

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційно-аналітичних технологій та менеджменту

(повна назва)

Кафедра прикладної математики

(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Аналіз і моделювання екологічного стану

водних ресурсів у річкових екосистемах

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання, групи САУМ-23-1

Гурець О.В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 124 Системний аналіз

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системний аналіз і управління

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Ситникова Ю.В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ПМ

(підпис)

Сидоров М.В.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційно-аналітичних технологій та менеджменту

Кафедра прикладної математики

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 124 Системний аналіз

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системний аналіз і управління

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри ПМ _____

(підпис)

“ 25 ” листопада 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Гурцю Олексію Валентиновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз і моделювання екологічного стану водних ресурсів
у річкових екосистемах

затверджена наказом по університету від 22 листопада 2024 р. № 1228 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 6 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи математичні моделі гідродинаміки Нав'є – Стокса та
адвекції-дифузії й евтрофікації

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1. Системний аналіз предметної області

2. Вибір і обґрунтування методу розв'язання

3. Програмна реалізація

4. Результати обчислювального експерименту

5. Аналіз можливих застосувань

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій _____

1. Актуальність теми роботи _____

2. Постановка задачі _____

3. Системний аналіз предметної області _____

4. Метод чисельного аналізу _____

5. Результати обчислювального експерименту _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір та вивчення технічної літератури за темою роботи	25 листопада – 1 грудня 2024 р.	виконано
2	Вибір та обґрунтування методу	2 – 8 грудня 2024 р.	виконано
3	Розробка алгоритму і програми	9 – 22 грудня 2023 р.	виконано
4	Проведення аналітичних досліджень та розрахунків	23 – 29 грудня 2024 р.	виконано
5	Робота над текстом пояснювальної записки	30 грудня 2024 р. – 9 січня 2025 р.	виконано
6	Представлення роботи на рецензію в ЕК	10 січня 2025 р.	виконано

Дата видачі завдання 25 листопада 2024 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Ситникова Ю.В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 69 с., 3 табл., 17 рис., 1 дод., 17 джерел.

АНТРОПОГЕННИЙ ВПЛИВ, ВОДНИЙ РЕСУРС, ГІДРОДИНАМІКА, ЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН, ЕВТРОФІКАЦІЯ, КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ, РІЧКОВА ЕКОСИСТЕМА, ТЕПЛОВА КАРТА.

Об'єкт дослідження – екологічний стан водних ресурсів найбільших річок України та їх басейнів.

Мета роботи – дослідження та застосування існуючих методів і моделей для аналізу та оцінки екологічного стану водних ресурсів на прикладі річкової екосистеми.

Методи дослідження – методи системного аналізу, методи математичного моделювання та методи статистичного аналізу.

У кваліфікаційній роботі розглянуто проблему аналізу та моделювання екологічного стану в річкових екосистемах. Проведено системний аналіз предметної області. Здійснено вибір та обґрунтування методу розв'язання поставленої задачі. Побудовано математичну модель екологічного стану річкової системи, яка враховує ключові параметри, що впливають на якість води та стан екосистеми в цілому. Модель була побудована на основі сучасних підходів системного аналізу, включаючи гідродинамічні та якісні моделі водних ресурсів. Розроблено програмний продукт для обчислення моделі. Отримані результати були проаналізовані.

ABSTRACT

Introductory note: 69 pages, 3 tables, 17 figures, 1 appendix, 17 sources.

ANTHROPOGENIC IMPACT, COMPLEX MODEL, ECOLOGICAL STATE, EUTROPHICATION, HEAT MAP, HYDRODYNAMICS, RIVER ECOSYSTEM, WATER RESOURCE.

Object of research is the ecological state of water resources of the largest rivers of Ukraine and their basins.

Purpose of work is to study and apply existing methods and models for analysing and assessing the ecological state of water resources on the river ecosystem example.

Methods of research are system analysis methods, mathematical modelling methods and statistical analysis methods.

The qualification work considers the problem of analysing and modelling the ecological state in river ecosystems. A systematic analysis of the subject area was carried out. The choice and justification of the method to solve the problem was made. A mathematical model of the ecological state of the river system was constructed, which takes into account the key parameters that affect water quality and the state of the ecosystem as a whole. This model was based on modern approaches to system analysis, including hydrodynamic and qualitative water resources models. A software product to calculate the model was developed. The results were analysed.

ЗМІСТ

	С.
Перелік скорочень, умовних познач, одиниць і термінів	8
Вступ	9
1 Системний аналіз предметної області та постановка задач дослідження	12
1.1 Системний аналіз задачі аналізу та моделювання екологічного стану водних ресурсів у річкових екосистемах	12
1.2 Аналіз сценаріїв вирішення задачі аналізу та моделювання екологічного стану водних ресурсів у річкових екосистемах	15
1.3 Змістовна та формальна постановка задачі	18
1.4 Постановка задач дослідження	20
2 Вибір та обґрунтування методу розв’язання	22
2.1 Гідродинамічна модель.....	22
2.2 Моделі якості води та евтрофікації	26
2.3 Комплексна модель	29
2.4 Вибір водного ресурсу для застосування моделі	30
Висновки за розділом 2	34
3 Програмна реалізація	35
3.1 Використання Python як інструменту для автоматизації та обчислювання	35
3.2 Алгоритм розв’язання задачі аналізу та моделювання екологічного стану обраної ділянки річки	36
3.3 Опис програми	37
Висновки за розділом 3	39
4 Результати обчислювального експерименту та їх аналіз	41
4.1 Генерація просторово-часової сітки.....	41
4.2 Обчислюваний експеримент для комплексної моделі	46
Висновки за розділом 4	58

	7
Висновки	59
Перелік джерел посилання	61
Додаток А Лістинг програми	63

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

ПЧС – просторово-часова сітка.

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність роботи обумовлена загостренням екологічної кризи, пов'язаної зі станом водних ресурсів у річкових екосистемах, які мають вирішальне значення для підтримки біорізноманіття, задоволення суспільних потреб та економічного розвитку. Інтенсивний антропогенний вплив, а саме: забруднення промисловими та сільськогосподарськими стоками, урбанізація, надмірне використання ресурсів, будівництво гідротехнічних споруд – призводить до деградації річок, погіршення якості води й зниження їхньої здатності до самоочищення, що загрожує екології й здоров'ю людей.

Ключові водні артерії України, такі як Дніпро, Дністер, Південний Буг і Сіверський Донець, потерпають від антропогенних чинників та кліматичних змін одночасно. Це призводить до евтрофікації, накопичення токсичних речовин і порушення природних процесів, що становить загрозу для екологічної рівноваги, зокрема екосистеми Чорного моря.

Необхідність відповідати європейським екологічним стандартам підкреслює важливість науково обґрунтованого аналізу, моніторингу й прогнозування екологічного стану річкових систем. Використання сучасних моделей допоможе краще зрозуміти динаміку водних ресурсів, оцінити ризики та визначити ефективні шляхи управління.

Ця робота спрямована на розробку і застосування методів для якісного й кількісного аналізу екологічного стану водних ресурсів у річкових екосистемах України.

Мета і завдання кваліфікаційної роботи. Метою кваліфікаційної роботи є дослідження та застосування існуючих методів і моделей для аналізу та оцінки екологічного стану водних ресурсів на прикладі річкової екосистеми. У сучасних умовах інтенсивного антропогенного впливу на водні об'єкти важливо забезпечити ефективний інструментарій для моніторингу, прогнозування та управління водними ресурсами.

У роботі передбачено створення математичної моделі екологічного стану

річкової системи, яка враховує ключові параметри, що впливають на якість води та стан екосистеми в цілому. Модель була побудована на основі сучасних підходів системного аналізу, включаючи гідродинамічні та якісні моделі водних ресурсів, що дозволить отримати детальну картину екологічного стану річок. Увага була акцентована на вивченні процесів евтрофікації, накопичення забруднювачів і змін у кисневому режимі, які є важливими показниками екологічної рівноваги.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- провести огляд і аналіз сучасного стану задачі «Аналіз та моделювання екологічного стану водних ресурсів у річкових екосистемах»;
- провести аналіз сучасних досліджень і методів моделювання екологічного стану водних ресурсів у річкових екосистемах, виявити ключові підходи системного аналізу, що застосовуються в цій сфері;
- дослідити основні екологічні проблеми річкових екосистем України та розробити концепцію моделі, яка враховує ключові параметри якості води;
- створити математичну модель екологічного стану, яка описує гідродинамічні та якісні характеристики річкової екосистеми, включаючи процеси евтрофікації та розподіл забруднювальних речовин;
- провести моделювання та аналіз результатів для вибраних річкових екосистем, визначити основні фактори впливу та запропонувати подальші напрями вдосконалення моделі.

Об'єктом дослідження є екологічний стан водних ресурсів найбільших річок України та їх басейнів.

Предметом дослідження є модель, яка описує екологічний стан водних ресурсів у річкових екосистемах, а також методи, що використовуються для аналізу та оцінки таких характеристик як: якість води, процеси самоочищення, рівень забруднення, динаміка зміни стану екосистеми, а також підходи, які дозволяють моделювати та прогнозувати ці процеси.

Методи дослідження. У роботі використовуються методи системного аналізу, методи математичного моделювання та методи статистичного аналізу.

Публікації. Результати, отримані у роботі, було представлено на III Міжнародній молодіжній науково-практичній конференції «Навчання і викладання: у світі після війни» (м. Харків, 8 листопада 2024 р.) [1].

1 СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Системний аналіз задачі аналізу та моделювання екологічного стану водних ресурсів у річкових екосистемах

Водні ресурси є критично важливим елементом природного середовища, забезпечуючи основні екосистемні функції, що підтримують життя та біорізноманіття. Проблеми забруднення, зниження рівня води, евтрофікація та деградація водних екосистем стають дедалі актуальнішими через антропогенний вплив і зміну клімату. Сучасний підхід до аналізу водних ресурсів вимагає комплексного розгляду цих систем як багатокomпонентних та багаторівневих. Це передбачає моделювання екологічного стану для розуміння динаміки процесів, що відбуваються у водних об'єктах, і для прогнозування наслідків впливу різних факторів на ці процеси.

Річкові екосистеми є складними природними системами, що характеризуються тісними взаємозв'язками між фізичними, хімічними, біологічними і антропо-зумовленими компонентами. З позиції системного аналізу річкова екосистема складається з багатьох підсистем (гідрологічних, біологічних, хімічних), які взаємодіють між собою і підпадають під вплив зовнішніх факторів, включаючи антропогенний вплив. У процесі взаємодії цих компонентів виникають складні процеси переносу речовин, енергії, а також органічної та неорганічної речовини, які є критичними для підтримання екологічної рівноваги. Системний аналіз дозволяє вивчати ці екосистеми як цілісні утворення, що складаються з багатьох елементів, які взаємодіють один з одним, створюючи мережу зв'язків і залежностей.

Вербальна модель – це текстовий опис системи, що пояснює основні компоненти, взаємозв'язки, а також мету й умови її функціонування. Вона є першим кроком у системному аналізі, дозволяючи зафіксувати проблеми, цілі, обмеження та основні вимоги до досліджуваної системи.

Сформуємо вербальний опис річкової екосистеми, надаючи характеристики річки та її басейну, як системи.

Складність системи. Річкова екосистема – це складна система, оскільки включає різноманітні компоненти, такі як водна товща, ґрунти, донні відкладення, рослинність, водні організми та антропогенні об'єкти (греблі, населені пункти, стоки підприємств). Кожен з цих компонентів має свої підсистеми, які взаємодіють між собою, впливаючи на загальний стан екосистеми. Кожна підсистема має власну ієрархію та певний рівень організації, а також впливає на інші частини системи. Ця складність проявляється у взаємозалежностях, що виникають у річковій екосистемі, наприклад, між швидкістю течії, температурою води, концентрацією кисню та популяцією водних організмів.

Тип системи. Річка та її басейн є відкритою системою, оскільки вона постійно взаємодіє з оточуючим середовищем. Річка обмінюється речовинами та енергією із зовнішнім середовищем: надходять атмосферні опади, припливні води, органічні й неорганічні забруднювачі, а також відбувається випаровування і стікання води. Крім того, річка залежить від температурних коливань, сезонності, людської діяльності, що робить її чутливою до змін у навколишньому середовищі. Крім того, екосистема взаємодіє з іншими екосистемами – лісовими, луговими, болотними тощо, які розташовані вздовж річкового басейну [2].

Динамічність системи. Річка та її басейн має динамічний характер, оскільки її стан постійно змінюється залежно від сезонних коливань, погодних умов, змін клімату та антропогенного впливу. Ці зміни можуть бути як короткотривалими (наприклад, збільшення рівня води під час паводків), так і довготривалими (зміна русла річки, деградація екосистеми через забруднення).

Ієрархічність системи. Річкова екосистема має ієрархічну структуру (рис. 1.1). Річкова екосистема як ієрархічна система представляє собою сукупність рівнів, кожен з яких виконує свою унікальну роль та забезпечує стабільність і функціонування всієї системи. На нижньому рівні перебувають окремі елементи, такі як вода, ґрунт, рослини та тварини; на наступних рівнях формуються спільноти видів і біотопи, а найвищий рівень становить екосистема річ-

кового басейну в цілому.

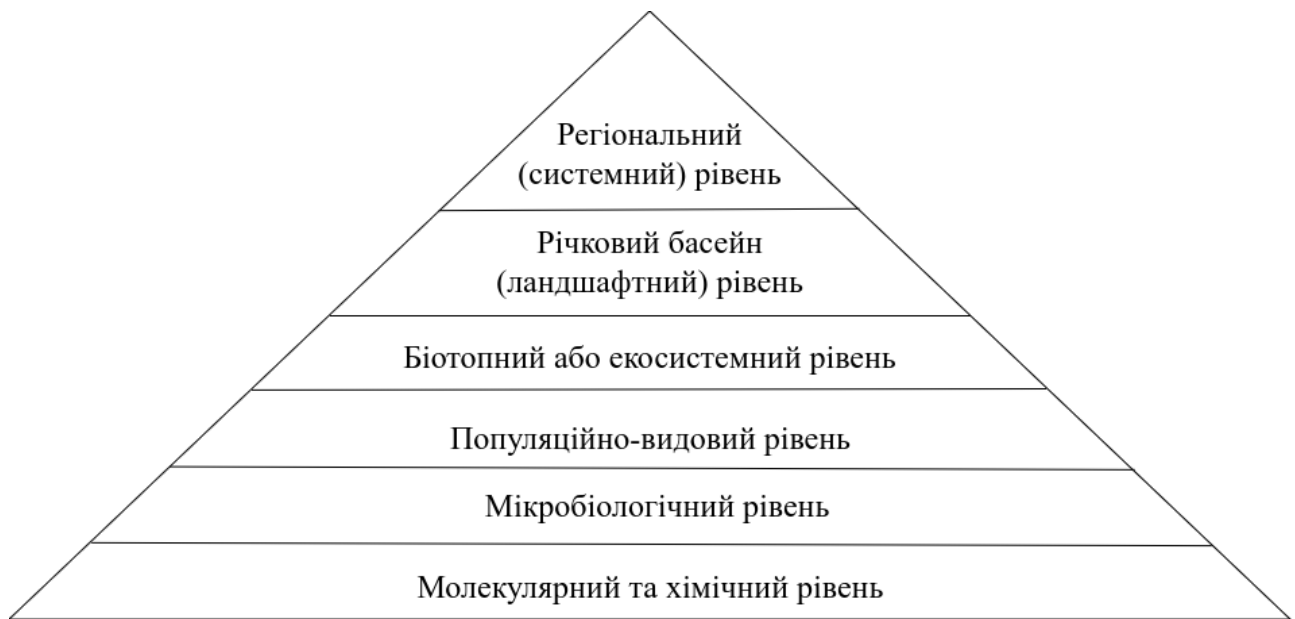


Рисунок 1.1 – Піраміда ієрархії річкової екосистеми

Однією з ключових проблем річкових екосистем є забруднення води промисловими, сільськогосподарськими і побутовими відходами. Забруднення спричиняє накопичення шкідливих речовин, таких як важкі метали, пестициди та добрива, що, в свою чергу, призводить до евтрофікації – процесу надмірного зростання водоростей та зниження рівня кисню, що є небезпечним для життя риб та інших організмів. Ще одна важлива проблема – це зміна гідрологічного режиму, зокрема через будівництво гребель та водосховищ, які порушують природний обіг води, знижують її якість і змінюють екосистемні функції [3].

З позиції системного аналізу всі ці фактори можна розглядати як «входи» в систему річкової екосистеми, які суттєво впливають на її стійкість і здатність до самоочищення. Система може реагувати на ці зміни різними способами, але при перевищенні певного порогу впливу відбувається порушення екологічної рівноваги, що стає початком деградаційних процесів. Відтак, для збереження річкових екосистем важливо створювати моделі, які дозволяють передбачати вплив змін на стан екосистеми та розробляти сценарії зменшення антропогенного навантаження.

1.2 Аналіз сценаріїв вирішення задачі аналізу та моделювання екологічного стану водних ресурсів у річкових екосистемах

Річкова екосистема та її басейн є складною, відкритою системою, що вимагає інтегрованого підходу до моделювання та аналізу. Використання різних моделей і підходів дозволяє глибше зрозуміти динаміку річкових систем, їх екологічний стан і вплив антропогенних чинників, що, в свою чергу, є основою для розробки ефективних стратегій управління водними ресурсами. Мультидисциплінарність аналізу свідчить, що така система потребує дослідження з урахуванням різних наукових дисциплін: гідрології, екології, хімії, біології та соціально-економічних наук. Це обумовлює необхідність комплексного підходу, який дозволяє об'єднати знання з різних галузей для глибшого розуміння функціонування річкових екосистем.

Для аналізу та моделювання екологічного стану водних ресурсів та водних екосистем найбільш придатними є моделі, що враховують багатofакторні взаємодії фізичних, хімічних і біологічних параметрів водних екосистем.

Гідродинамічні моделі (Hydrodynamic Models) моделюють рух води у водоймах, річках, морських акваторіях і підземних водах. Вони враховують потоки, течії, глибину, швидкість переміщення води, температурні режими і розподіл забруднень. Для річкової екосистеми ці моделі допомагають аналізувати рух води у річці, швидкість течії, глибину, розподіл температури, зони турбулентності та розподіл стоку. Вони дають змогу зрозуміти, як річковий потік впливає на поширення забруднювачів, ерозійні процеси та зміну русла. Завдяки таким моделям здійснюється аналіз змін водного балансу, прогнозування паводків, ерозії берегів, аналіз впливу будівництва гребель або каналів на водну екосистему в цілому.

Наприклад, модель Delft3D використовується для моделювання течій, осадових процесів, руху забруднень у річках і прибережних зонах, зокрема, вона використовувалася для моделювання впливу будівництва дамб у дельті річки Меконг.

Модель MIKE 21 є популярною моделлю для аналізу та прогнозування затоплень, поширення забруднювачів і управління водними ресурсами в прибережних регіонах.

Моделі якості води (Water Quality Models) використовуються для оцінки рівня забруднення водних ресурсів та прогнозування його впливу на екосистеми. Моделі враховують різні джерела забруднення (промислові, сільськогосподарські стоки, стічні води). Моделі якості води дозволяють оцінити рівень забруднення та розподіл різних речовин (нітрати, фосфати, метали). За їх допомогою оцінюють стан води в річках, озерах, морях з точки зору її хімічних і біологічних властивостей. У цих моделях також може враховуватися рівень кисню, поживні речовини (азот, фосфор), температура і біологічні процеси.

Модель QUAL2K часто застосовується для оцінки якості води у річкових системах. Вона була використана для аналізу стану річок у США, Європі та Азії, зокрема для моделювання якості води у річці Ганг в Індії.

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) використовується для оцінки водних ресурсів і забруднення, включаючи моделювання евтрофікації у водних басейнах. Ця модель була застосована для моделювання впливу сільськогосподарських стоків на річки в США, Європі та Азії.

Моделі евтрофікації (Eutrophication Models) розроблені для оцінки впливу надмірного надходження поживних речовин (азоту, фосфору) у водні екосистеми, що призводить до евтрофікації (цвітіння водоростей, зменшення кисню, загибелі риб).

Модель CE-QUAL-W2 є двовимірною моделлю для аналізу температури води, розчиненого кисню, концентрації поживних речовин та органічних речовин у річках і озерах. Її використовують для аналізу евтрофікації і зниження якості води в озерах США [4].

Біогеохімічні моделі (Biogeochemical Models) дозволяють оцінювати кругообіги хімічних речовин у водних екосистемах, включаючи цикл вуглецю, азоту, фосфору. Вони є важливим інструментом для оцінки змін екосистем внаслідок впливу антропогенних факторів і природних процесів.

Модель MOM (Modular Ocean Model) використовується для глобальних моделювань океанських процесів, включаючи розподіл вуглекислого газу, кисню і поживних речовин. Цю модель були застосовано для аналізу впливу кліматичних змін на океанські екосистеми.

Модель PCLake слугує для оцінки біогеохімічних процесів у прісноводних озерах, зокрема, для аналізу ефектів змін клімату та забруднення поживними речовинами на озерах Європи.

Імітаційні моделі на основі агентів (Agent-Based Models) використовуються для моделювання взаємодії між окремими агентами (наприклад, рибами, водними організмами, людьми) та їхнім середовищем, що свідчить про їх корисність для аналізу поведінки видів у відповідь на зміни у водній екосистемі.

Інтегровані моделі водного басейну (Integrated Watershed Models) дають можливість поєднувати гідрологічні, екологічні та управлінські аспекти для оцінки загального стану водного басейну та впливу людської діяльності (сільське господарство, міське планування) на водні ресурси.

Модель MODFLOW є відомим інструментом для моделювання підземних вод і аналізу взаємодії між поверхневими та підземними водними ресурсами, яка використовується для управління водними ресурсами в річкових басейнах по всьому світу.

Модель WEAP (Water Evaluation and Planning System) використовується для моделювання управління водними ресурсами на рівні водних басейнів та допомагав у розробці стратегій для стійкого управління водними ресурсами у басейні річки Йордан.

Для складної річкової системи одна модель може не спрацювати, і в таких випадках можна спробувати комбінацію моделей. Модель, остаточно обрана для вирішення проблеми, повинна бути відкалібрована таким чином, щоб мати мінімальні помилки і максимальну точність.

Можливі джерела даних для моделей водних ресурсів:

а) польові дослідження та моніторинг, що включають спостереження за якістю води, вимірювання рівнів забруднення (хімічні, біологічні, фізичні па-

раметри), моніторинг температури, рівня кисню, концентрації поживних речовин, а також збиранням даних про біорізноманіття, популяції риб, водоростей, мікроорганізмів та інших водних організмів, що спрямовані на комплексну оцінку екологічного стану водойм;

б) дистанційне зондування та супутникові дані для моніторингу великих водних об'єктів, таких як озера, річки й океани, а також для відстеження змін берегових ліній, цвітіння водоростей та забруднення поверхневих вод [5];

в) гідрологічні та метеорологічні станції, які забезпечують постійні дані про рівень води, об'єм стоку, швидкість течії, температуру, опади та інші кліматичні фактори, що впливають на водні ресурси;

г) лабораторні аналізи проб води для визначення її хімічних і біологічних характеристик, таких як: наявність важких металів, пестицидів і бактерій;

г) інформаційні бази даних та геоінформаційні системи (GIS), що забезпечують інтеграцію просторових даних про водні ресурси для створення карт водних басейнів, джерел забруднення та руху стоків;

д) інші інформаційні ресурси у відкритому доступі, такі як – національні геоінформаційні ресурси на базі профільних міністерств та агентств, а також глобальні й регіональні платформи та відкриті бази даних для моніторингу якості води.

1.3 Змістовна та формальна постановка задачі

Основна задача полягає у створенні комплексної моделі, яка дозволяє аналізувати екологічний стан водних ресурсів у річкових екосистемах, враховуючи їх багаторівневу структуру, наявність різних типів забруднювачів, гідродинамічні та екологічні показники. Формальна постановка передбачає розробку системи рівнянь, що враховує наступні фактори:

- концентрацію забруднювача у воді;
- швидкість потоку та швидкість розпаду органічної речовини;

– рівень насичення киснем, що впливає на природну самоочищуваність річки.

Ці рівняння мають бути підкріплені даними з національних водних реєстрів, систем моніторингу та супутникових знімків, що дозволить отримати максимально точні результати.

Моделювання гідродинамічних процесів ґрунтується на рівняннях Нав'є – Стокса, які описують рух води в річці через векторні параметри швидкості, тиску та густини води. Ці рівняння дозволяють моделювати процеси, в яких течія, швидкість і напрямок потоку води змінюються під впливом природних та антропогенних факторів.

Додатково до гідродинамічного опису, модель якості води включає рівняння адвекції-дифузії, які описують зміни концентрації забруднювачів, розчиненого кисню та біогенів. Ці рівняння враховують процеси переносу та дифузії, а також хімічні й біологічні реакції, що впливають на концентрації речовин у воді. Відповідні реакційні терміни враховують процеси, як споживання кисню або розкладання органічних речовин, що дозволяє оцінити, наскільки певні забруднювачі або біогени впливають на екологічний стан річки. Поставлена задача включає визначення початкових і граничних умов для розв'язання моделей, що описують водні потоки та екологічні показники. Це дозволяє побудувати прогноз і аналізувати ефективність сценаріїв зменшення забруднення для досягнення бажаного екологічного стану. Таким чином, формальна постановка завдання включає в себе як моделювання фізичних процесів у річковій системі, так і математичний опис процесів забруднення, що є необхідним для оцінки загального екологічного балансу водних ресурсів.

Нехай річкова екосистема визначається областю Ω з гідродинамічними характеристиками $u(x, y, z, t)$ (полем швидкості) та екологічними параметрами, такими як концентрація забруднювачів $C_i(x, y, z, t)$, концентрація розчиненого кисню $O(x, y, z, t)$, і біогенів $B(x, y, z, t)$. Задача полягає в отриманні цих функцій для прогнозування екологічного стану водних ресурсів у річці, які мінімі-

зують функціонал втрат загальної цільової функції (1.1):

$$J = \int_{\Omega} (\sum_i |C_i - C_{i,normal}| + |O - O_{normal}| + |B - B_{normal}|) d\Omega, \quad (1.1)$$

де $C_{i,normal}$, O_{normal} , B_{normal} – нормативні концентрації забруднювачів, кисню та біогенів для підтримки екологічного балансу, а J загальна цільова функція.

Початкові умови: $u(x, y, z, 0) = u_0(x, y, z)$, $C_i(x, y, z, 0) = C_{i0}(x, y, z)$,
 $O(x, y, z, 0) = O_0(x, y, z)$, $B(x, y, z, 0) = B_0(x, y, z)$.

Граничні умови задаються залежно від фізичних характеристик (наприклад, приплив на вхідній межі та відтік на вихідній).

Ця спрощена математична абстракція описує комплексне завдання з аналізу й моделювання екологічного стану річки через систему взаємопов'язаних рівнянь, де обчислювальним методом розраховуються параметри водних потоків і екологічні показники якості води.

1.4 Постановка задач дослідження

Мета дослідження – розробити інтегровану модель, яка поєднує гідродинамічні аспекти річкової системи та параметри якості води, що дасть змогу оцінити екологічний стан водних ресурсів, передбачити вплив забруднювачів, визначити критичні зони та запропонувати заходи для зменшення негативного антропогенного впливу. Завдання для досягнення цієї мети будуть наступними:

- розробити гідродинамічну модель для опису водного потоку в річкових системах та модель якості води, яка враховує основні забруднювачі (фосфати, нітрати, важкі метали, органічні сполуки);

- описати процес евтрофікації з використанням рівнянь для концентрацій біогенів та інтегрувати ці моделі в єдину систему для оцінки та прогнозування змін якості води;

- провести валідацію та тестування розробленої моделі на прикладі однієї з великих річок України, оцінити її ефективність;
- сформулювати висновки та рекомендації щодо зменшення негативного антропогенного впливу на водні ресурси.

2 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ РОЗВ'ЯЗАННЯ

2.1 Гідродинамічна модель

Гідродинамічна модель річкових систем є важливим інструментом для розуміння і прогнозування поведінки водних потоків у річках, як вони переміщують забруднювачі, поживні речовини та осади. Гідродинамічна модель використовує фізичні рівняння для опису течії води, враховуючи властивості рідини, швидкість потоку, тиск, а також вплив гравітації та різних геометричних особливостей річкового русла.

Основні елементи гідродинамічної моделі є наступними:

– рівняння Нав'є – Стокса, яке є основними рівняннями, що описують динаміку рідини, включаючи швидкість потоку та тиск, а у випадку річкових систем часто використовують спрощені форми рівнянь, адаптовані для відкритих водотоків, щоб зменшити обчислювальну складність;

– рівняння безперервності – це рівняння збереження маси, яке забезпечує умову, що обсяг води, який заходить у певну ділянку річки, відповідає обсягу, що виходить, з урахуванням випаровування, осадження та інших процесів;

– швидкість і напрямок потоку, зокрема модель враховує швидкість і напрямок потоку, що може змінюватися залежно від ширини та глибини русла, а також впливу перешкод (наприклад, рослинності або будівель) і це дає змогу прогнозувати, як швидко і в якому напрямку річка переносить забруднювачі чи осади;

– осадовий транспорт, для цього гідродинамічні моделі можуть включати підмоделі для опису транспорту осадів, що особливо важливо для моделювання ерозійних процесів і відкладення осадів у різних частинах річки;

– турбулентність, зокрема багато гідродинамічних моделей враховують турбулентність у воді, яка сприяє перемішуванню води та може впливати на розподіл поживних речовин і забруднювачів.

Розглянемо загальне рівняння Нав'є – Стокса для нестисливої рідини [6].

Воно має наступний вигляд (2.1), (2.2):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + f, \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot u = 0. \quad (2.2)$$

де $u = (u, v, w)$ – компоненти швидкості потоку води вздовж x, y та z – осей;

t – час;

ρ – густина води;

p – тиск;

ν – кінематична в'язкість води;

f – вектор зовнішніх сил (наприклад, сила тяжіння).

Дамо пояснення щодо рівняння безперервності. Як відомо, рівняння безперервності часто називають рівнянням нерозривності, особливо у фізиці та інженерії. Обидва терміни описують той самий принцип збереження маси або об'єму в потоці рідини чи газу, а також у контексті інших фізичних величин (наприклад, заряду). У контексті рідин та газів рівняння нерозривності вказує, що рідина або газ не можуть «розриватися» або зникати в просторі, що забезпечує збереження об'єму у випадку нестисливої рідини. Тому для нестисливих потоків рівняння нерозривності виглядає у загальній формі як (2.3):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.3)$$

де ρ – густина рідини (або концентрація речовини, що переноситься);

\vec{v} – вектор швидкості потоку;

$\nabla \cdot (\rho \vec{v})$ – дивергенція потоку густини.

Якщо рідина є нестисловою, тобто її густина ρ є сталою (не змінюється з часом), рівняння неперервності (2.3) спрощується до (2.4):

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (2.4)$$

Це означає, що сума швидкостей потоку в усіх напрямках залишається незмінною, забезпечуючи постійний об'ємний потік у системі.

Формули гідродинамічної моделі змінюються відповідно до кількості вимірів, що враховуються при описі руху води та переносу речовин.

Одновимірні моделі (1D) використовуються для довгих і вузьких річок, де зміни поперечного профілю несуттєві. Вони розглядають лише один напрямок потоку, зменшуючи обчислювальні ресурси, але при цьому можуть пропускати деталі про ширину і глибину. Крім того, в одновимірній моделі вважається, що всі параметри залежать тільки від одного координатного напрямку (довжини річки, x), а зміни в поперечному перерізі (ширині та глибині) або ігноруються, або враховуються як середні значення. Основне рівняння можна записати так:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f \quad (2.5)$$

де u – швидкість потоку вздовж осі x .

Двовимірні моделі (2D) включають два виміри: довжину й ширину річки. 2D моделі описують горизонтальні потоки в площині річки, що дозволяє врахувати ширину річки та особливості берегів. Це корисно для аналізу заплав, зони впливу паводків і детального розподілу водного потоку в поперечному перерізі. У двовимірній моделі додається ще одна координата (поперечний напрямок), що дозволяє враховувати зміни у ширині річки. Таким чином, модель включає компоненти швидкості у напрямках x та y , та має вигляд (2.6), (2.7):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f_x, \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + f_y. \quad (2.7)$$

де u та v – компоненти швидкості у напрямках x і y ;

f_x та f_y – компоненти зовнішніх сил у напрямках x та y .

Тривимірні моделі (3D) є найбільш складними й точними, їх використовуються для моделювання об'ємного потоку, включаючи вертикальні рухи води. Крім того, їх також застосовуються для складних завдань у великих річкових системах або для моделювання зон гирл. У тривимірній (3D) моделі вводиться ще одна координата z (глибина річки), що дозволяє враховувати вертикальні зміни потоку та набуває вигляду (2.8) – (2.10):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x, \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z. \quad (2.10)$$

де w – компонента швидкості у напрямку z ;

f_z – компонента зовнішніх сил у напрямку z .

Як бачимо, зі збільшенням вимірів рівняння стають складнішими, що вимагає більш складних чисельних методів, таких як методи скінченних різниць, скінченних елементів або об'ємів. Тож, вибір методу залежить від потрібної точності, наявних даних та обчислювальних ресурсів.

Зазначимо деякі переваги гідродинамічних моделей, а саме:

– прогнозування забруднення за допомогою моделей дозволяє передбачити поширення забруднення по річці, що є важливим для прийняття заходів щодо контролю та очищення;

– аналіз ризиків паводків за допомогою гідродинамічних моделей допомагає оцінити ймовірність паводків, особливо в районах з інтенсивними опадами або під час танення льоду;

– оптимізація управління водними ресурсами, що сприяє ефективнішому використанню води, дозволяючи розрахувати потреби в зрошуванні, контролювати обсяги водозабору та забезпечувати належний рівень якості води.

Гідродинамічні моделі є основою для комплексного екологічного аналізу річкових систем і можуть бути розширені іншими моделями, як-от моделі якості води або евтрофікації, для всебічної оцінки стану водних ресурсів [7].

2.2 Моделі якості води та евтрофікації

Рівняння адвекції-дифузії є універсальним підходом для математичного опису переносу речовин у середовищі, що змінюється, і підходить також для опису просторово-часового розподілу забруднювачів. Більшість відомих моделей якості води використовують саме це рівняння в основі свого математичного апарату [8].

Рівняння адвекції-дифузії описує два основні процеси, що впливають на розподіл і концентрацію забруднювачів у воді:

– адвекція (перенос) описує процес перенесення речовини (забруднювача) потоком рідини, що відбувається разом із рухом води, спричиненим течією в річці, при цьому враховуються швидкість потоку та напрямок переміщення забруднювачів, що відбувається без зміни концентрації в частинках середовища;

– дифузія (поширення) описує процес перемішування забруднювача на молекулярному та турбулентному рівнях, завдяки якому забруднювач розсіюється з областей високої концентрації в області з низькою концентрацією, при цьому враховується розповсюдження забруднюючих речовин через випадкові рухи молекул і турбулентність, що виникає у швидкоплинних водах.

Рівняння адвекції-дифузії для концентрації забруднювача C у тривимірному просторі має вигляд (2.11):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C + S \quad (2.11)$$

де $\frac{\partial C}{\partial t}$ – зміна концентрації забруднювача з часом;

\vec{u} – вектор швидкості потоку;

∇C – градієнт концентрації;

$\vec{u} \cdot \nabla C$ – адвективний член;

D – коефіцієнт дифузії (може включати турбулентність);

$\nabla^2 C$ – лапласіан концентрації, який описує розсіювання забруднювача;

$D \nabla^2 C$ – дифузійний член;

S – джерело або стік забруднювача (наприклад, точковий скид забруднювача чи процеси очищення).

Переваги використання рівняння адвекції-дифузії під час побудови моделі якості води можна окреслити такі:

– комплексне урахування переносу і розсіювання дозволяє описати як великомасштабний перенос забруднювачів, так і їх дрібномасштабне розсіювання, що є важливим для реальних річкових екосистем, де обидва процеси відбуваються одночасно;

– просторово-часова динаміка, а саме рівняння адвекції-дифузії враховує зміну концентрації забруднювачів як у просторі, так і в часі, що дозволяє створити прогнози щодо забруднення на різних відстанях і в різний час;

– гнучкість у додаванні джерел і стоків, яка полягає в тому, що рівняння дозволяє врахувати різні джерела забруднення, такі як точки скиду стічних вод або неявні розсіюванні джерела, наприклад, сільськогосподарські стоки, а також природні процеси самоочищення, які можна врахувати у вигляді стоків;

– адаптивність для різних умов, а саме коефіцієнти рівняння можуть бути змінені для відображення специфічних характеристик конкретного середовища, таких як глибина річки, швидкість потоку та температурні умови, що дозволяє

адаптувати модель до реальних умов річкових басейнів.

Для побудови моделі якості води будемо використовувати рівняння переносу, яке враховує адвекцію, дифузію та реакцію для опису концентрацій забруднювачів C_i (наприклад, фосфатів, нітратів, органічних речовин). Тоді отриману модель якості води можна представити у наступному вигляді (2.12):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (u C_i) = D_i \nabla^2 C_i + R_i(C_i) \quad (2.12)$$

де C_i – градієнт концентрації i -го забруднювача;

D_i – коефіцієнт дифузії для i -го забруднювача;

$R_i(C_i)$ – член, що враховує реакції, такі як розпад або трансформацію забруднювача, а також біологічні процеси (наприклад, споживання біогенів фітопланктоном).

Евтрофікаційний процес можна описати додатковими рівняннями для концентрацій біогенів (фосфатів P та нітратів N) та кисню O_2 , які визначають розвиток водоростей та процеси розкладання органічних речовин. Наприклад, рівняння (2.13) – (2.15):

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (uP) = D_p \nabla^2 P + R_p(P, N), \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (uN) = D_p \nabla^2 N + R_N(P, N), \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial O_2}{\partial t} + \nabla \cdot (uO_2) = D_{O_2} \nabla^2 O_2 + R_{O_2}(P, N, O_2). \quad (2.15)$$

де D – коефіцієнт дифузії для хімічної сполуки;

$R_p(P, N)$ – швидкість споживання фосфатів при зростанні водоростей;

$R_N(P, N)$ – швидкість споживання нітратів;

$R_{O_2}(P, N, O_2)$ – швидкість розчинення або споживання кисню залежно від концентрації органічної речовини та процесів розкладання.

2.3 Комплексна модель

Одним із завдань дослідження є інтеграція гідродинамічної моделі з моделлю якості води для створення комплексної моделі річкової системи. Це поєднання дозволяє враховувати динаміку водного потоку та концентрацію основних забруднювачів, таких як фосфати, нітрати та важкі метали, в рамках єдиної системи.

Додатково, для опису процесів евтрофікації були розроблені рівняння, що моделюють концентрації біогенних елементів, таких як: азот та фосфор, які впливають на розвиток водоростей та процеси «водного цвітіння». Об'єднавши ці рівняння з гідродинамічною та якісними моделями, було отримано систему рівнянь, що дозволяє комплексно оцінювати екологічний стан річкових екосистем, прогнозувати зміни якості води та визначати критичні зони забруднення.

Отже, об'єднана система рівнянь для аналізу та моделювання екологічного стану водних ресурсів у річкових екосистемах виглядає так (2.16):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u &= -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + f, \\ \nabla \cdot u &= 0, \\ \frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (uC_i) &= D_i \nabla^2 C_i + R_i(C_i), \\ \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (uP) &= D_P \nabla^2 P + R_P(P, N), \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (uN) &= D_N \nabla^2 N + R_N(P, N), \\ \frac{\partial O_2}{\partial t} + \nabla \cdot (uO_2) &= D_{O_2} \nabla^2 O_2 + R_{O_2}(P, N, O_2). \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

Ця система дозволяє моделювати взаємодію гідродинаміки та якості води, включаючи перенесення і розподіл забруднювачів, а також біохімічні процеси, що ведуть до евтрофікації і розчинення кисню.

Розв'язання такої системи рівнянь є складним завданням, яке потребує чисельних методів і потужних обчислювальних ресурсів [9]. Система поєднує рівняння Нав'є – Стокса для гідродинаміки та рівняння переносу для якості води, і вирішується в кілька етапів.

Для можливості обчислення отриманої системи рівнянь необхідно визначити граничні та початкові умови.

Початкові умови: початковий розподіл швидкостей потоку $u(x, y, z, 0)$, тиску $p(x, y, z, 0)$ та концентрацій речовин $C_i(x, y, z, 0)$.

Граничні умови включають умови на вході та виході річкової системи, де можуть бути джерела забруднення або припливи, а також межі потоку.

Для обчислення комплексної моделі річкової системи необхідно використовувати спеціальні математичні програмні пакети. Гарною альтернативою може бути використання мови програмування Python [10] з додатковими бібліотеками наукових та прикладних функцій та алгоритмів чисельних методів.

2.4 Вибір водного ресурсу для застосування моделі

Для побудови комплексної моделі екологічного стану водних ресурсів річкових систем важливим етапом є вибір безпосередньо самого водного ресурсу. Модель, розроблена в межах цієї роботи, вимагає детальних даних про фізичні, хімічні та екологічні характеристики річки. З огляду на такі фактори, як: обчислювальна складність, обмеження доступу до даних та необхідність отримання практично значущих результатів, було прийнято рішення проаналізувати окремий участок річки Південний Буг, а саме ділянку від м. Вінниця до Ладижинського водосховища. Ділянка належить басейну річки Південний Буг (рисунок 2.1) та пролягає в межах Вінницької області (рисунок 2.2).



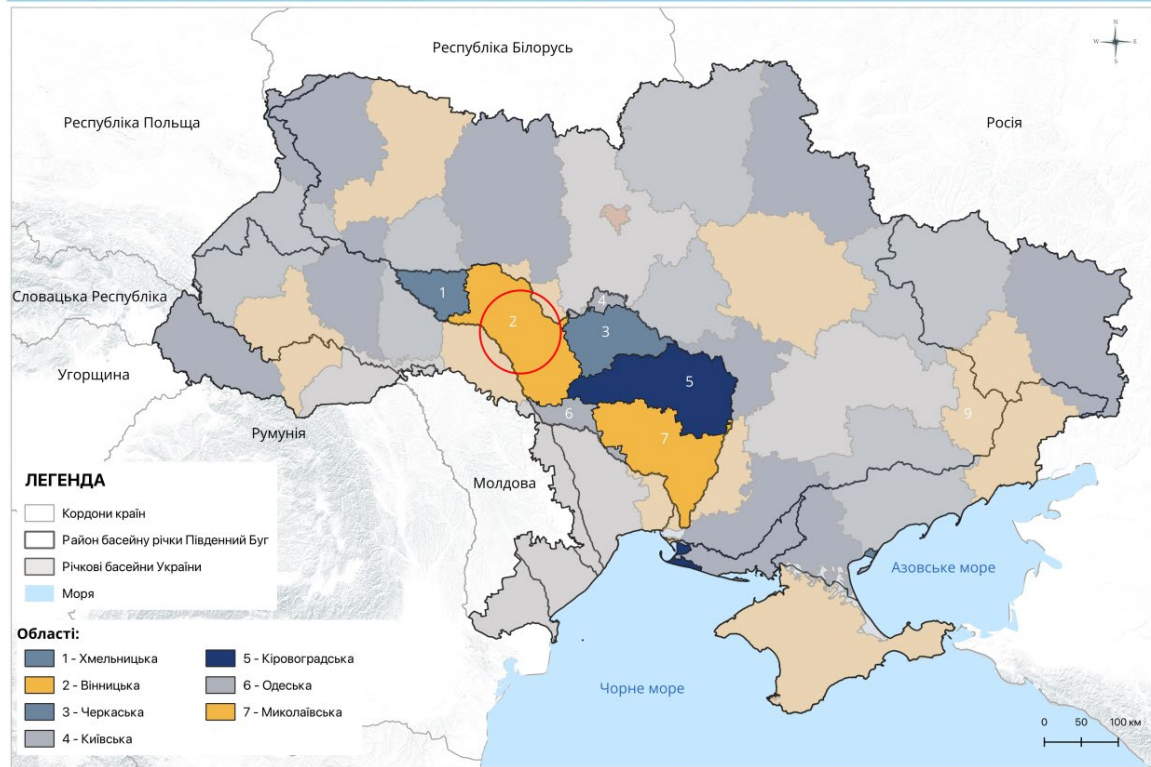
Використані матеріали Державного агентства водних ресурсів України, Басейнового управління водних ресурсів річки Південний Буг. Київ, листопад 2023 року

www.davr.gov.ua

Рисунок 2.1 – Район басейну річки Південний Буг на мапі річкових басейнів

Адміністративні одиниці району басейну річки Південний Буг

ПУРБ Пд Бугу - 2025-2030 роки - КАРТА 2



Використані матеріали Державного агентства водних ресурсів України, Басейнового управління водних ресурсів річки Південний Буг. Київ, листопад 2023 року

www.davr.gov.ua

Рисунок 2.2 – Адміністративна належність обраної ділянки річки

Україна має кілька великих річкових систем, які могли б стати об'єктом для застосування моделі, зокрема Дніпро, Дністер, Сіверський Донець та Південний Буг. Вибір великих басейнів річок створює певні обмеження для застосування обраної моделі:

а) Дніпро, найбільша річка України протяжністю понад 2200 км, має каскад водосховищ, що ускладнює моделювання течії та переносу забруднювачів через необхідність обробки величезної кількості даних і значні обчислювальні витрати [11];

б) Дністер також має значну довжину (1362 км) та проходить через кілька країн, що ускладнює доступ до даних та їхню узгодженість;

в) Сіверський Донець, з довжиною 1053 км і статусом транскордонної річки, протікає через великі агломерації, умови яких додають велику кількість факторів для урахування, що ускладнює калібрування моделі.

Натомість Південний Буг має протяжність 806 км, що забезпечує оптимальний масштаб для моделювання. Вибір певної ділянки річки дозволяє врахувати основні фізико-хімічні характеристики, які необхідні для виконання обчислень моделі, але й, одночасно, без значного збільшення обчислювальної складності.

Для отримання необхідних географічних даних для вибору ділянки річки Південний Буг були використані наступні джерела:

а) офіційний сайт Державного агентства водних ресурсів України, що надає офіційну інформацію про водні ресурси України [12];

б) план управління річковим басейном Південного Бугу [13];

в) мапи басейну Південного Бугу [14];

г) сайт басейнового управління водних ресурсів річки Південний Буг [15].

Для Південного Бугу доступні детальні гідрологічні та екологічні дані, особливо для ділянки, що проходить через густонаселені регіони Вінницької області. Для таких річок, як Дністер або Сіверський Донець, доступність даних є меншою через віддаленість та меншу густоту населених пунктів уздовж річки. Водночас інші річки, як-от Дніпро, мають значно більші масштаби та складну

структуру водних мас через численні водосховища, що збільшує обчислювальне навантаження.

Південний Буг на обраній ділянці має помірну змінність ширини (60–80 м) і глибини (2.0–2,5 м), що дозволяє будувати просторово-часову сітку зі збереженням необхідної деталізації. На рисунку 2.3 наведене зображення ділянки за допомогою джерела супутникових даних [16].

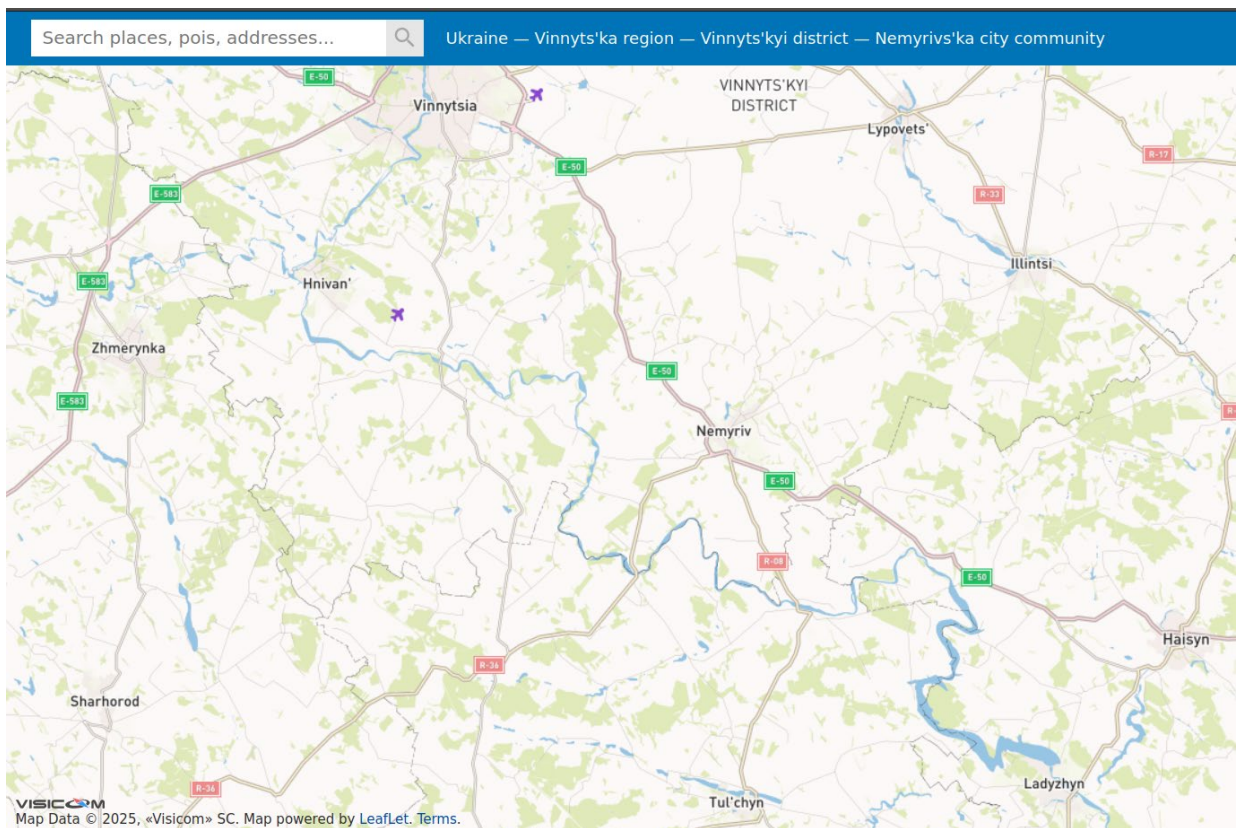


Рисунок 2.3 – Обрана ділянка річки на супутниковій мапі

Обрана ділянка річки від м. Вінниця до Ладжинського водосховища відповідає критеріям, що забезпечують оптимальний баланс між точністю моделі, складністю обчислень і доступністю даних:

- ділянка довжиною 60 км дозволяє створити просторово-часову сітку з високою деталізацією без значного збільшення обчислювального навантаження, тоді як моделювання всієї річки вимагало б понад 10 разів більше обчислень;
- у межах цієї ділянки зосереджені гідрометеорологічні станції, що забез-

печують регулярний збір даних, що дає можливість калібрувати та верифікувати модель за реальними спостереженнями;

– обрана ділянка річки включає змінні параметри течії, ширини та глибини, що дозволяє протестувати модель в умовах різних фізичних характеристик річки.

Висновки за розділом 2

У цьому розділі кваліфікаційної роботи для досягнення цілей дослідження створено комплексну модель, що об'єднує гідродинамічний компонент і компонент якості води. Це дозволяє охопити такі аспекти, як потік води, її швидкість, об'ємне розподілення забруднюючих речовин та процеси самоочищення річкової системи.

Вибір річки Південний Буг та конкретної ділянки від Вінниці до Ладижинського водосховища обґрунтований збалансованістю між обчислювальною складністю, доступністю даних і практичною значущістю. Ця ділянка забезпечує реальні умови для тестування моделі, можливість її верифікації та подальшого масштабування.

Викладеної інформації достатньо для розробки програмної реалізації обраної моделі.

3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

3.1 Використання Python як інструменту для автоматизації та обчислювання

Мова програмування загального призначення Python була обрана у якості основного інструменту для розробки програмної реалізації моделі завдяки своїй універсальності, доступності та багатству бібліотек, які ідеально підходять для наукових обчислень, аналізу даних та візуалізації результатів.

Простий і зрозумілий синтаксис Python дозволив ефективно реалізувати складну модель, яка включає чисельні розрахунки гідродинаміки, транспорту забруднювачів та аналіз кисню. Завдяки легкості написання й тестування коду, час на розробку було значно скорочено, а можливість швидкого пошуку помилок забезпечила високу надійність моделі.

Python також має величезну спільноту користувачів, що гарантує наявність великої кількості ресурсів, документації та готових прикладів. Це значно полегшило вирішення технічних питань та оптимізацію коду.

Ключову роль у реалізації відіграли потужні бібліотеки Python. Зокрема, NumPy забезпечила швидке виконання операцій з багатовимірними масивами, що було важливо для обробки великих обсягів даних у просторі й часі. Matplotlib стала основним інструментом для створення графіків і візуалізації, включаючи карти розподілу концентрацій, швидкостей та зон ризику. Для роботи з географічними даними – Cartopy, що дозволило інтегрувати результати моделювання з реальними картами та населеними пунктами.

Завдяки цим перевагам Python став ідеальним вибором для імплементації комплексної моделі даної роботи, поєднуючи точність чисельних розрахунків, зручність роботи з географічними даними та можливість інтерактивної візуалізації. Сучасна організація коду на Python також підтримує модульний підхід, коли програмний продукт складається з кількох частин та може бути розширеним за потреби.

3.2 Алгоритм розв'язання задачі аналізу та моделювання екологічного стану обраної ділянки річки

Алгоритм розв'язання задачі складається з декількох поступових кроків, що охоплювали етапи збору даних, побудови моделі, чисельних розрахунків і візуалізації результатів. Нижче наведено ключові етапи цього алгоритму.

Етап 1. Постановка задачі та визначення об'єкту моделювання. Метою є оцінка екологічного стану річки Південний Буг на ділянці від Вінниці до Ладжинського водосховища. Основними показниками обрано концентрацію забруднювачів (фосфати, нітрати), рівень кисню, швидкість течії, турбулентність. Обґрунтування вибору ділянки зумовлено врахуванням балансу складності розрахунків, доступністю даних і реальністю оцінки.

Етап 2. Збір даних та початкові припущення:

- джерела даних: відкриті географічні й екологічні ресурси, наукові публікації, статистичні звіти;
- геометричні параметри річки: довжина ділянки, змінна ширина, середня глибина;
- гідродинамічні параметри: часові зміни швидкості течії;
- екологічні параметри: початкові концентрації забруднювачів та рівень кисню.

Етап 3. Побудова просторово-часової сітки:

- просторова дискретизація у вигляді розділення ділянки на секції зі специфічними шириною, глибиною й іншими характеристиками та використання тривимірної сітки з кроками dx , dy , dz ;
- часова дискретизація за визначенням періоду моделювання (місяці, дні) та кроку часу (години, хвилини).

Етап 4. Реалізація математичної моделі:

- гідродинамічної частини, використовуючи спрощені рівняння Нав'є–Стокса для розрахунку швидкості течії й турбулентності зі зміною параметрів за секціями;

- в частині транспортування забруднювачів, використовуючи рівняння адвекції-дифузії для моделювання перенесення фосфатів і нітратів;

- в частині евтрофікації, визначаючи вплив забруднювачів на зниження рівня кисню через відповідні реакційні рівняння.

Етап 5. Чисельна реалізація моделі у вигляді програмного коду Python:

- ініціалізація просторово-часової сітки та змінних;
- розрахунок параметрів течії (швидкість, турбулентність) для кожного часового кроку;

- оновлення концентрацій забруднювачів через адвекцію-дифузцію;

- розрахунок рівня кисню на основі впливу забруднювачів.

Етап 6. Візуалізація та аналіз результатів:

- відображення зон з найвищими рівнями забруднення й дефіциту кисню;
- графіки зміни концентрацій забруднювачів у контрольних точках;
- карти швидкостей течії, концентрацій забруднювачів та рівня кисню;
- географічна прив'язка до реальних координат;
- інтерпретація результатів у вигляді зони з найбільшим ризиком екологічної деградації.

Етап 7. Висновки та подальші кроки:

- оцінка моделі за отриманими результатами для заданої ділянки річки;
- оцінка можливостей масштабування моделі та її адаптації для інших річок із врахуванням місцевих даних;

- оцінка подальших досліджень та можливих інтеграцій.

Цей алгоритм демонструє, як комплексний підхід із використанням сучасних інструментів та методів дозволяє вирішувати задачі моделювання екологічного стану річкових екосистем.

3.3 Опис програми

У процесі виконання даної роботи були створені кілька програмних мо-

дулів і утиліт на основі мови програмування Python, що забезпечили реалізацію інтегрованої (комплексної) моделі екологічного стану ділянки річки Південний Буг. Кожен програмний модуль має чітку функціональну мету та забезпечує окремий етап моделювання, розрахунків і візуалізації.

Модуль побудови просторово-часової сітки. Модуль призначений для розбивки досліджуваної ділянки річки на просторові секції та формування 3D-сітки, необхідної для чисельного розв'язання рівнянь моделі. Функціонал модуля охоплює кілька ключових завдань. По-перше, модуль виконує розрахунок просторової сітки, враховуючи параметри річки, такі як довжина, ширина та глибина секцій. По-друге, формується часова сітка із визначенням оптимального кроку часу для моделювання процесів. По-третє, отримана сітка зберігається у вигляді масивів, що дозволяє використовувати її на наступних етапах моделювання.

Модуль гідродинамічного моделювання. Програма призначена для розрахунку швидкості течії та турбулентності води, базуючись на рівняннях Нав'є–Стокса. Її основна мета це забезпечити точне гідродинамічне моделювання, що є основою для подальшого аналізу транспортування забруднювачів. Функціонал програми включає кілька важливих компонентів. Розрахунок турбулентності виконується для кожної точки просторової сітки, що забезпечує високу деталізацію. Крім того, моделюються граничні умови на вході, виході, бокових межах та поверхні, що дозволяє враховувати різноманітні впливи зовнішніх факторів. У результаті роботи програми формуються масиви швидкостей і турбулентності для всієї просторової сітки. Ці дані є основою для моделювання транспортування забруднювачів у воді, забезпечуючи точність та деталізацію розрахунків.

Модуль моделювання транспортування забруднювачів. Програмний модуль призначений для моделювання поширення забруднювачів у водному середовищі, використовуючи рівняння адвекції-дифузії. Він допомагає оцінити вплив забруднювачів на екологічний стан річки та передбачити їх поведінку у просторі та часі. Цей модуль здійснює розрахунок зміни концентрації основних

забруднювачів, таких як фосфати, нітрати та розчинений кисень. Окрім цього, оцінюється вплив течії, турбулентності, що підвищує точність і достовірність моделювання. У результаті програма формує масиви концентрацій забруднювачів для кожної точки просторово-часової сітки.

Модуль аналізу евтрофікації. Програма моделює зміни рівня розчиненого кисню через евтрофікацію, оцінюючи вплив біогенних елементів. Вона розраховує зниження кисню, визначає зони дефіциту (< 5 мг/л) та ризику гіпоксії (< 2 мг/л). Результатом є карти концентрації кисню та зон екологічного ризику для моніторингу та покращення стану водойми.

Модуль візуалізації. Забезпечує графічне представлення результатів моделювання у вигляді карт і графіків. Створює карти швидкості течії, концентрацій забруднювачів та зон дефіциту кисню, а також візуалізує часову динаміку в контрольних точках. Додатково інтегрує географічні дані реальних об'єктів, таких як населені пункти.

Модуль географічної інтеграції. Програма інтегрує результати моделювання з географічними даними ділянки річки. Вона використовує бібліотеки Matplotlib та Cartopy для завантаження геоданих, відображає зони ризику на мапі з населеними пунктами та додає легенду, шкалу ризику й географічні об'єкти. Результатом є мапа зон екологічного ризику з точною географічною прив'язкою для аналізу та прийняття рішень.

Створені модулі програми забезпечили повний цикл моделювання: від побудови сітки та чисельного розрахунку до аналізу й візуалізації результатів.

Лістинг програмного коду модулів програмного продукту наводиться в Додатку А.

Висновки за розділом 3

Python був обраний, як ключовий інструмент для реалізації поставлених задач, завдяки своїй гнучкості, широкому набору бібліотек для наукових обчи-

слень та можливості легко інтегрувати географічні дані. Спеціальні математичні та наукові бібліотеки забезпечили ефективне виконання чисельних розрахунків, моделювання фізичних процесів та подальшу візуалізацію результатів.

Розв'язання задачі базувалося на алгоритмі, що включав побудову просторово-часової сітки, моделювання гідродинамічних процесів, транспортування забруднювачів, процесів евтрофікації та аналіз рівня розчиненого кисню.

Розроблені програмні модулі охоплюють усі етапи моделювання, починаючи з побудови просторово-часової сітки та закінчуючи візуалізацією зон екологічного ризику. Отримана програма є гнучкою та масштабованою, що дозволяє адаптувати її для аналізу інших річкових ділянок.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ АНАЛІЗ

4.1 Генерація просторово-часової сітки

Просторово-часова сітка це спосіб математичного моделювання, який описує структуру простору та часу під час дослідження явищ, що мають залежність від просторово-часових характеристик. Така сітка дозволяє розділити простір та час на дрібні елементи, кожен з яких можна обчислити окремо. Це дає можливість точніше моделювати складні фізичні процеси в різних умовах. ПЧС є основою для виконання розрахунків за допомогою комплексної моделі, яка включає гідродинаміку, транспортування забруднювачів, евтрофікацію та баланс розчиненого кисню. У цьому розділі описано створення ПЧС для моделювання ділянки річки Південний Буг між Вінницею та Ладжинським водосховищем.

Метою побудови сітки є розбиття моделювання на дискретні елементи, що дозволяє ефективно розраховувати фізичні, хімічні та біологічні процеси в річковій системі. ПЧС враховує геометрію русла, локальні характеристики (ширина, глибина, вигини) та часові етапи для відображення динамічних процесів.

Довжина ділянки річки була визначена за географічними координатами точок [16], де початком є район міста Вінниця, а кінцем межа Ладжинського водосховища. Загальна довжина ділянки близько 60 км, що відповідає $L = 60000$ м.

Далі обираємо часовий період для аналізу та моделювання процесів у 6 місяців. Такий період охоплює зміну сезонів, що дозволяє врахувати сезонні зміни швидкості течії, температури води та рівня забруднень. Період достатньо тривалий для отримання статистично значущих результатів, але не перевантажує обчислення.

Розбиття ділянки річки по довжині на секції. Ділянка річки поділена на 6

секцій по 10 км кожна. Кожна секція врахована локальних змін ширини, глибини та швидкості течії, як наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Розбиття ділянки на секції

Секція	Відстань (м)	Ширина (м)	Глибина (м)	Швидкість течії (м/с)
Секція 1	0 – 10000	60	2	0,5
Секція 2	10000 – 20000	70	2,5	1
Секція 3	20000 – 30000	80	2,5	1,2
Секція 4	30000 – 40000	75	2,3	1
Секція 5	40000 – 50000	70	2	0,8
Секція 6	50000 – 60000	65	2,1	1

Значення ширини (W) та глибини (D) річки на обраній ділянці змінюються відповідно до таблиці 4.1 по кожній секції. Ширина: від 60 до 80 м. Глибина: від 2 до 2,5 м. Ці дані базуються на гідрологічних характеристиках, отриманих із відкритих джерел та географічних мап [17]. Вигини русла були враховані шляхом введення додаткових зсувів для координати y , щоб відобразити зміну напрямку потоку у відповідних секціях. На ділянках із кривизною також були враховані зміни швидкості та турбулентності.

Вибір кроків для просторової частини сітки здійснювався наступним чином:

– крок по довжині (dx) = 1000 м, достатньо деталізований для врахування локальних змін швидкості течії та концентрації забруднювачів й не перевантажує обчислення;

– крок по ширині (dy) = 10 м, достатньо деталізований для профілювання річки по ширині й враховує зміни ширини по кожній секції;

– крок по глибині (dz) = 0,5 м, достатньо деталізований для змін глибини річки в кожній секції, зокрема у звуженнях і на порогах.

Часовий крок (dt) дорівнює 1 годині, що є достатнім для оцінки динаміки процесів перенесення забруднювача та змін концентрації кисню.

Кількість сегментів по довжині річки розраховувався за наступною формулою (4.1):

$$n_x = \frac{L}{dx} + 1, \quad (4.1)$$

де L – довжина ділянки річки;

dx – крок по довжині.

Формула для розрахунку кількості сегментів по ширині річки (4.2):

$$n_y = \frac{W}{dy} + 1, \quad (4.2)$$

де W – ширина річки;

dy – крок по ширині.

Формула для розрахунку кількості сегментів по глибині річки (4.3):

$$n_z = \frac{D}{dz} + 1, \quad (4.3)$$

де D – глибина річки;

dz – крок по глибині.

Формула для розрахунку кількості часових точок (4.4):

$$n_t = \frac{T}{dt}, \quad (4.4)$$

де T – загальний часовий період;

dt – часовий крок.

Відповідні отримані результати розрахунків кількості сегментів:

$$n_x = \frac{L}{dx} + 1 = \frac{60000}{1000} + 1 = 61,$$

$$n_y = \frac{W}{dy} + 1 = \frac{80}{10} + 1 = 9,$$

$$n_z = \frac{D}{dz} + 1 = \frac{2,5}{0,5} + 1 = 6,$$

$$n_t = \frac{T}{dt} = \frac{15552000}{3600} = 4320,$$

де W – максимальна ширина річки згідно таблиці 4.1;

D – максимальна глибина річки;

T – часовий період в 6 місяців або 15552000 секунд.

Далі використовуємо модуль побудови ПЧС написаний на Python для об-
рахунку масивів координат на основі розрахованих сегментів. 3D-візуалізації
вузлів сітки показує рівномірний розподіл у просторі (рисунки 4.1, 4.2).

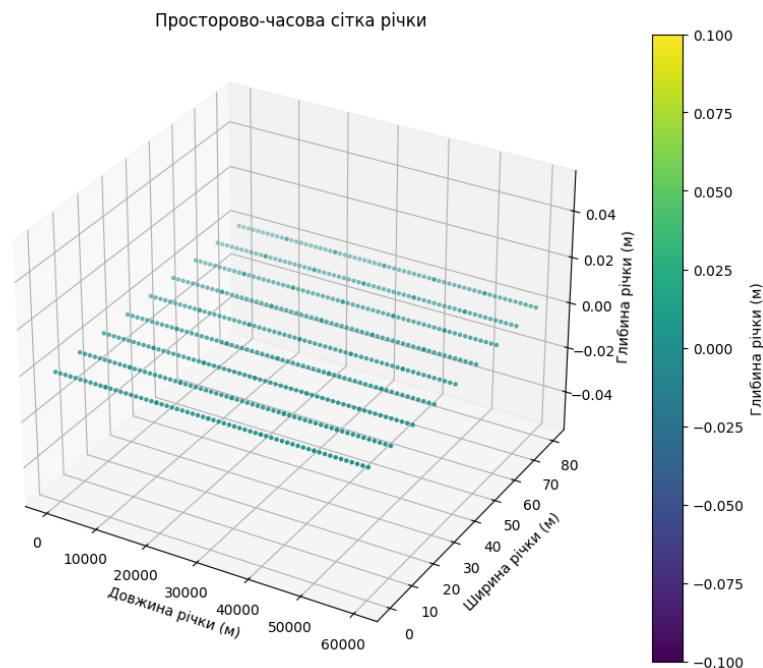


Рисунок 4.1 – 3D-сітка згенерована для поверхневого шару по довжині

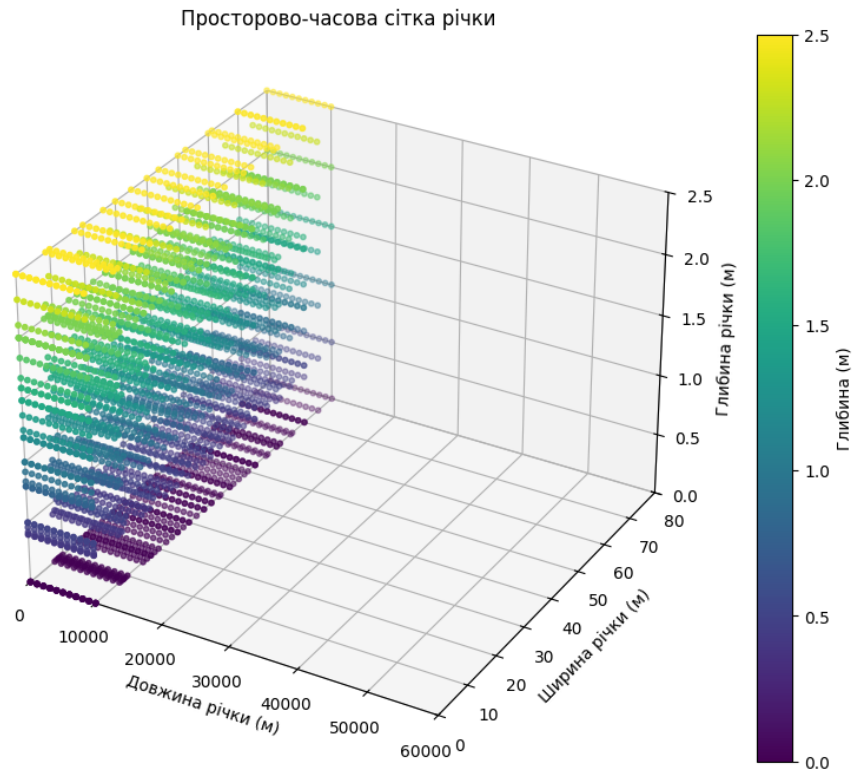


Рисунок 4.2 – 3D сітка згенерована для першої секції ділянки по глибині

Інфографіка профілю річки показує зміну ширини та глибини за секціями (рисунки 4.3, 4.4).

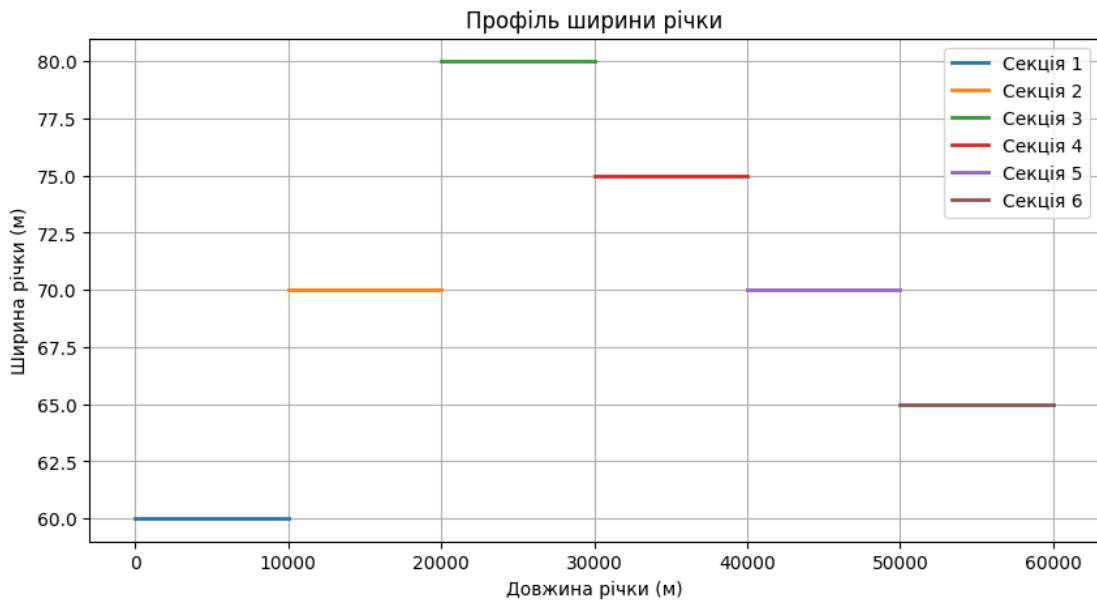


Рисунок 4.3 – Профіль річки по ширині за секціями

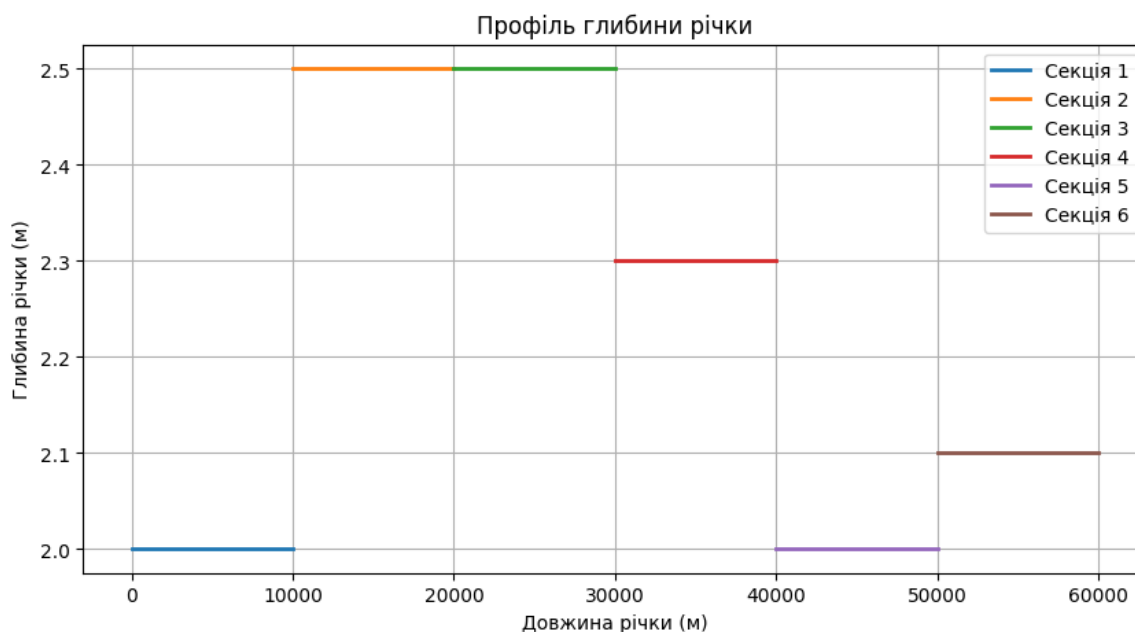


Рисунок 4.4 – Профіль річки по глибині за секціями

Згенерована ПЧС готова для інтеграції в модель.

4.2 Обчислюваний експеримент для комплексної моделі

Для перевірки моделі та її калібрування було опрацьовано сет даних. На базі згенерованої раніше ПЧС створюються масиви гідрологічних вхідних умов, які необхідні для подальшого обчислення хімічних й біологічних процесів. Кожна секція сітки об'єднується для створення єдиного простору, де моделюються ці процеси. Ініціалізація даних відбувалась у вигляді початкових концентрацій фосфатів, нітратів та кисню, а також локальних подій забруднення у вигляді підвищення концентрацій фосфатів та нітратів та зниження концентрації кисню у визначених точках. За результатом обчислень програмна частина моделі генерує наступну інфографіку: карту швидкостей течії на ділянці моделювання, карти концентрацій фосфатів, нітратів, кисню, карту кисневого дефіциту та аналізу виникнення гіпоксії, карту часової динаміки у контрольній точці. Також генерується мапа можливих зон ризиків з географічною прив'язкою

до найближчих населених пунктів на обраній ділянці річки для моделювання та аналізу.

В таблицях 4.2, 4.3 наведені набори даних, які були використані для перевірки моделі.

Таблиця 4.2 – Зведена таблиця опису даних для налаштування моделі

Категорія	Тип даних	Опис	Джерело
Геометрія річки	Довжина секцій Ширина секцій Глибина секцій	Довжина кожної секції річки (м). Ширина кожної секції річки (м). Глибина кожної секції річки (м).	Карти, топографічні дані Замірювання, геопросторові дані Замірювання, гідрологічні дослідження
Гідродинаміка	Швидкість течії Турбулентність	Сезонна варіація швидкості течії (м/с). Коефіцієнт турбулентності (м ² /с).	Гідрологічні звіти, моделювання Літературні дані, польові вимірювання
Хімічні параметри	Фосфати Нітрати Кисень	Початкова концентрація фосфатів (мг/л). Початкова концентрація нітратів (мг/л). Початкова концентрація розчиненого кисню (мг/л).	Лабораторний аналіз, моніторинг якості води Лабораторний аналіз, моніторинг якості води Лабораторний аналіз, моніторинг якості води

Продовження таблиці 4.2

Екологічні фактори	Локальні події забруднення Біологічні процеси	Географічні координати та інтенсивність локальних джерел забруднення (мг/л). Швидкість евтрофікації (наприклад, зменшення кисню через забруднення) (мг/л·год).	Моніторинг, аналітичні звіти Літературні дані
Граничні умови	Вхідні концентрації Вихідні концентрації	Концентрації забруднювачів та кисню на вхідному кінці річки (мг/л). Концентрації на вихідному кінці річки (мг/л).	Замірювання у верхній течії Замірювання у нижній течії
Часові параметри	Часовий крок Загальна тривалість	Інтервал часу для моделювання (години). Тривалість моделювання (місяці, дні).	Встановлюється залежно від точності моделі Встановлюється залежно від мети дослідження

Кінець таблиці 4.2

Геопросторові дані	Координати секцій Координати зон ризику	Географічні координати кожної секції річки. Потенційні ризики (локальні події забруднення).	Геопросторові карти Моніторинг, польові дослідження
--------------------	--	--	--

Таблиця 4.3 – Дані використані під час обчислюваного експерименту

Параметр	Опис	Значення	Одиниці виміру
Швидкість течії (u)	Середня швидкість потоку для кожної секції річки	0,3-0,8	м/с
Турбулентність (v_t)	Залежить від швидкості та глибини річки	0,0001-0,0005	м ² /с
Ширина річки (y)	Мінімальна-максимальна ширина річки для кожної секції	60-80	м
Глибина річки (z)	Мінімальна-максимальна глибина річки для кожної секції	2-2,5	м
Фосфати (P)	Початкова концентрація фосфатів, змінюється щомісячно	0,05-0,2	мг/л

Кінець таблиці 4.3

Нітрати (N)	Початкова концентрація нітратів, змінюється щомісячно	0,1-0,5	мг/л
Органіка (C_0)	Початкова концентрація органічних речовин	0,1-0,3	мг/л
Кисень (O_2)	Рівень розчиненого кисню	8-10	мг/л
Температура (T)	Температура води на часовий період	10-25	$^{\circ}C$
Інтенсивність стоків	Джерела забруднення	0.005-0.2	мг/с
Часовий період	Загальний час моделювання	6 місяців	с
Часовий крок (dt)	Інтервал часу для обчислень	1 година	с
Кількість часових точок		4320	

Ці дані були отримані з відкритих джерел та літератури, що може впливати на точність та достовірність результатів. Одночасно з тим, цих даних достатньо для верифікації моделі.

Однорідний розподіл кольору на рисунку 4.5 вказує, що швидкість потоку на поверхні річки має майже постійне значення вздовж усієї довжини та ширини річки.

Діапазон швидкостей, вказаний на кольоровій шкалі, становить від 0 до 0,1 м/с. Це порівняно низькі значення, які можуть бути реалістичними для спокійних ділянок річки або періоду з повільним потоком.

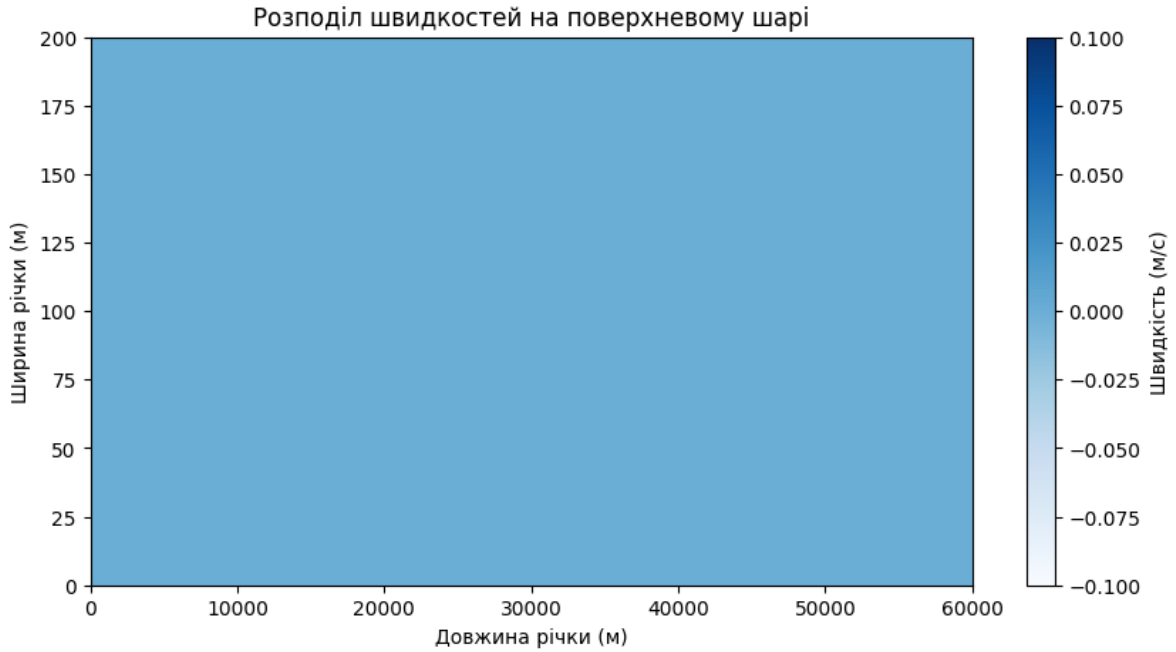


Рисунок 4.5 – Карта розподілу швидкостей на поверхневому шарі річки

Варіативність даних на графіку дуже мала. Це може бути наслідком невірного налаштування сезонних параметрів швидкості або турбулентності в моделі.

Також можна побачити частотний розподіл швидкостей, що наведений на рисунку 4.6.

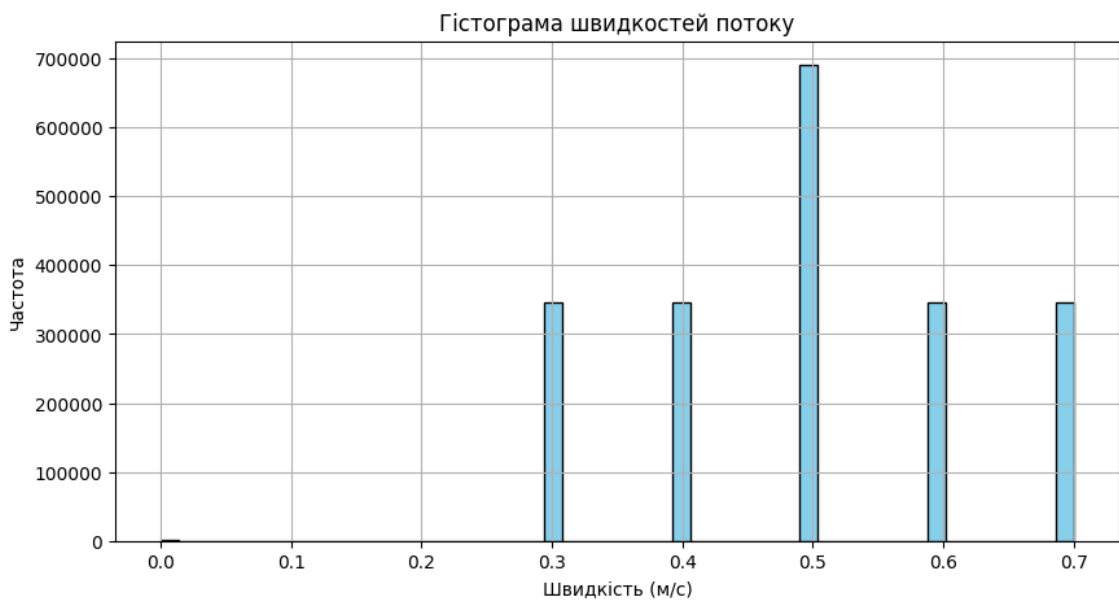


Рисунок 4.6 – Гістограма частотного розподілу швидкостей

Найбільше значення має швидкість близько 0.5 м/с, що вказує на домінуючу характеристику течії для заданого набору параметрів. Гістограма підтверджує, що модель використовує дискретні сезонні швидкості для потоку, без суттєвих змін по довжині або ширині річки.

Теплова карта середньої швидкості по глибині наведена на рисунку 4.7.

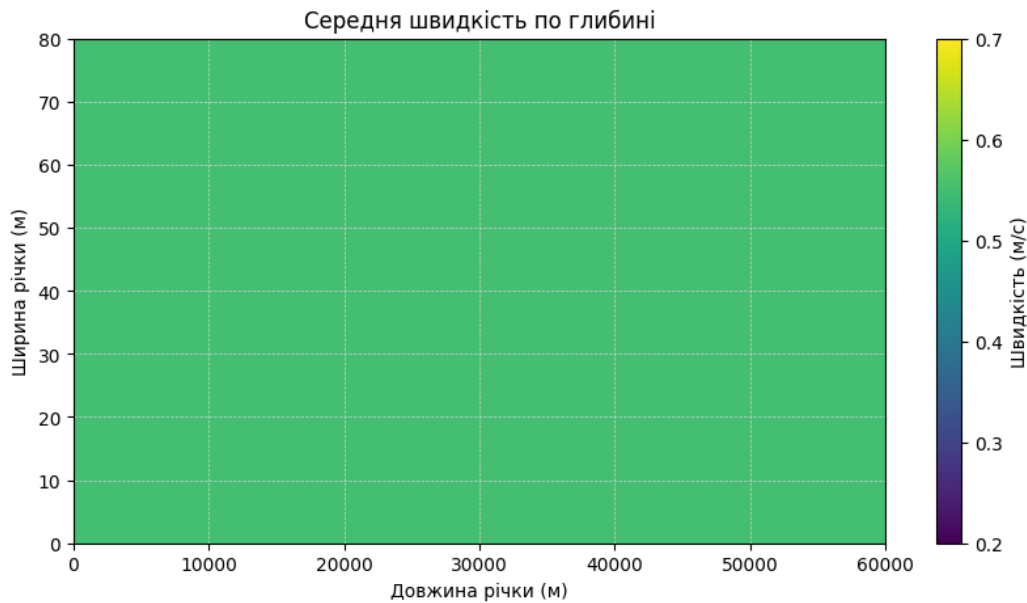


Рисунок 4.7 – Теплова карта середньої швидкості по глибині

Карта відображає розподіл швидкостей на різних ділянках річки, усереднених по глибині. Карта виглядає однорідною в кольорі, що свідчить про однакову середню швидкість потоку по всій довжині та ширині річки. Значення швидкостей варіюються від 0,2 м/с до 0,7 м/с, що відповідає сезонним параметрам моделі.

На рисунку 4.8 наведена теплова карта концентрації фосфатів (P) у середньому шарі глибини річки. Концентрація фосфатів змінюється від 0 мг/л до 1 мг/л, що визначено в кольоровій шкалі. На карті спостерігаються горизонтальні смуги з відмінною інтенсивністю, які відповідають розподілу концентрації фосфатів по ширині та довжині річки. Карта демонструє чіткий вплив ширини річки на розподіл концентрацій. Більш насичені ділянки корелюють із секціями, де ширина річки змінюється, створюючи умови для накопичення фосфатів.

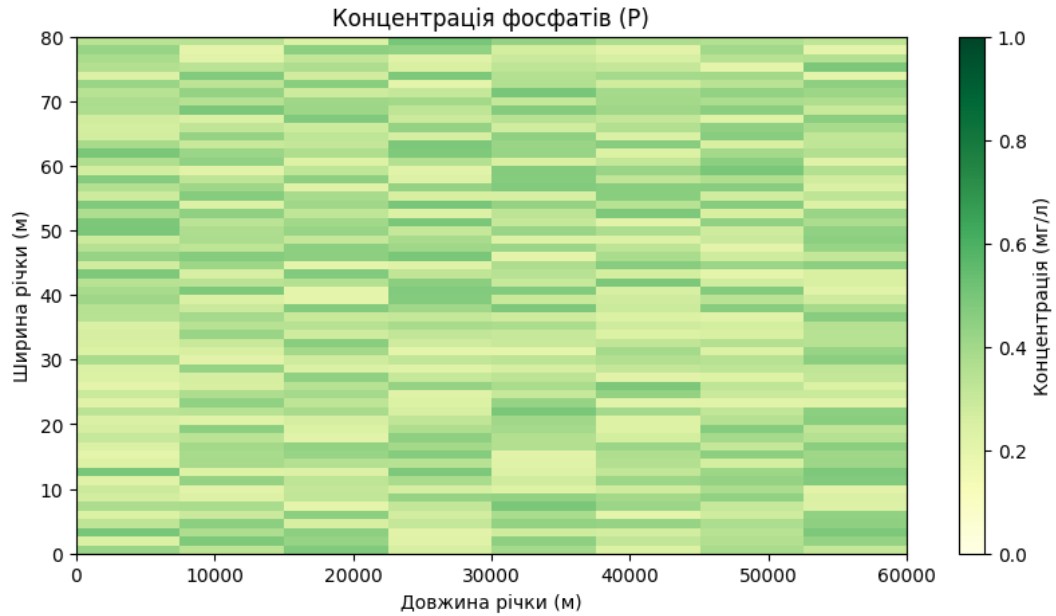


Рисунок 4.8 – Теплова карта концентрації фосфатів

Теплова карта нітратів наведено на рисунку 4.9.

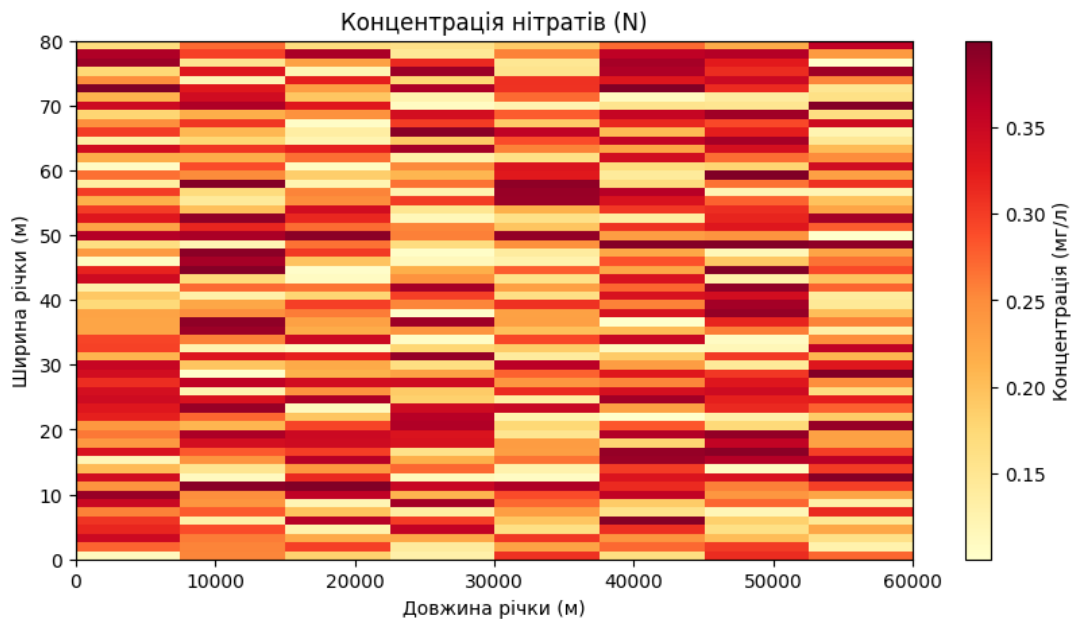


Рисунок 4.9 – Теплова карта концентрації нітратів

Концентрація нітратів варіюється від 0,15 мг/л до 0,35 мг/л, що відображено в кольоровій шкалі праворуч. Карта демонструє різноманітні горизонтальні та вертикальні зони з підвищеною та зниженою концентрацією нітратів. У ділянці між 40,000-60,000 м можна помітити підвищені значення, які, ймовірно,

відображають задані у моделі локальні події забруднення. Зміна концентрації корелює зі змінами ширини річки: у ширших ділянках можуть виникати зони накопичення, які зумовлені зниженням швидкості течії.

Концентрація кисню (рисунок 4.10) варіюється від 6,25 мг/л до 7,75 мг/л (згідно з кольоровою шкалою).

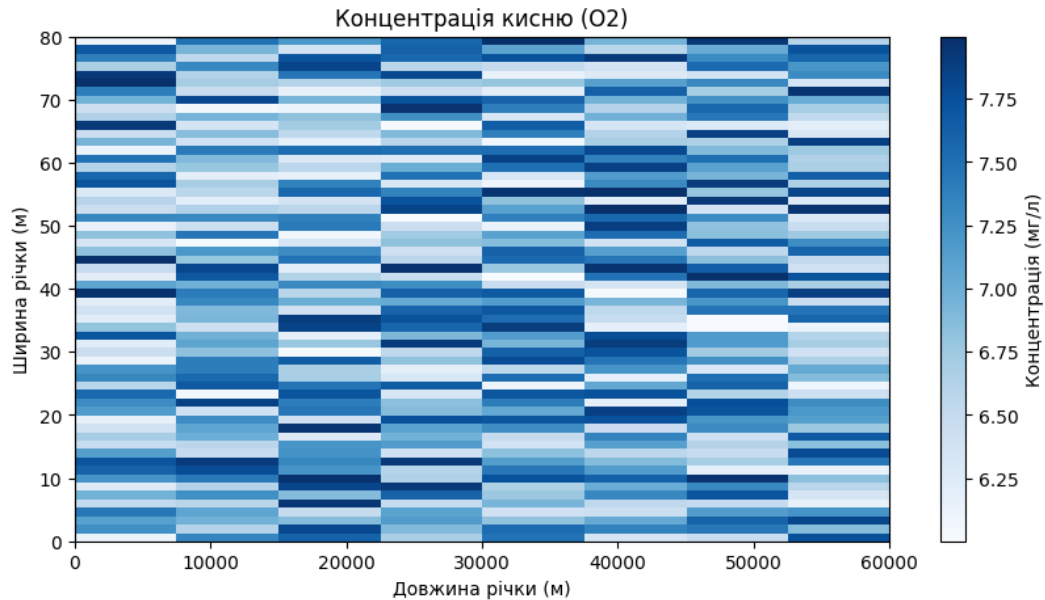


Рисунок 4.10 - Теплова карта концентрації кисню

Нерівномірний розподіл кисню корелює зі змінами ширини річки: ділянки із ширшими секціями можуть накопичувати воду з меншою концентрацією кисню через знижену швидкість течії. Загалом рівень кисню достатньо високий, щоб забезпечувати нормальні екосистемні процеси (понад 5 мг/л). Це позитивний фактор для екологічного стану річки на цьому етапі.

На рисунку 4.11 наведена карта кисневого дефіциту. Карта відображає частоту виникнення дефіциту кисню у річці протягом усього моделювання. Дефіцит кисню є малоймовірним у більшості ділянок річки, оскільки частота не перевищує 10%. Карта показує переважно низькі значення частоти дефіциту, що свідчить про відсутність критичних зон з браком кисню протягом усього періоду моделювання. Низька частота дефіциту вказує на те, що початкові умови кисню і транспортні процеси моделі перебувають у збалансованому стані. Кисневий дефіцит на обраній ділянці річки має низьку ймовірність виникнення,

що є сприятливим для підтримання екологічного балансу.



Рисунок 4.11 – Карта кисневого дефіциту

На рисунку 4.12 наведена карта ризику гіпоксії, яка демонструє частоту зон, де концентрація кисню опускається нижче критичного рівня для підтримання більшості форм життя у воді.

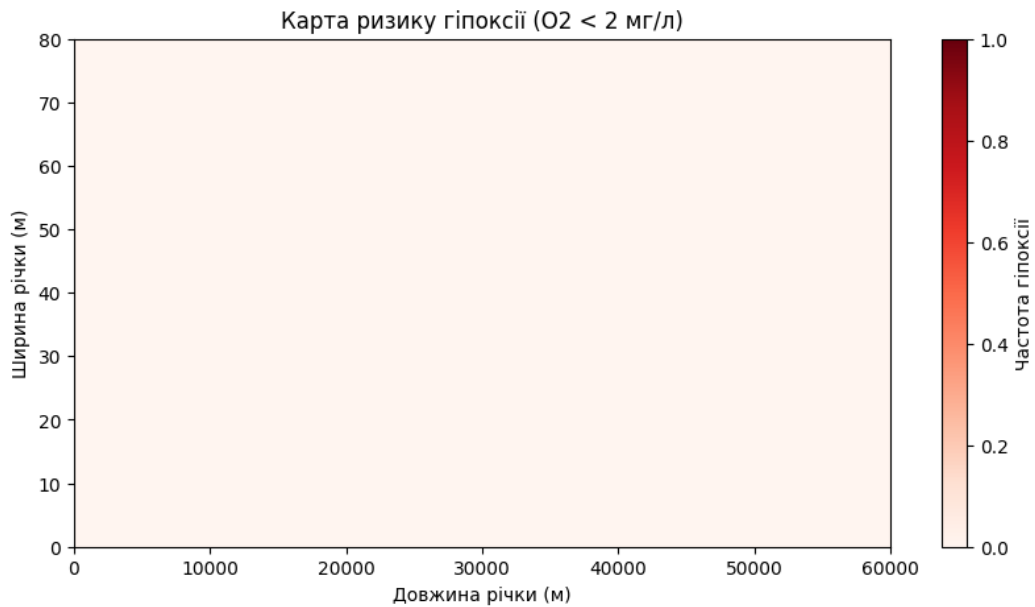


Рисунок 4.12 – Карта ризику гіпоксії

На карті видно, що показник частоти ризику гіпоксії залишається однорідним і близьким до нуля по всій площі. Початкові дані моделі, а також параметри змішування і транспорту забруднювачів вказують на те, що екосистема обраної ділянки має достатню здатність до самоочищення і насичення киснем. Значення карти свідчать про те, що річка знаходиться в сприятливому стані і має високий потенціал для підтримання кисню навіть за умов незначних зовнішніх забруднень.

Графік часової динаміки концентрацій фосфатів (зелена лінія), нітратів (синя лінія) та кисню (червона лінія) у контрольній точці, обраній у середній частині довжини річки наведений на рисунку 4.13.

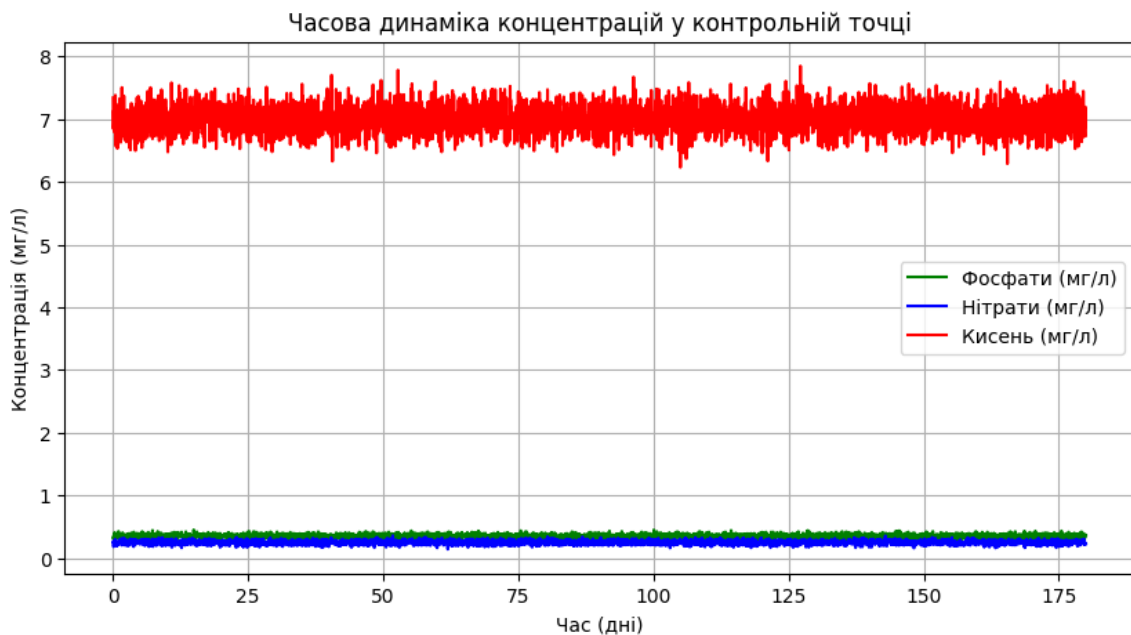


Рисунок 4.13 - Графік часової динаміки концентрацій речовин
у контрольній точці

Концентрація фосфатів стабільно перебуває в діапазоні близько 0,3-0,5 мг/л. Значна варіація не спостерігається, що вказує на стабільність моделі щодо надходження та розсіювання цих речовин. Концентрація нітратів знаходиться в межах 0,1-0,4 мг/л, також із незначними коливаннями. Концентрація розчиненого кисню залишається стабільною на рівні 6,5-8 мг/л протягом усього періоду

модельовання. Рівень кисню вище 5 мг/л демонструє сприятливий екологічний стан, що відповідає умовам, комфортним для водних організмів. Фосфати й нітрати не досягають критичних рівнів, які могли б спричинити серйозні екологічні наслідки, як, наприклад, евтрофікація.

В кінці аналізу на базі зроблених обчислень генерується мапа зон екологічного ризику (рисунок 4.14).

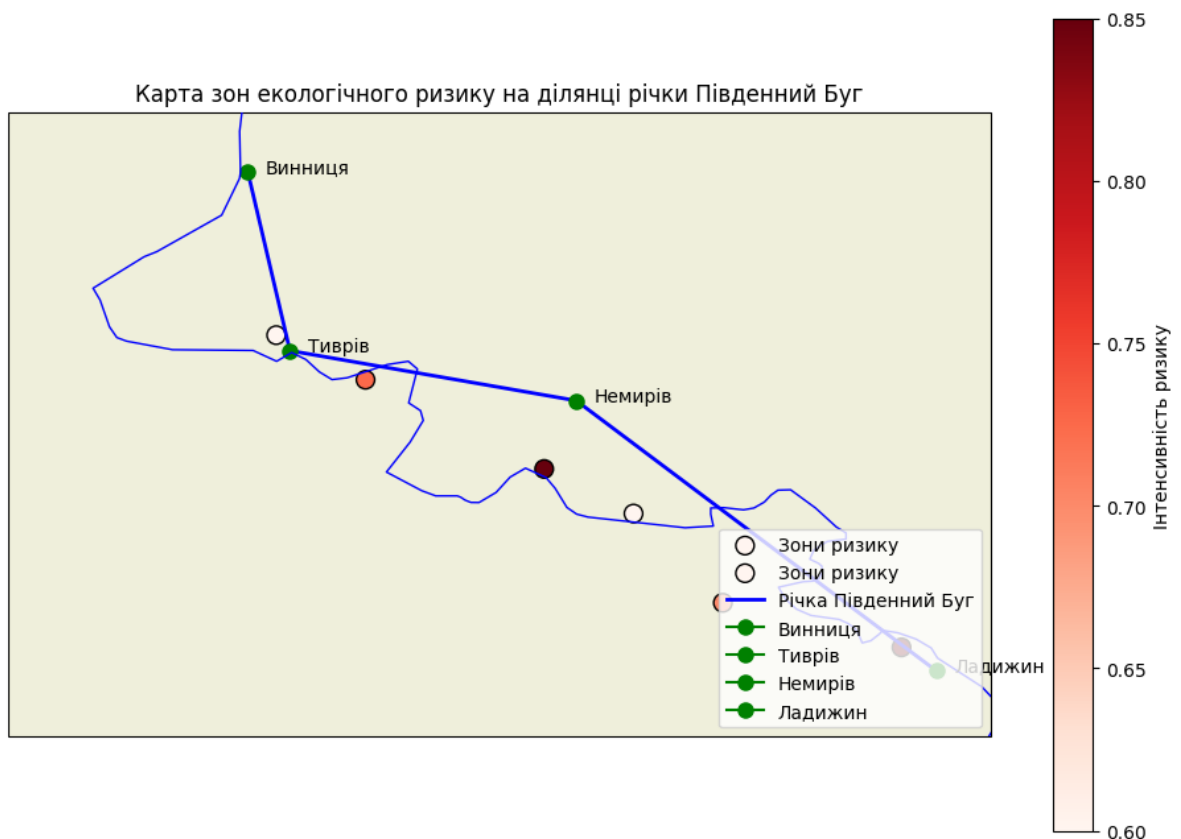


Рисунок 4.14 – Мапа зон екологічного ризику на ділянці річки

Ця інфографіка відображає мапу зон екологічного ризику на ділянці річки Південний Буг. Синя лінія позначає маршрут річки, який проходить через основні населені пункти. Маршрут річки добре видимий і дозволяє зрозуміти, як зони ризику співвідносяться з її географією.

Зони ризику розташовані вздовж річки, і їхня інтенсивність змінюється відносно географічного положення.

Чим темніше червоний колір, тим вища інтенсивність ризику в цій зоні.

Основні міста, через які проходить річка, позначені зеленими точками.

Географічне співвідношення ризиків із населеними пунктами та ділянками річки може бути використане для визначення пріоритетів у моніторингу та заходах з покращення екологічного стану. Карта дозволяє чітко визначити, які ділянки річки мають підвищений екологічний ризик.

Висновки за розділом 4

У розділі наведено результати обчислювального експерименту аналізу та моделювання екологічного стану водних ресурсів у річкових екосистемах.

Для обраної ділянки річки Південний Буг було створено ПЧС, яка використовувалась далі для обчислення гідрологічних та біохімічних процесів за допомогою програмних модулів Python. Був підготовлений сет даних на базі відкритих джерел для ініціалізації даних моделі.

Отримані результати були викладені у вигляді інфографіки (графіків та карт концентрацій) та додатково проаналізовані.

Для побудованого сету даних можна зробити висновок про задовільний екологічний стан ділянки річки на протязі загального часу моделювання.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було розроблено комплексну модель оцінки екологічного стану річкових систем, яка інтегрує гідродинамічні розрахунки, моделювання транспорту забруднювальних речовин та аналіз показників якості води. Реалізація моделі здійснювалася на базі сучасних чисельних методів і програмного забезпечення з використанням мови Python. Такий підхід забезпечив високу точність, гнучкість і масштабованість моделі, що відповідає сучасному рівню наукових і технічних знань у цій галузі. Результати моделювання були протестовані на прикладі ділянки річки Південний Буг, що підтвердило їхню адекватність і ефективність для практичного застосування.

Розроблена модель дозволяє враховувати складні гідродинамічні процеси, транспорт і трансформацію забруднювачів, а також оцінювати екологічні ризики, пов'язані з кисневим дефіцитом і евтрофікацією. Візуалізація результатів у вигляді карт розподілу забруднювачів, зон ризику та часової динаміки дозволяє наочно оцінити стан річкової системи і сприяє її інтеграції в практичний екологічний моніторинг. Отримані дані свідчать про можливість використання моделі для аналізу впливу антропогенних факторів, оцінки ефективності заходів з покращення якості води та прогнозування змін екосистеми.

Результати роботи мають широку сферу застосування. Зокрема, вони можуть бути використані для екологічного моніторингу, розробки рекомендацій для управління водними ресурсами, оцінки ефективності природоохоронних заходів та прогнозування екологічних наслідків впливу антропогенних факторів. Крім того, модель є корисною для наукових досліджень у галузі гідроекології та екологічного менеджменту, забезпечуючи детальний аналіз процесів, що відбуваються у водних об'єктах.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення моделі для врахування сезонних змін клімату, екстремальних погодних явищ, а також дослідження інших річкових систем для перевірки універсальності підходу. Важливим напрямом може стати інтеграція біологічних і соціально-економічних

факторів, що дозволить отримати ще більш точні прогнози та розробити практичні рекомендації для управління водними ресурсами.

Таким чином, виконана робота закладає наукову та методичну базу для подальших досліджень і практичного використання отриманих результатів у сфері екологічного моніторингу й управління водними ресурсами.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ситникова Ю. В., Гурець О. В. Аналіз та моделювання екологічного стану водних ресурсів у річкових екосистемах. *III Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Навчання і викладання: у світі після війни»* (м. Харків, 8 листопада 2024 р.).
2. Системний аналіз якості навколишнього середовища: навчальний посібник / О. Медведєва, В. Кропивний, Т. Мірзак, Я. Немировський. Кропивницький : Центральноукраїнський національний технічний університет, 2021. С. 50–53.
3. Томільцева А. І., Яцик А. В., Мокін В. Б. Екологічні основи управління водними ресурсами: навч.посіб. Київ : Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. 200 с.
4. Liangliang Gao, Daoliang Li. A review of hydrological/water-quality models. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering* 2014, 1(4):267. DOI:10.15302/J-FASE-2014041.
5. Оцінювання стану водних екосистем на основі методів системного аналізу аерокосмічної й наземної інформації / О. Д. Федоровський, Л. М. Зуб, О. В. Томченко [та ін.]. *«Екологічні науки» Науково-практичний журнал*. 2018 4(23). С. 106–111. <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2018-4-23-23>.
6. Modeling and simulating flow phenomenon using Navier-Stokes equation / Hyunjun Min, Jiho Shin, Jaeho Choi, Hohyun Lee. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Rabat, Morocco, April 11-13, 2017. P. 1902–1913.
7. Galina Marusic, Calin Ciufudean. The use of Navier-Stokes equations in modeling water quality in river-type systems. *International journal of mathematical models and methods in applied sciences*. Volume 10, 2016. P. 317–320.
8. Exact analytical solutions for contaminant transport in rivers / Martinus Th. van Genuchten, Feike J. Leij, Todd H. Skaggs, Nobuo Toride [and others] *J. Hydrol. Hydromech.*, 61, 2013, 2, P. 146–160. DOI: 10.2478/johh-2013-0020.

9. Rodica Braniște, Galina Marusic. Mathematical modeling of pollutant transport and dispersion processes in the Dniester River. *Journal of Engineering Science*. Vol. XXVII, no. 4 (2020), P. 151–162 DOI: 10.5281/zenodo.4288309.

10. Python programming language. URL: <https://www.python.org/> (дата звернення: 30.10.2024).

11. Хільчевський В. К. Сучасна характеристика поверхневих водних об'єктів України: водотоки та водойми. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2021. №1.С. 17–24.

12. Державне агентство водних ресурсів України. URL: <https://buvrd.gov.ua/vodni-resursy/> (дата звернення 5.12.2024).

13. План управління річковим басейном Південного Бугу. URL: <https://davr.gov.ua/plan-upravlinnya-richkovim-basejnom-pivdenного-bugu> (дата звернення: 5.12.2024).

14. Мапи басейну Південного Бугу. URL: https://davr.gov.ua/fls18/tu/RBMP_South_Bug/map_sb.pdf (дата звернення: 6.12.2024).

15. Басейнове управління водних ресурсів річки Південний Буг. URL: <https://www.buvrpb.davr.gov.ua/vodni-resursy/hidrohrafichna-merezha> (дата звернення: 10.12.2024).

16. Visicom map. URL: <https://maps.visicom.ua/c/28.82401,48.94866,10?lang=en> (дата звернення: 10.12.2024).

17. Моніторинг та екологічна оцінка водних ресурсів України. URL: <http://monitoring.davr.gov.ua/EcoWaterMon/GDKMap/Index> (дата звернення: 26.12.2024).