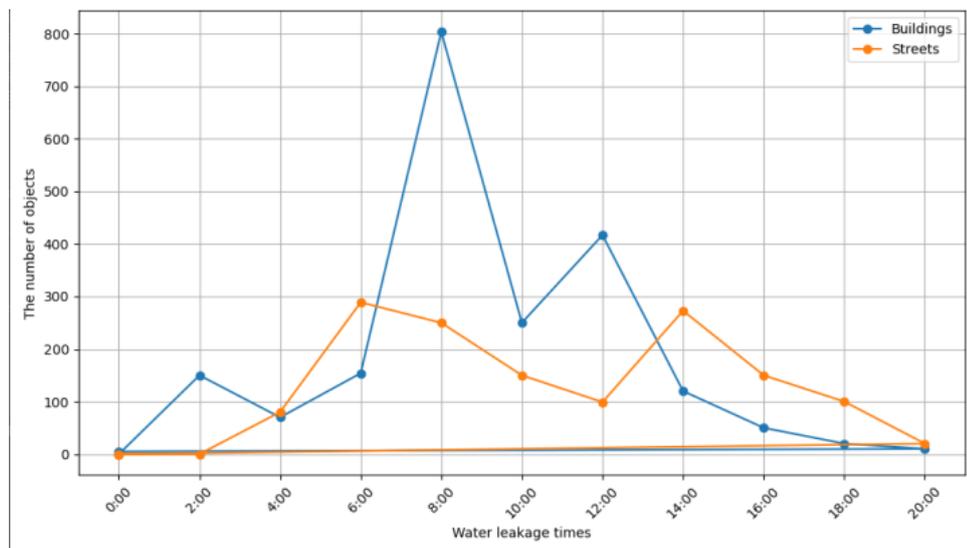


Рисунок 4.18 – Графік співвідношення тривалості витоку води

За результатами аналізу можна відзначити, що з ростом тривалості витоку води спостерігається поступове збільшення кількості затоплених будинків та вулиць. У першій дві години затоплення будинків не спостерігається, але вже через четверту годину кількість затоплених вулиць сягає значної величини. Пікові значення затоплених будинків та вулиць досягаються після восьмої години, коли тривалість витоку води має найбільше значення

З метою отримання об'єктивної оцінки рівня ризику та підвищення готовності до потенційних аварійних ситуацій запропоновано розрахувати індекс вразливості до повеней (*FVI*). *FVI* розраховується на основі кількості точок переповнення в кожному класі змінної *X* та загальної кількості пікселів у цій змінній, враховуючи кількість класів та загальну кількість факторів досліджуваної області [26]:

$$FVI = \sum_{j=1}^n FR, \quad (4.4)$$

де

$$FR = \frac{N_{pix}(S_{X_i})}{\sum_{i=1}^m S_{X_i}} \div \frac{N_{pix}(X_j)}{\sum_{j=1}^n N_{pix}(X_j)}, \quad (4.5)$$

де $N_{pix}(S_{X_i})$ – кількість точок переповнення в класі фактора X_i ; S_{X_i} – кількість точок переповнення в класі фактора X_i ; $N_{pix}(X_j)$ – кількість пікселів у факторі X_j .

Факторний вплив (*FR*) кожного класу обчислюється відносно попередньої повені. Якщо значення *FR* більше 1, це свідчить про сильний вплив параметрів на виникнення паводків, у той час як значення менше 1 вказує на негативний зв'язок між паводками та контрольними змінними. Формула розрахунку *FR* подана у рівнянні (9). Загальний індекс вразливості до повеней (*FVI*) розраховується як сума *FR* для всіх факторів, які враховані у дослідженні. Результат розрахунків наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Значення FVI для Дніпровської ГЕС

Фактор	$N_{pix}(S_{x_i})$	S_{x_i}	$N_{pix}(X_j)$	FR
Висота	55	60	3,3	0,9167

Значення індексу вразливості до повеней (*FVI*) для Дніпровської ГЕС в нашому випадку становить приблизно 0.9167. Це значення отримано на основі розрахунків, де враховувався лише один фактор – висота. Такий низький показник *FVI*, який наближається до 1, вказує на те, що висота греблі є важливим, але не визначальним фактором, який впливає на вразливість до повеней природного характеру в даному регіоні.

4.5 Висновки по четвертому розділу

1. У розділі проведено експериментальні дослідження моделювання затоплення території Середньодніпровської ГЕС на основі гідродинамічних розрахунків хвилі прориву. Розроблено програму для розрахунку глибини затоплення залежно від відстані, результати якої візуалізовані через 3D-моделі місцевості. Це дозволило детально окреслити можливі зони затоплення та оцінити потенційний вплив аварії на інфраструктуру та прилеглі території.

2. Виконано комп'ютерне моделювання та картографування затоплених зон у м. Запоріжжя у разі прориву дамби Дніпровської ГЕС. Використання інструментів QGIS та Python дозволило отримати 2D і 3D карти, що відображають комунікаційні магістралі та сільськогосподарські угіддя, які можуть бути затоплені. Це дає змогу планувати евакуаційні маршрути та оцінювати потенційний вплив на сільське господарство.

3. Експериментальні дослідження, виконані на основі аналізу супутникових знімків Sentinel-2 для міста Мукачєво, підтвердили ефективність застосування напівкерованого навчання у картографуванні

потенційних зон затоплення. Використання різночасових знімків, отриманих у зимовий та весняний періоди 2024 року, дозволило отримати детальні дані про зміни в ландшафті та оцінити ризики затоплення, що є особливо актуальним для територій з підвищеним ризиком. Картографування зон затоплення в рамках дослідження виявило, що центральна частина міста є найбільш вразливою, з рівнем води до +5 м, що вимагає особливої уваги при плануванні заходів з управління ризиками. Території, прилеглі до річки, також потребують ретельного моніторингу через потенційні загрози затоплення.

4. Протестовано технологію виявлення та моделювання затоплених зон у місті Дубай із використанням згорткових нейронних мереж. Аналіз супутникових знімків Landsat-8 до і після повені дозволив точно визначити розширення зон затоплення. Модель показала високі показники ефективності, такі як точність у 0.88 та F1-міра 0.91 для класу затоплених територій. Це демонструє ефективність технології для моніторингу природних катастроф у міських районах.

5. Проведено порівняння методів напівкерованого навчання та згорткових нейронних мереж для класифікації оптичних супутникових зображень. Результати дослідження показують суттєву різницю в ефективності цих методів. Метод напівкерованого навчання, хоча й здатен швидко класифікувати пікселі зображення, має низьку точність на зображеннях зі складними фонами та не може якісно відображати контури водних об'єктів. Це призводить до помилок в класифікації, зокрема на зображеннях після повені, де водні області можуть бути переплутані з іншими об'єктами. У той же час, згорткові нейронні мережі забезпечують високоточну сегментацію водних об'єктів і ефективно виявляють зміни в землекористуванні до та після затоплення. Це є важливим для завдань моніторингу навколишнього середовища та ефективного управління водними ресурсами.

6. Запропоновано інформаційну технологію для підтримки прийняття рішень щодо прогнозування затоплень із використанням супутникових даних Sentinel-2 та цифрової моделі рельєфу. Система демонструє високу точність виявлення зон затоплення (похибка до 12%) та продуктивність при обробці запитів у реальному часі. Це дозволяє швидко й ефективно аналізувати великі обсяги даних для оцінки ризиків затоплення.

7. Запропоновані моделі та методи прогнозування та оцінки затоплення територій і розроблене на їхній основі програмне забезпечення впроваджені у:

– ТОВ ФІРМА «ГЕОРА» (м. Дніпро) при обробці просторових даних для виявлення та моделювання зон затоплення на основі аналізу різночасових супутникових зображень, архітектур напівкерованого машинного навчання та згорткових нейронних мереж, що дозволило здійснювати оперативний аналіз ситуації та ухвалювати обґрунтовані рішення у випадку надзвичайних ситуацій з мінімальними витратами часу та ресурсів;

– ТОВ «КОМПАНІЯ ГЕОНІКС» (селище міського типу Клавдієво-Тарасове, Київська обл.) при розробці спеціалізованих геоінформаційних моделей для підвищення ефективності аналізу складних аналітичних задач, а також для створення та оновлення топографічних карт, що сприяло поліпшенню точності та оперативності при вирішенні геопросторових задач;

– навчальний процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» при викладанні таких дисциплін здобувачам кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії факультету інформаційних технологій: «Системи штучного інтелекту»; «Цифрова обробка просторових даних»; «Імітаційне моделювання комп'ютерних систем і мереж»; «Технологія рішення прикладних задач за допомогою інформаційних систем»; «Наукові проблеми штучного інтелекту».

Основні результати даного розділу опубліковані в роботах автора [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12].

ВИСНОВКИ

В дисертаційному дослідженні вирішена важлива науково-прикладна задача підвищення точності прогнозування та оцінки наслідків затоплення територій в умовах надзвичайних ситуацій за допомогою геоінформаційної технології, що включає моделювання, картографування та аналіз на основі супутникових даних і методів машинного навчання.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Здійснено комплексний аналіз причин та наслідків затоплення територій, зокрема в контексті природних і антропогенних надзвичайних ситуацій, для виявлення основних факторів, що впливають на інтенсивність і масштаб затоплень.

2. Розроблено метод комп'ютерного картографування затоплення при виникненні надзвичайної ситуації на гідроелектростанції.

3. Розроблено геоінформаційну технологію прогнозування та картографування небезпеки затоплення при антропогенних надзвичайних ситуаціях, що дозволяє своєчасно оцінювати потенційні наслідки таких ситуацій для територій.

4. Розроблено геоінформаційну технологію виявлення та моделювання затоплених зон на основі напівкерованого машинного навчання, що дозволяє підвищити точність визначення затоплених зон під час надзвичайних ситуацій.

5. Розроблено геоінформаційну технологію виявлення та моделювання затоплених територій на основі згорткових нейронних мереж, що забезпечує точність прогнозів і високу якість обробки супутникових зображень для картографування затоплень.

6. На базі запропонованих методів і алгоритмів розроблено автоматизовану геоінформаційну технологію для виявлення та моделювання зон затоплення на основі різночасових супутникових зображень,

використовуючи архітектуру напівкерованого машинного навчання та згорткових нейронних мереж, що дозволяє визначати та прогнозувати зони затоплення.

7. Проведено порівняння результатів технології виявлення та моделювання затоплених зон за допомогою напівкерованого машинного навчання та згорткових нейронних мереж з метою визначення найбільш ефективного підходу для автоматизованого виявлення затоплених територій з використанням супутникових зображень.

8. Запропоновано рішення у вигляді програмної реалізації геоінформаційної системи для інтеграції різних методів картографування і моделювання затоплень в умовах реального часу.

9. Запропоновані в дисертації моделі та методи прогнозування та оцінки затоплення територій при надзвичайних ситуаціях і розроблене на їх основі програмне забезпечення впроваджені в ТОВ ФІРМА «ГЕОРА» (м. Дніпро); ТОВ «КОМПАНІЯ ГЕОНІКС» (селище міського типу Клавдієво-Тарасове, Київська обл.), а також у навчальний процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. **Ivanov D.V.**, Hnatushenko V.V., Kashtan V.Yu., Garkusha I.M. (2022). Computer modeling of territory flooding in the event of an emergency at Seredniodniprovska Hydroelectric Power Plant. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2022, № 6. P.158-163. (Збірник включено до міжнародних науково-метричних баз даних: Scopus, Index Copernicus). DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/123>.
2. Kashtan V.Yu., **Ivanov D.V.**, Hnatushenko V.V. (2024). Geoinformation Technology for Modeling and Mapping Flooding Territory in the Event of the Dnipro Hydroelectric Power Station Dam Failure. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds) *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision-Making, Volume 1. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 219, pp 93–115. Springer, Cham. Print ISBN 978-3-031-70958-6, Online ISBN 978-3-031-70959-3. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-70959-3_5.
3. Каштан В.Ю., Сергєєва К.Л., Коробко О.В., **Іванов Д.В.** Пошук та оцінка островів тепла на цифрових космічних знімках // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (146). - Дніпро, 2023. – 146 с. – С.87-98. ISSN 1562-9945 (Print), ISSN 2707-7977 (Online). DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-146-2023-09>.
4. **Іванов Д.В.**, Каштан В.Ю. Геоінформаційна технологія виявлення та моделювання затоплених зон міста Дубай на основі згорткової нейронної мережі // *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. – Випуск 4. – Одеса, Видавничий дім «Гельветика», 2024. – 257 с. – С. 99-113. ISSN 2786-507X (Print), ISSN 2786-5088 (Online). DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-13>
5. **Іванов Д.В.**, Каштан В.Ю., Гнатушенко В.В. Методологія цифрового картографування виникнення можливих затоплень територій із

застосуванням напівкерованого машинного навчання // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Том 341 № 5, Хмельницький, 2024. – С.12-19. ISSN 2307-5732. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-1>. (Особисто здобувачем: розроблена методологія цифрового картографування потенційних зон затоплення на основі методу «точка в полігоні»).

6. **Іванов Д.В.**, Каштан В.Ю. Архітектура системи підтримки рішень із захищеною обробкою даних при затопленні територій // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Том 347 №1, Хмельницький, 2025. – С.123-130. ISSN 2307-5732. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-347-1-16>.
7. **Іванов Д.В.**, Гнатушенко В.В. Імітаційне моделювання затоплення територій при виникненні надзвичайної ситуації на гідроелектростанції // Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості: XVI міжн. конф. (15-17 грудня 2021 р.): зб. наук. пр. [Електронний ресурс] / НТУ «Дніпровська політехніка». – Дніпро: 2022. №6. С.123-128. Режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/160316>.
8. Приходько Є.О., Каштан В.Ю., **Іванов Д.В.** Автоматизований збір даних для аналізу ризиків руйнувань дамби // Молодь: наука та інновації: матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 23–25 листопада 2022 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ «ДП», 2022 – 567 с. – С. 366-367.
9. Сергєєва К.Л., Каштан В.Ю., Коробко О.В., **Іванов Д.В.**, Качан І.С.. Аналіз супутникових даних для оцінки островів тепла урбанізованих територій // Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості: XVII міжнар. конф. (24 листопада 2022 р., м. Дніпро): зб. наук. пр. / ред. кол.: А.А. Азюковський та ін.; М-во освіти і

науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2022. – № 7. – 214 с. – С. 71-76.

10. Каштан В.Ю., **Іванов Д.В.** Комп'ютерна система контролю стану водних об'єктів та прилеглих до них територій в умовах війни // «Наукова весна» 2023: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 1–3 березня 2023 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ «ДП», 2023. 483 с. – С. 176-177.
11. Каштан В.Ю., **Іванов Д.В.** Інформаційна технологія автоматизованого збору аналітичних даних із веб-ресурсів // Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси (ІМТСК-2024): V міжнародна науково-практична конференція. 18-19 квітня 2024 р., Черкаси, Україна. – Черкаси: Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, 2024. – 319 с. – С. 97-99.
12. Kashtan V. Yu., **Ivanov D.V.**, Hnatushenko V.V. Geoinformation technology for flood zone modeling and emergency response planning // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMSI'2024): матеріали XX Міжнародної наукової інтернет-конференції (20-23 червня 2024 р., м. Хмельницький, м. Усті над Лабем) / за ред. В.І. Литвиненка, С.А. Бабічева. – Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2024. – 49 с. ISBN 978-617-8187-21-7. – С. 9-10.
13. Постанова Кабінету Міністрів України від 24 березня 2004 р. № 368 “Про затвердження Порядку класифікації надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру за їх рівнями”.
14. Левчук К. О. Цивільний захист: навчальний посібник / К. О. Левчук, Р. Я. Романюк, А. О. Толок. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2016. – 325 с.
15. Державний класифікатор надзвичайних ситуацій ДК 019-2001.
16. Nkwunonwo U., Whitworth M., Baily B. A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries

// Scientific African. – 2020. – Vol. 7. – e00269. – DOI: 10.1016/j.sciaf.2020.e00269.

17. Schumann G. Preface: Remote Sensing in Flood Monitoring and Management // Remote Sensing. – 2015. – Vol. 7(12). – P. 17013–17015.
18. Giustarini L., Vernieuwe H., Verwaeren J., Chini M., Hostache R., Matgen P., Verhoest N., de Baets B. Accounting for Image Uncertainty in SAR-based Flood Mapping // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2015. – Vol. 34. – P. 70–77.
19. Determinarea caracteristicilor hidrologice pentru condițiile Republicii Moldova. Normativ în construcții CP D.01.05-2012, ediție oficială. – Chișinău: Agenția Construcții și Dezvoltarea teritoriului Republicii Moldova, 2013. – 155 p.
20. Hotărîrea Guvernului Republicii Moldova Nr. 887 din 11.11.2013 pentru aprobarea Regulamentului cu privire la gestionarea riscurilor de inundații [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://lex.justice.md/index.php?action=view&view=doc&lang=1&id=350280>.
21. Hall B. et al. Understanding Flood Regime Changes in Europe: A state of the art assessment // Hydrology and Earth System Sciences. – European Geosciences Union, 2014. – Vol. 18(7). – P. 2735–2772. – DOI: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01141526/document>.
22. Han G., Kaspersen R. E. Dilemmas and Pathways to Dealing with Flood Problems in Twenty-First Century China // International Journal of Disaster Risk Science. – 2011. – Vol. 2(3). – P. 21–30.
23. Changes in Flood Risk in Europe / Ed. by Zbigniew W. Kundzewicz. – IAHS Special Publication, 2012. – Vol. 10. – 526 p.
24. Ranzi R., Mazzoleni M., Milanese L., Pilotti M., Ferri M., Giuriato F., Michel G., Fewtrell T., Bates P., Neal J., Di Baldassarre G., Bogaard T., Brilly M., Mikoš M. Critical review of non-structural measures for water-related risks // Natural Hazards. – 2011.

25. Van Alphen J., Van Beek E. From flood defence to flood management – prerequisites for sustainable flood management // Floods, from defence to management / Van Alphen J., Van Beek E., Taal M. (Eds.). – Taylor & Francis Group, London, 2006. – P. 11–15.
26. Chen Y., Zhou H., Zhang H., Du G., Zhou J. Urban flood risk warning under rapid urbanization // Environmental Research. – 2015. – Vol. 139. – P. 3–10.
27. Jiang Y., Zevenbergen C., Ma Y. Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China’s challenges and “sponge cities” strategy // Environmental Science & Policy. – 2018. – Vol. 80. – P. 132–143. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.016>.
28. Alfieri L., Cohen S., Galantowicz J., Schumann G. J. P., Trigg M. A., Zsoter E., Prudhomme C., Kruczkiewicz A., Coughlan de Perez E., Flamig Z., Rudari R., Wu H., Adler R. F., Brakenridge R. G., Kettner A., Weerts A., Matgen P., Islam S. A. K. M., de Groeve T., Salamon P. A global network for operational flood risk reduction // Environmental Science & Policy. – 2018. – Vol. 84. – P. 149–158. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.03.014>.
29. Nigro J., Slayback D., Policelli F., Brakenridge G. R. NASA/DFEO MODIS Near Real-Time (NRT) Global Flood Mapping Product Evaluation of Flood and Permanent Water Detection // Remote Sensing. – 2014.
30. Sadek M., Li X. Low-Cost Solution for Assessment of Urban Flash Flood Impacts Using Sentinel-2 Satellite Images and Fuzzy Analytic Hierarchy Process: A Case Study of Ras Ghareb City, Egypt // Advances in Civil Engineering. – 2019. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/2561215>.
31. Sadek M., Li X. Low-Cost Solution for Assessment of Urban Flash Flood Impacts Using Sentinel-2 Satellite Images and Fuzzy Analytic Hierarchy Process: A Case Study of Ras Ghareb City, Egypt // Advances in Civil Engineering. – 2019. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/2561215>.
32. Wieland M., Martinis S. A Modular Processing Chain for Automated Flood Monitoring from Multi-Spectral Satellite Data // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11. – P. 2330. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11192330>.

33. Xu H. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery // *International Journal of Remote Sensing*. – 2006. – Vol. 27. – P. 3025–3033. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160600589179>.
34. Langat P., Kumar L., Koech R., Ghosh M. Hydro-Morphological Characteristics Using Flow Duration Curve, Historical Data and Remote Sensing: Effects of Land Use and Climate // *Water*. – 2019. – Vol. 11. – P. 309. – DOI: 10.3390/w11020309.
35. Bhargava A., Bhargava S. Effects of Albedo in Urban Planning – Special Reference to Building Roofs // *Examines in Marine Biology and Oceanography*. – 2018. – Vol. 1(2). – P. 6–7. – DOI: <https://doi.org/10.31031/EIMBO.2018.01.000506>.
36. Tsou J., Zhuang J., Li Y., Zhang Y. Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong // *Urban Science*. – 2017. – Vol. 1(10).
37. Lo C. P., Quattrochi A. D., Luvall J. C. Application of High-Resolution Thermal Infrared Remote Sensing and GIS to Assess the Urban Heat // *Remote Sensing of Environment*. – 1997. – Vol. 18. – P. 287–304.
38. Voogt J. A., Oke T. R. Thermal Remote Sensing of Urban Climate // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – Vol. 86(3). – P. 370–384.
39. Зацерковний В. І., Оберемок Н. В., Березіна П. О. Просторово-часовий аналіз «островів тепла» мегаполіса за супутниковими знімками LANDSAT // *Наукоємні технології*. – 2018. – №1(37). – DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.37.12377>.
40. Tsou J. Y., Zhuang J., Li Y., Zhang Y. Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong // *Urban Science*. – 2017. – Vol. 1(1). – P. 10. – DOI: <https://doi.org/10.3390/urbansci1010010>.

41. Xiao J., Bonafoni S., Berger C. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11(1). – P. 48. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11010048>.
42. Wang W., Liu K. Remote Sensing Image-Based Analysis of the Urban Heat Island Effect in Shenzhen, China // *Physics and Chemistry of The Earth*. – 2019. – Vol. 110. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.01.002>.
43. Garkusha I. M., Busygin B. S. Study of the Temperature of the Earth's Surface of the City of Dnepropetrovsk Using Multispectral Scanners // *GeoInformatics 2013 – 12th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. – 2013.
44. Busygin B., Garkusha I. Technology Mapping of Thermal Anomalies in the City of Dnipropetrovsk, Ukraine, with Application of Multispectral Sensors // *Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems – Proceedings of the International Forum on Energy Efficiency*. – 2013.
45. Kavats O., Khramov D., Sergieieva K., Vasyliiev V. Algorithm for Statistical Downscaling of Land Surface Temperature Using ElasticNet // *Review of the Bulgarian Geological Society*. – 2020. – Vol. 81(3). – P. 195–197.
46. USGS Landsat Missions 2019 Using the USGS Landsat Level-1 Data Product [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-dataproduct>.
47. Pat S., Chavez Jr. Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. – 1996. – Vol. 62(9). – P. 1025–1036.
48. Joan-Cristian P., Francisco-Javier M., Luis A., Lluís P., Xavier P. Radiometric Correction of Landsat-8 and Sentinel-2A Scenes Using Drone Imagery in Synergy with Field Spectroradiometry // *Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 10. – P. 1687.
49. Grigoraş G., Urişescu B. Spatial Hotspot Analysis of Bucharest's Urban Heat Island (UHI) Using Modis Data // *Annals of Valahia University of Targoviste. Geographical Series*. – 2018.

50. Світличний О. О. Основи геоінформатики: навчальний посібник / О. О. Світличний, С. В. Плотницький. – Суми: Університетська книга, 2006. – 295 с.
51. Tsakiris G., Nalbantis I., Pistrika A. Critical Technical Issues on EU Flood Directive // *European Water*. – 2009. – Vol. 25/26. – P. 39–51.
52. Alkema D. Simulating Floods – On the Application of a 2D-Hydraulic Model for Flood Hazard and Risk Assessment // *ITC Dissertation*. – 2007. – №147. – International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, and University of Utrecht.
53. Watanabe M., Matsumoto M., Shimada M., Asaka T., Nishikawa H., Sato M. Simultaneous Observation Data of GB-SAR/PiSAR to Detect Flooding in an Urban Area // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. – 2010. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2010/560512>.
54. Gorr W. L., Kurland K. S. *GIS Tutorial for ArcGIS Desktop 10.8*. – Redlands: Esri Press, 2020. – 620 p.
55. Lawal D. Detecting Flood Susceptible Areas Using GIS-Based Analytic Hierarchy Process // *Proceedings of the 2012 International Conference on Future Environment and Energy IPCBEE*. – IACSIT Press, Singapore, 2012.
56. Sanyal J., Lu X. X. Application of Remote Sensing in Flood Management with Special Reference to Monsoon Asia: A Review // *Natural Hazards*. – 2004. – Vol. 33. – P. 283–301.
57. Hardmeyer K., Spencer M. A. Using Risk-Based Analysis and Geographic Information Systems to Assess Flooding Problems in an Urban Watershed in Rhode Island // *Environmental Management*. – 2007. – Vol. 39. – P. 563–574.
58. Fox J., Dobson G., Phillips M., Pierce T. Visualization as a Decision Support Tool – Asheville’s North Fork Reservoir (Buncombe County, North Carolina) and the Balance Between Drought and Flood Mitigation // *Proceedings of the American Society of Dam Safety Officials Southeast Regional Conference*. – April 13–16, 2008, UNC-Asheville, NC.

59. Samarasinghe S. M. J. S., Nandalab H. K., Weliwitiyac D. P., Fowzed J. S. M., Hazarikad M. K., Samarakoond L. Application of Remote Sensing and GIS for Flood Risk Analysis: A Case Study at Kalu-Ganga River, Sri Lanka // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2010. – Vol. 38, Part 8. – Kyoto, Japan.
60. Mukashev D., Abitova G. Research of Information Systems in Weather Forecasting // Bulletin of Toraighyrov University. Physics & Mathematics Series. – 2023. – P. 19–32. – DOI: 10.48081/MYHJ7815.
61. Flood Forecasting and Early Warning in Transboundary River Basins: A Toolkit. – United Nations, 2016. – VII, 72 p.
62. USACE. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. – US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2010.
63. Moharir R., Khairnar K., Paunikar W. MIKE 3 as a Modeling Tool for Flow Characterization: A Review of Applications on Water Bodies // International Journal of Advanced Studies in Computers, Science and Engineering. – 2014. – Vol. 3(3). – P. 32.
64. Tansar H., Babur M., Karnchanapaiboon S. L. Flood Inundation Modeling and Hazard Assessment in Lower Ping River Basin Using MIKE FLOOD // Arabian Journal of Geosciences. – 2020. – Vol. 13. – P. 934.
65. Fahad M. G. R., Nazari R., Motamedi M. H., Karimi M. E. Coupled Hydrodynamic and Geospatial Model for Assessing Resiliency of Coastal Structures Under Extreme Storm Scenarios // Water Resources Management. – 2020. – Vol. 34. – P. 1123–1138.
66. Faulkner D., Wass P. Flood Estimation by Continuous Simulation in the Don Catchment, South Yorkshire, UK // Water and Environment Journal. – 2005. – Vol. 19. – P. 78–84.
67. Постанови Кабінету Міністрів України від 7 квітня 1995 року №250 "Про Програму створення Урядової інформаційно-аналітичної системи з

питань надзвичайних ситуацій" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/250-95-%D0%BF#Text>.

68. Сучасний стан та перспективи розвитку автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи АІВС-«Тиса» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://buvrtysa.gov.ua/newsite/?page_id=107,%20https://davr.gov.ua/news/aivs--tisa-operativne-prognozuvannya-pavodkiv-ta-naukove-zabezpechennya-upravlinnya-vodnimi-resursami-30-rokiv-rozvitku-vodnogo-gospodarstva-ukraini.
69. Land & Water. Агро-гідрологічна модель річкових басейнів України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://landwater.uhmi.org.ua>
70. Roy S., Atolagbe B., Ghasemi A., Bathi J. A MATLAB-Based Grid Generation Tool for Hydrodynamic Modeling // In: Watershed Management 2020. – American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, 2020. – P. 88–98.
71. Shustikova I., Domeneghetti A., Neal J. C., Bates P., Castellarin A. Comparing 2D Capabilities of HEC-RAS and LISFLOOD-FP on Complex Topography // Hydrological Sciences Journal. – 2019. – Vol. 64. – P. 1769–1782.
72. Schubert J. E., Luke A., AghaKouchak A., Sanders B. F. A Framework for Mechanistic Flood Inundation Forecasting at the Metropolitan Scale // Water Resources Research. – 2022. – Vol. 58. – P. e2021WR031279.
73. Chang T. J., Wang C. H., Chen A. S., Djordjević S. The Effect of Inclusion of Inlets in Dual Drainage Modelling // Journal of Hydrology. – 2018. – Vol. 559. – P. 541–555.
74. David A., Schmalz B. Flood Hazard Analysis in Small Catchments: Comparison of Hydrological and Hydrodynamic Approaches by the Use of Direct Rainfall // Journal of Flood Risk Management. – 2020. – Vol. 13. – e12639.
75. García-Alén G., González-Cao J., Fernández-Nóvoa D., Gómez-Gesteira M., Cea L., Puertas J. Analysis of Two Sources of Variability of Basin Outflow

Hydrographs Computed with the 2D Shallow Water Model Iber: Digital Terrain Model and Unstructured Mesh Size // *Journal of Hydrology*. – 2022. – Vol. 612. – P. 128182.

76. Costabile P., Costanzo C., Ferraro D., Barca P. Is HEC-RAS 2D Accurate Enough for Storm-Event Hazard Assessment? Lessons Learnt from a Benchmarking Study Based on Rain-on-Grid Modelling // *Journal of Hydrology*. – 2021. – Vol. 603. – P. 126962.
77. Zeiger S. J., Hubbart J. A. Measuring and Modeling Event-Based Environmental Flows: An Assessment of HEC-RAS 2D Rain-on-Grid Simulations // *Journal of Environmental Management*. – 2021. – Vol. 285. – P. 112125.
78. Díez-Herrero A., Ballesteros J. A., Bodoque J. M., Eguíbar M. A., Fernández J. A., Génova M., Laín L., Llorente M., Rubiales J. M., Stoffel M. Mejoras en la Estimación de la Frecuencia y Magnitud de Avenidas Torrenciales Mediante Técnicas Dendrogeomorfológicas // *Boletín Geológico y Minero*. – 2008. – Vol. 118(4). – P. 789–802.
79. Potenciano A. Las Inundaciones Históricas en el Centro-Sur de la Península Ibérica: Condicionantes Geomorfológicos y Climáticos // *Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Series: Geological Risks/Geotechnics No. 1*. – IGME, Madrid, 2008. – Tesis Doctorales Nº10.
80. Potenciano A. Las Inundaciones Históricas en el Centro-Sur de la Península Ibérica: Condicionantes Geomorfológicos y Climáticos // *Doctoral Thesis, Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid*, 2004. – 442 p.
81. Montoya J. J., Francés F., Vélez J. I., Julien P. Desarrollo de un Modelo Distribuido de Producción, Transporte y Depositación de Sedimentos. Aplicación en una Cuenca Experimental // *XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. – Ciudad Guayana, Venezuela, Octubre 2006.
82. Vélez J. J., Francés F. Recursos Hídricos en la Comunidad Autónoma del País Vasco Usando Modelación Distribuida y Calibración Automática // *XXII*

Congreso Latinoamericano de Hidráulica. – Ciudad Guayana, Venezuela, Octubre 2006.

83. Ferrer M. Análisis de Nuevas Fuentes de Datos para la Estimación del Parámetro Número de Curva: Perfiles de Suelos y Teledetección // Cuadernos de Investigación C48. – CEDEX, Madrid, 2003. – 346 p.
84. Chow V. T., Maidment D. R., Mays L. W. Hidrología Aplicada. – McGraw Hill, Colombia, 1994. – 584 p.
85. Témez J. R. Extended and Improved Rational Method. Version of the Highways Administration of Spain // Proc. XXIV AIHS Congress. – 1991. – Vol. A. – P. 33–40.
86. Shearman J. O. Users Manual for WSPRO: A Model for Water Surface Profile Computations. – USGS, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington D.C., 1988.
87. A Handbook on Flood Hazard Mapping Methodologies / Geological Survey of Spain. Area of Research in Geological Risks and Hazards; Díez-Herrero A., Laín-Huerta L., Llorente-Isidro M. – Madrid: Spanish Geological Survey, 2009. – 190 p.
88. Casas Planes M. A. Interactions Between Roughness and Topography in Hydraulic Models // Doctoral Thesis, Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, 2007.
89. Frank E., Ostan A., Coccato M., Stelling G. S. Use of an Integrated One Dimensional Two Dimensional Hydraulic Modelling Approach for Flood Hazard and Risk Mapping // Proceedings of the 1st Conference on River Basin Management. – WIT Press, Southampton, Reino Unido, 2001. – P. 99–108.
90. Linés C. Cartografía de Zonas Potencialmente Inundables en Valdepeñas (Ciudad Real), Comparación de Modelos Hidráulicos Bidimensionales Aplicados a Cartografía de Peligrosidad de Inundaciones // Final-year Project, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, 2008. – 98 p.
91. Martín Vide J. P. Ingeniería Fluvial. – UPC, Barcelona, 2006. – 331 p.

92. Benavente J., Bello E., Anfuso G., Nachite D., Macías A. Sobreelevación Debida a Temporales y Cambios Producidos en las Playas del Litoral NE Marroquí // *Revista Cuaternario y Geomorfología*. – 2007. – Vol. 21(1). – P. 13–25.
93. Thapa B., Watanabe T., Regmi D. Flood Assessment and Identification of Emergency Evacuation Routes in Seti River Basin, Nepal // *Land*. – 2022. – Vol. 11. – P. 82. – DOI: <https://doi.org/10.3390/land11010082>.
94. Mozgovoy, D., & Hnatushenko, V. Information Technology of Satellite Image Processing for Monitoring of Floods and Drought / D. Mozgovoy, V. Hnatushenko // In Shakhovska, N., & Medykovskyy, M. (Eds.). *Advances in Intelligent Systems and Computing IV. CCSIT 2019*. – Springer, Cham, 2020. – 1080. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_32.
95. Mohr, S., Ehret, U., Kunz, M., Ludwig, P., Caldas-Alvarez, A., Daniell, J. E., ..., & Wisotzky, C. A multi-disciplinary analysis of the exceptional flood event of July 2021 in central Europe / S. Mohr, U. Ehret, M. Kunz, P. Ludwig, A. Caldas-Alvarez, J. E. Daniell, C. Wisotzky // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2022. – <https://doi.org/10.5194/nhess-2022-137>.
96. Hapich, H., Andrieiev, V., Kovalenko, V., Hrytsan, Yu., & Pavlychenko, A. Study of fragmentation impact of small riverbeds by artificial waters on the quality of water resources / H. Hapich, V. Andrieiev, V. Kovalenko, Yu. Hrytsan, A. Pavlychenko // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2022. – (3). – P. 185-189. – <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-3/185>.
97. Wang, Z., Sun, Y., Li, C., Jin, L., Sun, X., Liu, X., & Wang, T. Analysis of Small and Medium-Scale River Flood Risk in Case of Exceeding Control Standard Floods Using Hydraulic Model / Z. Wang, Y. Sun, C. Li, L. Jin, X. Sun, X. Liu, T. Wang // *Water*. – 2022. – 14(1). – P. 57. – <https://doi.org/10.3390/w14010057>.
98. Urzică, A., Mișu-Pintilie, A., Stoleriu, C., Cîmpianu, C. I., Hutanu, E., Pricop, C. I., & Grozavu, A. Using 2D HEC-RAS Modeling and Embankment Dam

- Break Scenario for Assessing the Flood Control Capacity of a Multi-Reservoir System (NE Romania) / A. Urzică, A. Mișu-Pintilie, C. Stoleriu, C. I. Cîmpianu, E. Hutanu, C. I. Pricop, A. Grozavu // *Water*. – 2020. – 13(1). – <https://doi.org/10.3390/w13010057>.
99. Tschiedel, A., Paiva, R., & Fan, F. Use of large-scale hydrological models to predict dam break-related impacts / A. Tschiedel, R. Paiva, F. Fan // *Scientific/Technical Article, RBRH* 25. – 2020. – <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190128>.
100. Szydłowski, M., Szpakowski, W., & Zima, P. Numerical simulation of catastrophic flood: The case study of hypothetical failure of the Bielkowo hydro-power plant reservoir / M. Szydłowski, W. Szpakowski, P. Zima // *Acta Geophysica*. – 2013. – 61(5). – <https://doi.org/10.2478/s11600-013-0104-6>.
101. Nogherotto, R., Fantini, A., Raffaele, F., Di Sante, F., Dottori, F., Coppola, E., & Giorgi, F. A combined hydrological and hydraulic modelling approach for the flood hazard mapping of the Po river basin / R. Nogherotto, A. Fantini, F. Raffaele, F. Di Sante, F. Dottori, E. Coppola, F. Giorgi // *Journal of Flood Risk Management*. – 2022. – 15(1). – <https://doi.org/10.1111/jfr3.12755>.
102. Wang, X., Xie, H. A Review on Applications of Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS) in Water Resources and Flood Risk Management / X. Wang, H. Xie // *Water*. – 2018. – 10(5): 608. – <https://doi.org/10.3390/w10050608>.
103. Liu, Z., Xu, J., Liu, M., Yin, Z., Liu, X., Yin, L., Zheng, W. Remote sensing and geostatistics in urban water-resource monitoring: A review / Z. Liu, J. Xu, M. Liu, Z. Yin, X. Liu, L. Yin, W. Zheng // *Mar. Freshw. Res.* – 2023. – 74. – P. 747–765. – <https://doi.org/10.1071/MF22167>.
104. Oborie, E., Rowland, D. R. Flood influence using GIS and remote sensing based morphometric parameters: A case study in Niger delta region / E. Oborie, D. R. Rowland // *J. Asian Sci. Res.* – 2023. – 13. – P. 1–15. – <https://doi.org/10.55493/5003.v13i1.4719>.

105. Piyapong, S., Suwanno, C., Yaibok, C., Pornbunyanon, T., Kanjanakul, C., Buathongkhue, C., Tsumita, N., Fukuda, A. GIS-based identification and analysis of suitable evacuation areas and routes in flood-prone zones of Nakhon Si Thammarat municipality / S. Piyapong, C. Suwanno, C. Yaibok, T. Pornbunyanon, C. Kanjanakul, C. Buathongkhue, N. Tsumita, A. Fukuda // IATSS Research. – 2023. – 47. – P. 416–431. – <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2023.08.004>.
106. Zhu, Y., Niu, X., Gu, C., Yang, D., Sun, Q., Fernandez, E. Using the DEMATEL-VIKOR method in dam failure path identification / Y. Zhu, X. Niu, C. Gu, D. Yang, Q. Sun, E. Fernandez // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2020. – 17, 1480. – <https://doi.org/10.3390/ijerph17051480>.
107. Aureli, F., Maranzoni, A., Petaccia, G., Soares-Frazão, S. Review of experimental investigations of dam-break flows over fixed bottom / F. Aureli, A. Maranzoni, G. Petaccia, S. Soares-Frazão // Water. – 2023. – 15, 1229. – <https://doi.org/10.3390/w15061229>.
108. Hui, L., Liu, H., Guo, L., Lu, S. Experimental study on the dam-break hydrographs at the gate location / L. Hui, H. Liu, L. Guo, S. Lu // J. Ocean. Univ. China. – 2017. – 16, 697–702. – <https://doi.org/10.1007/s11802-017-3470-x>.
109. Khoshkonesh, A., Nsom, B., Bahmanpouri, F., Dehrashid, F.A., Adeli, A. Numerical study of the dynamics and structure of a partial dam-break flow using the VOF method / A. Khoshkonesh, B. Nsom, F. Bahmanpouri, F.A. Dehrashid, A. Adeli // Water Resour. Manag. – 2021. – 35, 1513–1528. – <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02799-2>.
110. Bessar, M., Matte, P., Anctil, F. Uncertainty Analysis of a 1D River Hydraulic Model with Adaptive Calibration / M. Bessar, P. Matte, F. Anctil // Water. – 2020. – 12, 561. – <https://doi.org/10.3390/w12020561>.
111. Senior, J.G., Trigg, M.A., Willis, T. Physical representation of hillslope leaky barriers in 2D hydraulic models: A case study from the Calder Valley / J.G.

- Senior, M.A. Trigg, T. Willis // *J. Flood Risk Manag.* – 2022. – 15, e12821. – <https://doi.org/10.1029/2020WR029001>.
112. Dembélé, M., Hrachowitz, M., Savenije, H.H.G., Mariéthoz, G., Schaepli, B. Improving the Predictive Skill of a Distributed Hydrological Model by Calibration on Spatial Patterns with Multiple Satellite Data Sets / M. Dembélé, M. Hrachowitz, H.H.G. Savenije, G. Mariéthoz, B. Schaepli // *Water Resour. Res.* – 2020. – 56, e2019WR026085. – <https://doi.org/10.1029/2019WR026085>.
113. Clare, M.C.A., Piggott, M.D., Cotter, C.J. Assessing erosion and flood risk in the coastal zone through the application of multilevel Monte Carlo methods / M.C.A. Clare, M.D. Piggott, C.J. Cotter // *Coast. Eng.* – 2022. – 174, 104118. – <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104118>.
114. Lallemand, D., Hamel, P., Balbi, M., Lim, T.N., Schmitt, R., Win, S. Nature-based solutions for flood risk reduction: A probabilistic modeling framework / D. Lallemand, P. Hamel, M. Balbi, T.N. Lim, R. Schmitt, S. Win // *One Earth.* – 2021. – 4, 1310–1321. – <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.08.010>.
115. Sarker, C., Mejias, L., Maire, F., Woodley, A. Flood mapping with convolutional neural networks using spatiocontextual pixel information / C. Sarker, L. Mejias, F. Maire, A. Woodley // *Remote Sensing.* – 2019. – 11(19), 2331. – <https://doi.org/10.3390/rs11192331>.
116. HERE Maps API. Retrieved from <https://developer.here.com/documentation#services>.
117. Forristall, G.Z. Wave and Crest Height Distributions / G.Z. Forristall // *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering.* – 2017. – <https://doi.org/10.1002/9781118476406.emoe080>.
118. Laktionov, I., Diachenko, G., Koval, V., Yevstratiev, M. Computer-Oriented Model for Network Aggregation of Measurement Data in IoT Monitoring of Soil and Climatic Parameters of Agricultural Crop Production Enterprises / I. Laktionov, G. Diachenko, V. Koval, M. Yevstratiev // *Baltic J. Modern*

- Computing. – 2023. – 11(3), 500–522. –
<https://doi.org/10.22364/bjmc.2023.11.3.09>.
119. Le, T.T.H., Nguyen, V.C. Numerical study of partial dam–break flow with arbitrary dam gate location using VOF method / T.T.H. Le, V.C. Nguyen // *Appl. Sci.* – 2022. – 12, 3884. – <https://doi.org/10.3390/app12083884>.
120. Hnatushenko, V.V., Hnatushenko, Vik.V., Mozgovyi, D.K., Vasyliiev, V.V., Kavats, O.O. Satellite Monitoring of Consequences of Illegal Extraction of Amber in Ukraine / V.V. Hnatushenko, Vik.V. Hnatushenko, D.K. Mozgovyi, V.V. Vasyliiev, O.O. Kavats // *Scientific Bulletin of National Mining University.* – 2017. – № 2(158), 99–105.
121. Safa, B., Fekih, B., Boussema, F., Khebour, A., Allouche, R., Ajmi, B.C., Chaabane, A., Abd-Alla, G. Assessing and monitoring the effects of land cover changes in biodiversity. Case study: Mediterranean coastal region, Sousse, Tunisia / B. Safa, B. Fekih, F. Boussema, A. Khebour, R. Allouche, B.C. Ajmi, A. Chaabane, G. Abd-Alla // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science.* – 2023. – 26, 185–196. – <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.01.002>.
122. Kashtan, V., Hnatushenko, V., Zhir, S. Information technology analysis of satellite data for land irrigation monitoring: Invited paper / V. Kashtan, V. Hnatushenko, S. Zhir // In: 2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), pp. 1–4. – 2021. – <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716592>.
123. Gebrehiwot, A., Hashemi-Beni, L., Thompson, G., Kordjamshidi, P., Langan, T.E. Deep convolutional neural network for flood extent mapping using unmanned aerial vehicle data / A. Gebrehiwot, L. Hashemi-Beni, G. Thompson, P. Kordjamshidi, T.E. Langan // *Sensors.* – 2019. – 19(7), 1486. – <https://doi.org/10.3390/s19071486>.
124. Kashtan, V., Hnatushenko, V. A Wavelet and HSV Pansharpening Technology of High Resolution Satellite Images / V. Kashtan, V.

- Hnatushenko // In: 1st International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security (IntelITSsi-2020). – 2020. – P. 67–76. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2623/paper7.pdf>.
125. Gnatushenko, V. The use of geometrical methods in multispectral image processing / V. Gnatushenko // *Journal of Automation and Information Sciences*. – 2003. – 35(12). – P. 1–8. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v35.i12.10>.
126. Lazorenko, N., Karpinskyi, Y., Kin, D. Some peculiarities of creation (updating) of digital topographic maps for the seamless topographic database of the Main State Topographic Map in Ukraine / N. Lazorenko, Y. Karpinskyi, D. Kin // *Geingegneria Ambientale e Mineraria*. – 2021. – LVIII(1). – P. 19–24. <https://doi.org/10.19199/2021.162.1121-9041.019>.
127. Poux, F., Billen, R. Voxel-based 3D point cloud semantic segmentation: Unsupervised geometric and relationship featuring vs deep learning methods / F. Poux, R. Billen // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2019. – 8(5). – P. 213. <https://doi.org/10.3390/ijgi8050213>.
128. Meyer, V., Haase, D., Scheuer, S. Flood risk assessment in European river basins-concept, methods, and challenges exemplified at the Mulde River / V. Meyer, D. Haase, S. Scheuer // *Integrated Environmental Assessment and Management*. – 2009. – 5. – P. 17–26.
129. Velasquez M., Hester, P.T. An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods / M. Velasquez, P.T. Hester // *International Journal of Operations Research*. – 2013. – 10(3). – P. 55–66.
130. Yeganeh, N., Sabri, S. Flood Vulnerability Assessment in Iskandar Malaysia Using Multi-criteria Evaluation and Fuzzy Logic / N. Yeganeh, S. Sabri // *Research Journal of Applied Sciences, Engineering, and Technology*. – 2014. – 8(9). – P. 1794–1806.
131. Dang, N.M., Babel, M.S., Luong, H.T. Evaluation of flood risk parameters in the Day River Flood Diversion Area, Red River Delta, Vietnam / N.M.

- Dang, M.S. Babel, H.T. Luong // *Natural Hazards*. – 2010. – 56(1). – P. 169–194.
132. Poux, F., Billen, R. Voxel-based 3D point cloud semantic segmentation: Unsupervised geometric and relationship featuring vs deep learning methods / F. Poux, R. Billen // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2019. – 8(5). – P. 213. <https://doi.org/10.3390/ijgi8050213>.
133. Vosselman, G. Slope-based filtering of laser altimetry data / G. Vosselman // *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2000. – 33. – P. 935–942.
134. Каштан, В. Ю., Іванов, Д. В. Інформаційна технологія автоматизованого збору аналітичних даних із веб-ресурсів / В. Ю. Каштан, Д. В. Іванов // Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси (ІМТСК-2024): V міжнародна науково-практична конференція. – 2024. – Черкаси, Україна. – P. 97–99.
135. Shahabi, H., Shirzadi, A., Ghaderi, K., Omidvar, E., Al-Ansari, N., Clague, J.J., Geertsema, M., Khosravi, K., Amini, A., Bahrami, S. Flood Detection and Susceptibility Mapping Using Sentinel-1 Remote Sensing Data and a Machine Learning Approach: Hybrid Intelligence of Bagging Ensemble Based on K-Nearest Neighbor Classifier / H. Shahabi, A. Shirzadi, K. Ghaderi, E. Omidvar, N. Al-Ansari, J.J. Clague, M. Geertsema, K. Khosravi, A. Amini, S. Bahrami // *Remote Sensing*. – 2020. – 12(2). – P. 266. <https://doi.org/10.3390/rs12020266>.
136. Tavus, B., Kocaman, S., Gokceoglu, C. Flood damage assessment with Sentinel-1 and Sentinel-2 data after Sardoba dam break with GLCM features and Random Forest method / B. Tavus, S. Kocaman, C. Gokceoglu // *Science of the Total Environment*. – 2021. – 816. – P. 151585. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151585>.
137. Emily Jenifer, A., Sudha, N. DeepFlood: A deep learning-based flood detection framework using feature-level fusion of multi-sensor remote

- sensing images / A. Emily Jenifer, N. Sudha // Journal of Universal Computer Science. – 2022. – 28(3). – P. 329–343.
138. Li, Y., Martinis, S., Plank, S., Ludwig, R. An automatic change detection approach for rapid flood mapping in Sentinel-1 SAR data / Y. Li, S. Martinis, S. Plank, R. Ludwig // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2018. – 73. – P. 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.009>.
139. Chawla, I., Karthikeyan, L., Mishra, A.K. A review of remote sensing applications for water security: Quantity, quality, and extremes / I. Chawla, L. Karthikeyan, A.K. Mishra // Journal of Hydrology. – 2020. – 585. – P. 124826. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124826>.
140. Cao, H., Zhang, H., Wang, C., Zhang, B. Operational Flood Detection Using Sentinel-1 SAR Data over Large Areas / H. Cao, H. Zhang, C. Wang, B. Zhang // Water. – 2019. – 11(5). – P. 786. <https://doi.org/10.3390/w11050786>.
141. Wu, X., Zhang, Z., Xiong, S., Zhang, W., Tang, J., Li, Z., An, B., Li, R. A Near-Real-Time Flood Detection Method Based on Deep Learning and SAR Images / X. Wu, Z. Zhang, S. Xiong, W. Zhang, J. Tang, Z. Li, B. An, R. Li // Remote Sensing. – 2023. – 15(8). – P. 2046. <https://doi.org/10.3390/rs15082046>.
142. Abdirahman, H., Abdullahi, A., Mohamed, E., Siti, H., Octavio, R.R. A Real-Time Flood Detection System Based on Machine Learning Algorithms with Emphasis on Deep Learning / H. Abdirahman, A. Abdullahi, E. Mohamed, H. Siti, R.R. Octavio // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2021. – 69(8). – P. 249–256. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I8P239>.
143. Emily Jenifer, A., Sudha, N. DeepFlood: A deep learning-based flood detection framework using feature-level fusion of multi-sensor remote sensing images / A. Emily Jenifer, N. Sudha // Journal of Universal Computer Science. – 2022. – 28(3). – P. 329–343.

144. Kashif A., Konstantin P., Mohib U., Michael R., Nicola Conci, Johannes L., Ala Al-F. Multi-Modal Machine Learning for Flood Detection in News, Social Media and Satellite Sequences / A. Kashif, P. Konstantin, U. Mohib, R. Michael, N. Conci, J. L. Johannes, A. Al-F. // Computer Vision and Pattern Recognition, MediaEval 2019.
145. Костріков С.В., Серьогін Д.С., Кравченко К.О. Практикум із створення ГІС-карт, просторового аналізу і геообробки на повноформатних ГІС-платформах (на прикладі ArcGIS 10.2 і QGIS 3.16): Навчально-методичний посібник для студентів вишів / За ред. С.В. Кострікова. – Харків, 2022. – 499 с.
146. The war increases the risks of emergency situations at hydroelectric power plants. Retrieved from <http://epl.org.ua/wp-content/uploads/2022/04/Novyna-GES-10504.pdf>

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ АВТОРА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у міжнародних виданнях та у виданнях, які включено до науково-метричних баз:

1. Ivanov D.V., Hnatushenko V.V., Kashtan V.Yu., Garkusha I.M. (2022). Computer modeling of territory flooding in the event of an emergency at Sredniodniprovska Hydroelectric Power Plant. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2022, № 6. P.158-163. (Збірник включено до міжнародних науково-метричних баз даних: Scopus, Index Copernicus). DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/123>. (*Особисто здобувачем: розроблено метод розрахунку зон затоплення територій при виникненні надзвичайних ситуацій*).

2. Kashtan V.Yu., Ivanov D.V., Hnatushenko V.V. (2024). Geoinformation Technology for Modeling and Mapping Flooding Territory in the Event of the Dnipro Hydroelectric Power Station Dam Failure. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds) *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision-Making, Volume 1. ISDMCI 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 27 December 2024, vol 219, pp 93–115. Springer, Cham. Print ISBN 978-3-031-70958-6, Online ISBN 978-3-031-70959-3. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-70959-3_5 (*Особисто здобувачем: розроблена інформаційна технологія для картографування небезпеки затоплення при можливій аварії на Дніпровській гідроелектростанції*).

Статті у фахових виданнях України:

3. Каштан В.Ю., Сергеева К.Л., Коробко О.В., Іванов Д.В. Пошук та оцінка островів тепла на цифрових космічних знімках // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (146). - Дніпро, 2023. – 146 с. – С.87-98. ISSN 1562-9945 (Print), ISSN 2707-7977

(Online). DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-146-2023-09>. (*Особисто здобувачем: побудовано карти UHI, LST міста Дніпро з використанням запропонованої методики*).

4. Іванов Д.В., Каштан В.Ю. Геоінформаційна технологія виявлення та моделювання затоплених зон міста Дубай на основі згорткової нейронної мережі // Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. – Випуск 4. – Одеса, Видавничий дім «Гельветика», 2024. – 257 с. – С. 99-113. ISSN 2786-507X (Print), ISSN 2786-5088 (Online). DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-13>. (*Особисто здобувачем: розроблена геоінформаційна технологія для моделювання затоплених зон на основі трансферного навчання*).

5. Іванов Д.В., Каштан В.Ю., Гнатушенко В.В. Методологія цифрового картографування виникнення можливих затоплень територій із застосуванням напівкерованого машинного навчання // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Том 341 № 5, Хмельницький, 2024. – С.12-19. ISSN 2307-5732. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-1>. (*Особисто здобувачем: розроблена методологія цифрового картографування потенційних зон затоплення на основі методу «точка в полігоні»*).

6. Іванов Д.В., Каштан В.Ю. Архітектура системи підтримки рішень із захищеною обробкою даних при затопленні територій // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Том 347 №1, Хмельницький, 2025. – С.123-130. ISSN 2307-5732. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-347-1-16>. (*Особисто здобувачем: розроблена архітектура системи підтримки прийняття рішень із захищеною обробкою даних та інтерактивна карта затоплення територій*).

Тези і матеріали наукових конференцій:

7. Іванов Д.В., Гнатушенко В.В. Імітаційне моделювання затоплення територій при виникненні надзвичайної ситуації на гідроелектростанції // Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та

промисловості: XVI міжн. конф. (15-17 грудня 2021 р.): зб. наук. пр. [Електронний ресурс] / НТУ «Дніпровська політехніка». – Дніпро: 2022. №6. С.123-128. Режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/160316>. (*Особисто здобувачем: розроблена програмна частини для імітаційного моделювання зон затоплення у разі виникнення надзвичайних ситуацій на ГЕС «ГеП Акосомбо»*).

8. Приходько Є.О., Каштан В.Ю., Іванов Д.В. Автоматизований збір даних для аналізу ризиків руйнувань дамби // Молодь: наука та інновації: матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 23–25 листопада 2022 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ «ДП», 2022 – 567 с. – С. 366-367. (*Особисто здобувачем: розроблений алгоритм парсингу веб-сайтів*).

9. Сергєєва К.Л., Каштан В.Ю., Коробко О.В., Іванов Д.В., Качан І.С.. Аналіз супутникових даних для оцінки островів тепла урбанізованих територій // Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості: XVII міжнар. конф. (24 листопада 2022 р., м. Дніпро): зб. наук. пр. / ред. кол.: А.А. Азюковський та ін.; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2022. – № 7. – 214 с. – С. 71-76. (*Особисто здобувачем: побудована картограма просторового розподілу зон підвищених температур*).

10. Каштан В.Ю., Іванов Д.В. Комп'ютерна система контролю стану водних об'єктів та прилеглих до них територій в умовах війни // «Наукова весна» 2023: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 1–3 березня 2023 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ «ДП», 2023. 483 с. – С. 176-177. (*Особисто здобувачем: організована структури бази геоданих та розраховані параметри зони затоплення*).

11. Каштан В.Ю., Іванов Д. В. Інформаційна технологія автоматизованого збору аналітичних даних із веб-ресурсів // Інформаційні

моделюючі технології, системи та комплекси (ІМТСК-2024): V міжнародна науково-практична конференція. 18-19 квітня 2024 р., Черкаси, Україна. – Черкаси: Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, 2024. – 319 с. – С. 97-99. (*Особисто здобувачем: розроблений алгоритм парсингу сайту*).

12. Kashtan V. Yu., Ivanov D.V., Hnatushenko V.V. GEOINFORMATION TECHNOLOGY FOR FLOOD ZONE MODELING AND EMERGENCY RESPONSE PLANNING // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMSI'2024): матеріали XX Міжнародної наукової інтернет-конференції (20-23 червня 2024 р., м. Хмельницький, м. Усті над Лабем) / за ред. В.І. Литвиненка, С.А. Бабічева. – Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2024. – 49 с. ISBN 978-617-8187-21-7 (електронне видання). – С. 9-10. (*Особисто здобувачем: розроблена топографічна карта досліджуваної території та зони затоплення*).

ДОДАТОК Б
ДОКУМЕНТИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДОСЛІДЖЕНЬ



*Товариство з обмеженою відповідальністю «КОМПАНІЯ ГЕОНІКС»
07850, Київська обл., Бучанський р-н, смт Клавдієво-Тарасове, вул. Травнева, 8
Код ЄДРПОУ 39622195 тел: (044) 360-90-48, e-mail: geonixoffice@gmail.com*

Вих. 20/0125 від 21.01.2025 р.

АКТ

про впровадження наукових результатів дисертаційної роботи Іванова Дениса Валерійовича на тему «Геоінформаційна технологія прогнозування та оцінки затоплення територій при надзвичайних ситуаціях»,
поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології

Результати досліджень, виконаних у дисертаційній роботі Д.В. Іванова, впроваджені у практичну діяльність ТОВ «КОМПАНІЯ ГЕОНІКС» у сфері геоінформаційних технологій. Зокрема, вони застосовані для розроблення спеціалізованих геоінформаційних моделей, які сприяють підвищенню ефективності аналізу складних аналітичних задач, а також для створення та оновлення топографічних карт.

Використання запропонованого в дисертації нового методу комп'ютерного картографування затоплення при виникненні надзвичайної ситуації на гідроелектростанціях із врахуванням параметрів хвилі прориву при руйнуванні дамб, дозволяє точно прогнозувати можливі наслідки таких надзвичайних ситуацій.

Директор



Надія ПІДЛІСНА

ТОВ ФІРМА "ГЕОРА"



49083, м. Дніпро, вул. Аржанова, 19/7,
Телефон: (056) 373-07-21; Факс: (056) 373-37-47
E-mail: geora_dp@i.ua, riabchii.v.v@nmu.one
P/p UA85305749000002600730405201 в ПАТ «Банк Кредит-Дніпро»
МФО 305749
ЄДРПОУ 19306003

« 21 » січня 2025 р. № 21/01-1

На № _____ від _____

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
Іванова Дениса Валерійовича
«Геоінформаційна технологія прогнозування та оцінки затоплення територій при
надзвичайних ситуаціях»,
поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
05.13.06 – Інформаційні технології

Результати дисертаційної роботи Іванова Д.В., поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології, використані в ТОВ фірма «Геора» під час опрацювання просторових даних.

Запропонована автоматизована геоінформаційна технологія для виявлення та моделювання зон затоплення базується на аналізі різночасових супутникових зображень, архітектурі напівкерованого машинного навчання та згорткових нейронних мереж. Технологія забезпечує інтеграцію багатоспектральних супутникових даних, їх обробку у хмарному середовищі та візуалізацію результатів на інтерактивній картографічній платформі. Це надає змогу оперативно аналізувати ситуацію та ухвалювати обґрунтовані рішення у разі надзвичайних ситуацій з мінімальними витратами часу та ресурсів.

Комплексне використання методів напівкерованого машинного навчання забезпечує високу точність визначення меж затоплених територій, що сприяє створенню високодеталізованих тематичних карт. Такі карти є важливим інструментом для аналізу ризиків і планування заходів із мінімізації наслідків стихійних лих. Досягнуті результати забезпечені впровадженням хмарної архітектури геоінформаційної системи, яка оптимізує зберігання, обробку та доступ до великих обсягів геопросторових даних. Використання хмарних технологій дозволяє ефективно масштабувати процеси обробки даних, забезпечуючи високу продуктивність і швидкий доступ до інформації. Це створює можливість оперативної реакції на запити користувачів та підтримки процесу аналізу, зокрема в умовах обмежених ресурсів, що є важливим для забезпечення ефективного управління та прийняття рішень у реальному часі в разі надзвичайних ситуацій.

Генеральний директор



Ігор РЯБЧІЙ



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з навчальної роботи

Юрій ХОМЕНКО

«04» 12 2024 р.

**впровадження результатів дисертаційного дослідження
Іванова Дениса Валерійовича на тему «Геоінформаційна технологія
прогнозування та оцінки затоплення територій при надзвичайних
ситуаціях» в навчальний процес**

Наукові та науково-практичні результати дисертаційного дослідження на тему «Геоінформаційна технологія прогнозування та оцінки затоплення територій при надзвичайних ситуаціях» впроваджено в 2024/2025 н.р. у навчальному процесі на кафедрі інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії факультету інформаційних технологій при розробці дисциплін: «Системи штучного інтелекту» (доц. Соколова Н.О.) для бакалаврів спеціальності 126 Інформаційні системи та технології; «Цифрова обробка просторових даних» (доц. Каштан В.Ю.) для бакалаврів спеціальностей 123 Комп'ютерна інженерія та 126 Інформаційні системи та технології; «Імітаційне моделювання комп'ютерних систем і мереж» (доц. Шедловський І.А.) для магістрів спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія; «Технологія рішення прикладних задач за допомогою інформаційних систем» (доц. Сергеева К.Л.) для магістрів спеціальності 126 Інформаційні системи та технології; «Наукові проблеми штучного інтелекту» (доц. Гаркуша І.М.) для докторів філософії спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології».

Декан факультету
інформаційних технологій
Ирина Ірина УДОВИК
«04» 12 2024 р.

Завідувач кафедри
інформаційних технологій та
комп'ютерної інженерії
Владимир Володимир ГНАТУШЕНКО
«04» 12 2024 р.

ДОДАТОК В

РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

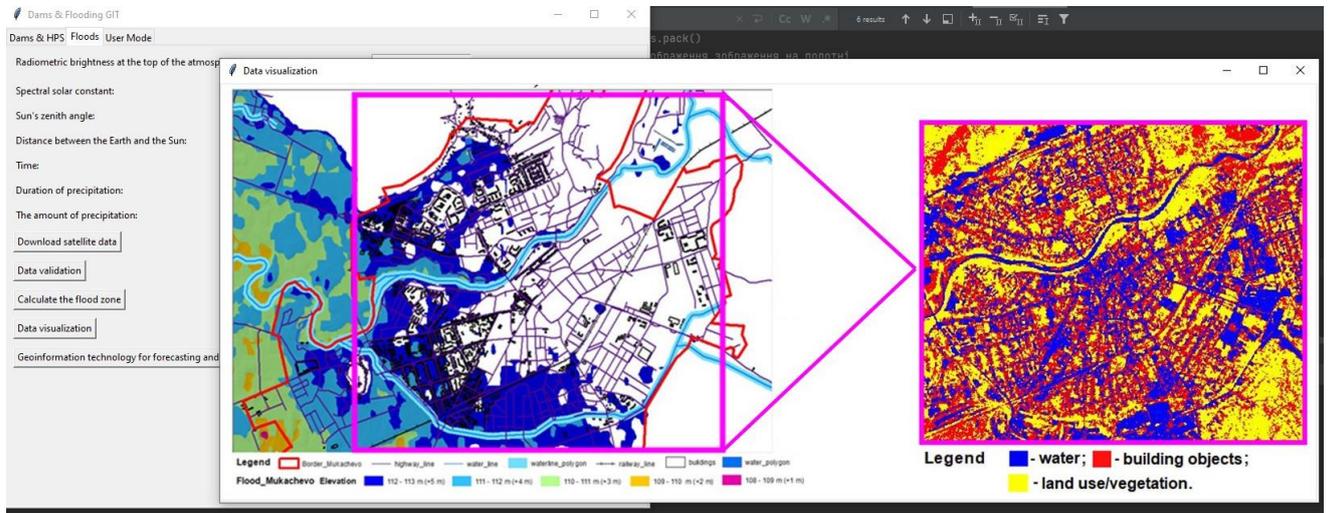


Рисунок В.1 – Результат вкладки «Floods» для м. Мукачево

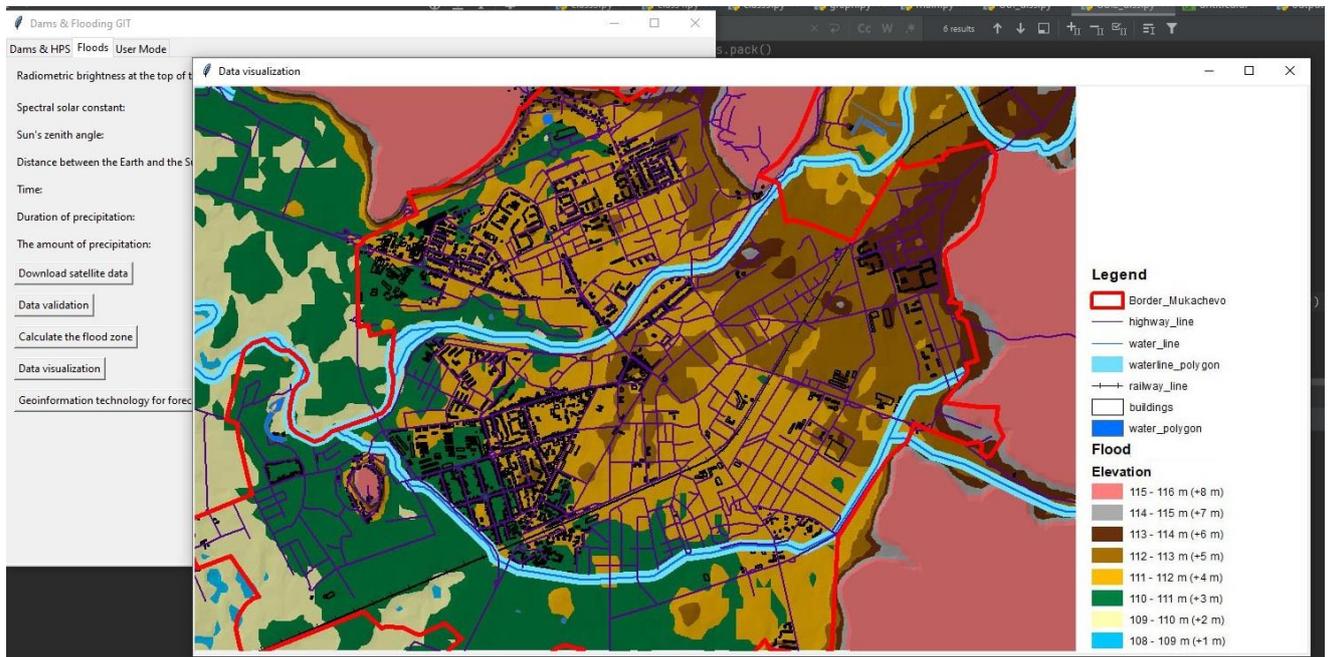


Рисунок В.2 – Результат вкладки «Floods»: цифрова карта прогнозованих затоплень для міста Мукачево

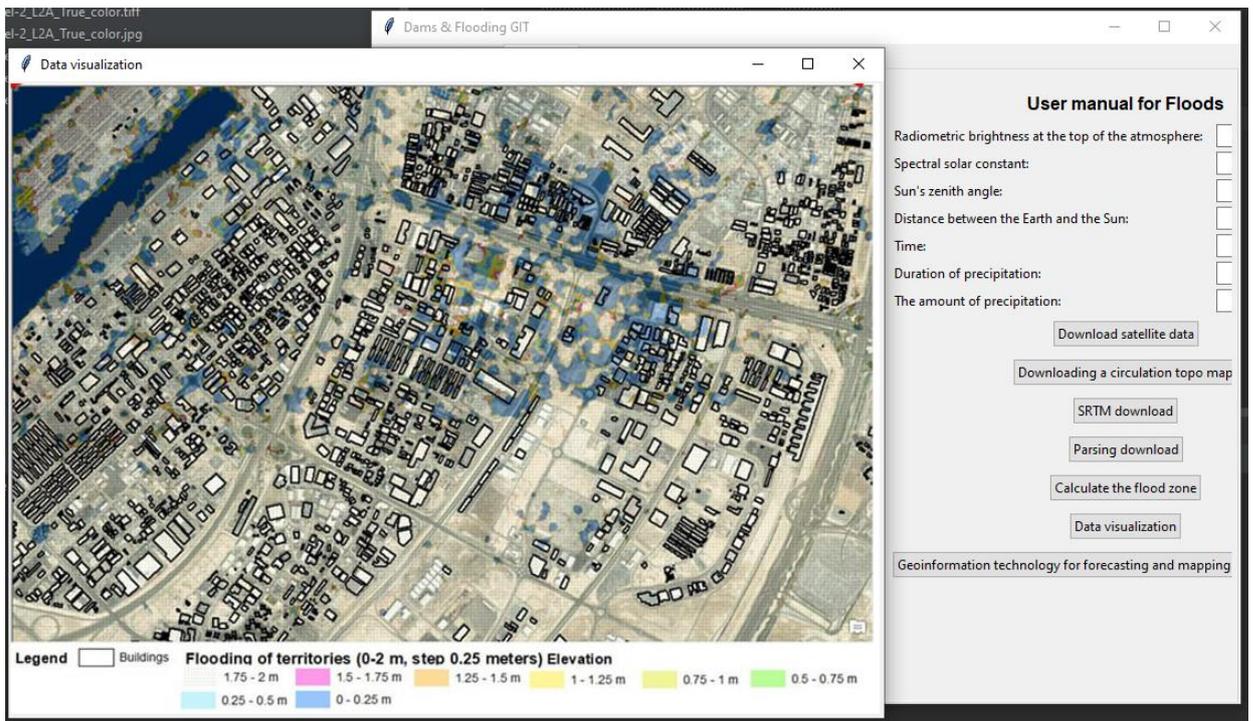


Рисунок В.3 – Результат вкладки «User Mode»: карта зон затоплення міста Дубай

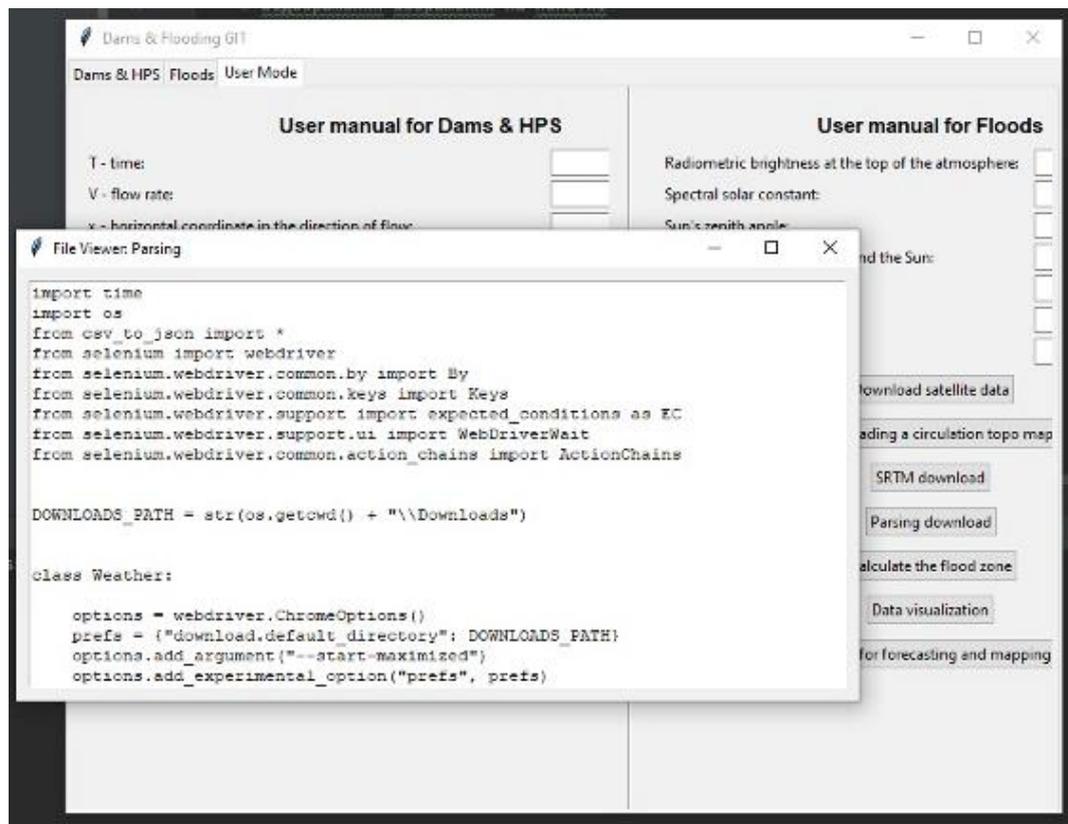


Рисунок В.4 – Результат вкладки «User Mode»: створення файлу парсингу

ДОДАТОК Г

ФРАГМЕНТИ КОДУ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

```
#Модуль main
```

```
import time
import os
from csv_to_json import *
from selenium import webdriver
from selenium.webdriver.common.by import By
from selenium.webdriver.common.keys import Keys
from selenium.webdriver.support import expected_conditions as EC
from selenium.webdriver.support.ui import WebDriverWait
from selenium.webdriver.common.action_chains import ActionChains
```

```
# створюємо папку завантаження
```

```
DOWNLOADS_PATH = str(os.getcwd() + "\\Downloads")
```

```
class Weather:
```

```
    # задаємо параметри, браузер, папку завантаження
```

```
    options = webdriver.ChromeOptions()
```

```
    prefs = {"download.default_directory": DOWNLOADS_PATH}
```

```
    options.add_argument("--start-maximized")
```

```
    options.add_experimental_option("prefs", prefs)
```

```
    # options.add_argument("--headless=new")
```

```
    driver = webdriver.Chrome(options=options)
```

```
    wait = WebDriverWait(driver, 5)
```

```
    # отримуємо посилання на архів погоди
```

```
    def get_url(self, url):
```

```
        self.driver.get(url)
```

```
        accept = self.driver.find_element('xpath',  
'//button[@aria-label="Соглашаюсь"]')
```

```
        accept.click()
```

```
        history = self.driver.find_element('xpath',  
'//a[@class="icon-history-climate nav-icon"]')
```

```
        history.click()
```

```
        archive_url = self.driver.find_element('xpath',  
'//a[span[@itemprop="name"][text()="Архів  
погоди"]]').get_attribute("href")
```

```
        self.get_archive(archive_url)
```

```
    # отримуємо від юзера дані часового відрізка
```

```

def get_archive(self, url):

    self.driver.get(url)

    select_period = int(input("Select period:\n1. Month\n2.
Year\nInput number: "))

    select_year = int(input("Input year from 2023 to 2024:
"))
    year = self.driver.find_element('xpath',
'//label[@for="year_{ }"]'.format(select_year))
    year.click()

    if select_period == 1:
        period = self.driver.find_element('xpath',
'//label[@for="fcstlength_1m"]')
        select_month = int(input('Select month:\n'
'1. Jan    2. Feb    3. Mar    4. Apr\n'
'5. May    6. Jun    7. Jul    8. Aug\n'
'9. Sep    10. Oct   11. Nov    12. Dec\n'
'Input number: '
))

        month = self.driver.find_element('xpath',
'//div[@class="radio-
inline"] [input[@value="{ }"]]/label'.format(select_month))
        month.click()
    else:
        select_month = None
        period = self.driver.find_element('xpath',
'//label[@for="fcstlength_1y"]')

    period.click()

    data_url = self.driver.find_element('xpath',
'//a[contains(text(), "(history+)")]').get_attribute("href")
    self.get_download_url(data_url, select_month,
select_year)

    # отримуємо посилання на завантаження та передаємо дані
отримані від юзера
    def get_download_url(self, url, month, year):

        self.driver.get(url)

        link =
self.wait.until(EC.element_to_be_clickable((By.XPATH,
('//a[contains(@href, "try-for")]'))))
        link.click()

        url = self.driver.find_element('xpath',
'//a[contains(@href, "archive/export")]').get_attribute("href")

```

```

        self.get_data(url, month, year)

    def get_data(self, url, month, year):

        self.driver.get(url)

        # клікаємо потрібні фільтри
        precip = self.driver.find_element('xpath',
'//label[@for="precip"]')
        precip.location_once_scrolled_into_view
        time.sleep(3)
        precip.click()

        temp = self.driver.find_element('xpath',
'//label[@for="temp2m"]')
        temp.click()

        # вводимо рік та місяць
        if month and month == 12:
            period = "{}-{}-01 - {}-{}-01".format(year, month,
year + 1, 1)
        elif month and month != 12:
            period = "{}-{}-01 - {}-{}-01".format(year, month,
year, month + 1)
        else:
            period = "{}-{}-01 - {}-{}-01".format(year, 1, year
+ 1, month)

        daterange = self.driver.find_element('xpath',
'//input[@id="daterange"]')
        daterange.location_once_scrolled_into_view
        time.sleep(3)
        daterange.click()
        daterange.clear()
        daterange.send_keys(period)
        daterange.send_keys(Keys.ESCAPE)

        # завантажуюємо файл csv
        download =
self.wait.until(EC.element_to_be_clickable((By.XPATH,
'//input[@name="submit_csv"]')))
        download.click()
        time.sleep(5)

def main():
    url = "https://www.meteoblue.com/uk/"
    weather = Weather()
    weather.get_url(url)

    path = DOWNLOADS_PATH

    # передаємо завантажений файл на конвертацію з csv до json

```

```

files = os.listdir(path)
for file in files:
    if 'csv' in file:
        csv_to_json(path + '\\\' + file, path + '\\\' +
file.replace('csv', 'json'))
        os.remove(path + '\\\' + file)

if __name__ == '__main__':
    main()

```

#Модуль обработки данных з CSV в JSON

```

import csv
import json

def csv_to_json(csv_file_path, json_file_path):

    data = []

    with open(csv_file_path, 'r') as csv_file:
        timestamps_flag = False

        csv_reader = csv.reader(csv_file)
        for row in csv_reader:
            row_dict = dict()
            row_dict[row[0]] = row[-1]

            if row[0] == "timestamp":
                timestamps_flag = True
                timestamps = dict()
                timestamps['timestamps'] = []
                data.append(timestamps)
                name1 = row[0]
                name2 = row[-1]
                continue

            if timestamps_flag == True:
                timestamp = dict()
                timestamp[name1] = row[0]
                timestamp[name2] = row[-1]
                data[-1]['timestamps'].append(timestamp)
            else:
                data.append(row_dict)

    with open(json_file_path, 'w') as json_file:
        json.dump(data, json_file, indent=4)

```