МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

БЕЗСОННИЙ ВІТАЛІЙ ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 504.064.36(477):556.53:519.246

НАУКОВО-ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ РІЧКОВОГО БАСЕЙНУ НА ОСНОВІ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНТРОПІЙНОГО ПІДХОДУ

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Суми – 2025

Дисертація є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі екології та природозахисних технологій Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
Пляцук Леонід Дмитрович,
Сумський державний університет Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри екології та природозахисних технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Павличенко Артем Володимирович,
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України,
перший проректор;

доктор технічних наук, професор
Мальований Мирослав Степанович,
Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри екології та збалансованого природокористування

докторка технічних наук, професорка
Юрченко Валентина Олександрівна,
Харківський національний університету міського господарства імені О. М. Бекетова Міністерства освіти і науки України
професорка кафедри інженерної екології міст

Захист дисертації відбудеться 14 травня 2025 року об 11-й год 00 хв на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 в Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Харківська, 116, корп. Ц, ауд. 204.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Харківська, 116, та на сайті спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 за електронною адресою:
https://sumdu.edu.ua/uk/science/science-info/scientific-infrastructure/specialized-council/permanent-specialized-council/102-55-051-04.html

Реферат розісланий 10 квітня 2025 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 О. О. Ляпощенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема забезпечення екологічної безпеки річкових басейнів є критично важливою в контексті реалізації Цілей сталого розвитку ООН (ЦСР), зокрема ЦСР 6 «Чиста вода та санітарія» та ЦСР 12 «Раціональне споживання і виробництво». За даними ООН понад 40 % населення планети страждає від дефіциту води. Доступу до чистої води позбавлені 783 млн жителів планети, більш ніж 1,7 млрд осіб, що мешкають на територіях річкових басейнів, потребують додаткових джерел якісного водопостачання. Річкові басейни України, такі як Дніпро, Дунай, Дністер, Сіверський Донець та інші, є не лише стратегічними джерелами прісної води для питного водопостачання, а й основою для сільськогосподарського, промислового та енергетичного розвитку країни. Проте зростаюче антропогенне навантаження спричиняє серйозні екологічні проблеми, які свідчать про деградацію водних екосистем. Так, понад 30% водних об’єктів України перевищують допустимі норми за концентрацією забруднюючих речовин, таких як азот і фосфор, що викликає евтрофікацію водойм. У басейні Дніпра, основного джерела питної води для населення, рівень біохімічного споживання кисню ($БСК_5$) подекуди перевищує норму у 2-3 рази, що є індикатором значного органічного забруднення. Подібна ситуація спостерігається й у басейні Дністра, де концентрація сульфатів і хлоридів значно зросла за останнє десятиліття, зумовлюючи зменшення біорізноманіття. Наслідки повномасштабного вторгнення росії значно загострили екологічну ситуацію, зокрема через руйнування Каховського водосховища, що спричинило масштабну втрату водних ресурсів, зміну прилеглих екосистем і гідрологічного режиму. Це ускладнило забезпечення питною водою значної частини населення та створило нові виклики для екологічної безпеки регіону. Окрім цього, неконтрольоване використання водних ресурсів для зрошення та промислових потреб призводить до зниження рівня води у ключових водосховищах. Вплив кліматичних змін, включаючи збільшення частоти посух і температурних аномалій, додатково загострює ситуацію, змінюючи гідрологічний режим річок і знижуючи їх здатність до самовідновлення.

Традиційні підходи до управління водними ресурсами, хоча й забезпечують базовий рівень захисту, виявляються недостатньо ефективними у сучасних умовах, коли складність екологічних процесів вимагає інтеграції новітніх методів і технологій, саме тому нагальною стає потреба у розробці інноваційних підходів до управління екологічною безпекою річкових басейнів, здатних враховувати динамічний характер екосистем та багатофакторний вплив антропогенних і природних чинників. Інтеграція інформаційно-ентропійного підходу в управління річковими басейнами, на відміну від традиційних методів, дозволяє більш ефективно кількісно оцінювати екологічний стан річкових систем, аналізуючи рівень невизначеності в річковому басейні. Зокрема, інформаційно-ентропійний аналіз допомагає підвищити інформативність даних моніторингу, ідентифікувати найбільш вразливі ділянки басейну, оптимізувати системи моніторингу водних ресурсів, забезпечуючи максимальну інформативність за мінімізацію технічних та економічних витрат.

Важливість роботи полягає у розробці методології підвищення інформативності моніторингової інформації, оптимізації мереж моніторингу водних ресурсів на основі принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності даних, що сприятиме економічно ефективному управлінню та довгостроковій стійкості річкових басейнів.

Таким чином, актуальність дослідження обумовлена необхідністю вирішення проблеми погіршання екологічного стану річкових басейнів України через впровадження науково обґрунтованих підходів до охорони, відновлення та екологічно стійкого управління водними ресурсами. Результати дослідження сприятимуть досягненню цілей сталого розвитку, зниженню впливу антропогенної діяльності, покращенню якості життя населення та забезпеченню збереження водних екосистем для майбутніх поколінь.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямам розвитку науки і техніки на період до припинення або скасування воєнного стану в Україні (напрямок 5 «раціональне природокористування») затвердженими Законом України №3534-IX від 21.12.2023; Національному плану дій з охорони навколишнього природного середовища на 2023–2025 рр., затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2021 р. № 443-р за такими заходами, як «Забезпечення сталого управління водними ресурсами за басейновим принципом» та «Покращення якості води та управління водними ресурсами, включаючи морське середовище»; Концепції Загальнодержавної цільової соціальної програми "Питна вода України" на 2022–2026 роки, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 28 квітня 2021 р. № 388-р; Водній стратегії України на період до 2050 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 9 грудня 2022 р. № 1134-р; Державній цільовій екологічній програмі проведення моніторингу навколишнього природного середовища, затвердженій Постановою Кабінету Міністрів України від 5 грудня 2007 р. № 1376. Робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри екології та природозахисних технологій Сумського державного університету, пов'язаних із тематикою «Біоенергетичні інновації в рециклінгу відходів та раціональному використанні природних ресурсів» (реєстр. №0222U005212), згідно з науково-технічною програмою Міністерства освіти і науки України. У дисертаційній роботі використані результати досліджень, проведених під час виконання науково-дослідних робіт: «На виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напряму "Математичні науки та природничі науки" Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна», Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, реєстр. №0224U000615; «Розробка системи управління охороною праці на підприємстві», Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, реєстр. №0224U031802; «Розробка рекомендацій у вирішенні сучасних природоохоронних, технологічних, ергономічних та екологічних питань в Україні», Харківський національний економічний

університет імені Семена Кузнеця, реєстр. №0221U105551 у яких автор брав участь як виконавець та керівник роботи.

Мета дослідження. Метою роботи є розробка науково-теоретичних основ управління екологічною безпекою річкового басейну на основі інформаційно-ентропійного підходу, спрямованого на вдосконалення методів оцінки стану водних ресурсів та оптимізації моніторингових систем для забезпечення сталого розвитку та зменшення антропогенного впливу на річковий басейн.

Завдання досліджень. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати теоретичні засади інформаційно-ентропійних підходів у забезпеченні екологічної безпеки та їх застосування для вирішення екологічних проблем водних ресурсів.
- дослідити з ентропійних позицій властивості екологічних систем річкових басейнів, та встановити зв’язок між ентропією і інформаційними процесами, що характеризують динаміку цих систем.
- оцінити антропогенний вплив на екологічну безпеку річкових басейнів, включаючи вплив промислових, сільськогосподарських та інших джерел забруднення.
- розробити методологію визначення ентропійно-зваженої оцінки якості поверхневих водних об’єктів для підвищення точності екологічного моніторингу.
- дослідити динаміку ентропійно-зваженого показника забрудненості поверхневих водних об'єктів у межах річкового басейну та встановити його залежність від умов антропогенного навантаження.
- розробити метод аналізу вразливості водних ресурсів у нестабільному середовищі на основі інформаційно-ентропійного підходу.
- провести оцінку існуючих систем моніторингу якості водних ресурсів в Україні, виявити їх переваги та недоліки.
- здійснити аналіз світового досвіду застосування інформаційно-ентропійних підходів для моніторингу водних ресурсів і визначити можливості їх адаптації до умов річкових басейнів України.
- розробити науково-теоретичний підхід до проєктування, оцінки та оптимізації систем моніторингу якості вод на основі принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації.
- адаптувати розроблену методологію на прикладі оптимізації мережі моніторингу річкового басейну, враховуючи особливості регіонального антропогенного впливу.
- сформулювати рекомендації щодо вибору оптимального набору параметрів для оцінки якості поверхневих вод у межах річкових басейнів, що забезпечує ефективність екологічного моніторингу.

Об’єкт дослідження – процеси управління екологічною безпекою річкових басейнів в умовах антропогенного впливу.

Предмет дослідження – науково-теоретичні засади, методи та інструменти інформаційно-ентропійного підходу до оцінки, моніторингу та

управління екологічною безпекою річкових басейнів.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі було застосовано комплексний системний підхід, що включає як теоретичні, так і експериментальні методи. Дослідження базується на застосуванні теоретичного аналізу, методів математичного моделювання, інформаційно-ентропійного аналізу та статистичного аналізу даних. Проведено ретроспективний аналіз гідрохімічних показників якісного складу води поверхневих водних об’єктів. Використовувались статистично-математичні методи для опрацювання та узагальнення експериментальних даних. Для обробки даних застосовувалися програми MS Excel, QGIS, розроблені в процесі дослідження програмні модулі інтерпретованою об'єктно-орієнтованою мовою програмування високого рівня Python. Гідроаналітичний метод використовувався для детального аналізу конкретних водних об’єктів. Для моделювання гідрохімічних процесів у поверхневих водних об’єктах, особливо для визначення приросту концентрації забруднюючих речовин, застосовувалися методи математичного моделювання, для вивчення та оцінки складних систем поверхневих водних ресурсів як комплексний метод використовувався ентропійно-інформаційний аналіз.

Наукове дослідження базується на даних багаторічного моніторингу водних ресурсів України, опублікованих Державним агентством водних ресурсів України, а також власних експедиційних даних обстежень та вимірювань.

Наукова новизна одержаних результатів. З метою підвищення екологічної безпеки поверхневих водних об’єктів, що можуть використовуватися як об’єкти питного водопостачання, на основі виконаних теоретичних досліджень та експериментальних даних одержано такі наукові результати:

вперше:

- розроблено науково-теоретичні основи застосування інформаційно-ентропійного підходу до підвищення ефективності управління екологічною безпекою річкових басейнів України;
- для підвищення ефективності оцінювання екологічного стану поверхневих водних об’єктів в межах річкового басейну запропоновано науково-методологічний підхід до визначення вагових коефіцієнтів індексу забрудненості води (ІЗВ) на основі застосування принципу максимальної ентропії шляхом розрахунку ентропійно-зваженого індексу забрудненості води (ЕІЗВ), що суттєво підвищує точність оцінки стану водних ресурсів, дозволяє враховувати складність та мінливість водних об’єктів;
- для забезпечення максимальної інформативності мережі моніторингу поверхневих вод річкового басейну та мінімізації надмірності отримуваної інформації запропоновано науково-методологічний підхід до формування оптимальної моніторингової мережі та розроблено алгоритм його реалізації;
- розроблено науково-методологічний підхід та запропоновано алгоритм визначення оптимального набору індикаторів екологічного стану

поверхневих вод на основі принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації, що забезпечить максимальну інформативність даних моніторингу вод;

удосконалено:

- методичні підходи до комплексного оцінювання екологічного стану поверхневих вод річкового басейну, що враховують ентропійні показники для покращеної оцінки стабільності екосистеми;
- методологію оцінки вразливості водних ресурсів у мінливому середовищі на основі ентропійного підходу, що дозволяє враховувати динамічні зміни та підвищує стійкість екосистемного управління;

набули подальшого розвитку:

- науково-теоретичні підходи до оцінки антропогенного впливу на екологічну безпеку річкових басейнів шляхом інтеграції інформаційно-ентропійного аналізу з математичними моделями, що дозволяє кількісно оцінити ступінь впливу, виявити зони ризику та розробити стратегії зменшення негативного впливу.
- методологія візуалізації просторово-часової динаміки стану водних ресурсів на основі ентропійно-зважених індексів шляхом створення інтерактивних карт, що відображають просторову й часову динаміку якості води.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено алгоритми та програмні засоби для розрахунку ЕІЗВ. Запропонована процедура дозволяє отримати більш об'єктивну оцінку стану водних ресурсів, зокрема, з урахуванням ступеня невизначеності або ентропії екосистемних процесів. Цей підхід підвищує точність моніторингу забруднення води, враховуючи складність та варіативність процесів, що відбуваються у водних системах. Алгоритми можуть автоматично обробляти дані, спрощуючи аналіз та інтерпретацію результатів.

2. Побудовано інтерактивні карти просторового розподілу ІЗВ та ЕІЗВ для різних сезонів. Карти дозволяють візуалізувати просторову та часову динаміку забруднення водних ресурсів, що дає можливість швидко і ефективно ідентифікувати критичні зони та сезонні зміни в стані екосистем. Інтерактивність карт дозволяє проводити аналіз різних факторів, що впливають на якість води, та адаптувати управлінські рішення у реальному часі.

3. Розроблено алгоритми та програмні засоби для оптимізації мережі моніторингових постів. Реалізація алгоритму дозволяє знаходити оптимальне розташування пунктів моніторингу на основі принципу максимальної інформативності та мінімальної надмірності інформації, що забезпечує зменшення кількості дублюючих даних і підвищують ефективність збору інформації, що, в свою чергу, сприяє раціональному використанню ресурсів та підвищенню якості моніторингу.

4. Розроблено алгоритми та програмні засоби для вибору оптимального числа параметрів якості води. Алгоритми на основі ентропійного підходу допомагають визначити найважливіші показники для оцінки якості води,

скоротити обсяг даних для аналізу без втрати точності оцінки, що підвищує ефективність моніторингу водних ресурсів, забезпечуючи фокусування на ключових параметрах, які найбільш чітко відображають стан водних систем.

5. Теоретично обґрунтована методологія і методика апробовані на прикладі річок Південний Буг, Дністер та Сіверський Донець. Проведені дослідження та практичні випробування підтвердили ефективність запропонованих підходів для оцінки та управління екологічною безпекою річкових басейнів. Апробація на реальних даних річок України дозволила перевірити адаптивність розроблених методик до різних екосистем і умов, що підкреслює їх практичну значущість для моніторингу та управління водними ресурсами в різних регіонах країни.

6. Розроблені практичні рекомендації щодо застосування ентропійно-зваженого індексу забрудненості води та оптимізації мережі моніторингу впроваджено у діяльність Державної екологічної інспекції у Сумській області (акт впровадження від 16.12.2024 р.). Застосування ентропійного підходу надало інструменти для більш об'єктивної оцінки забруднення вод, виявлення критичних зон та оптимізації пунктів моніторингу, що сприяє підвищенню ефективності управління екологічною безпекою і своєчасному реагуванню на негативні зміни у водних екосистемах.

7. Розроблено практичні рекомендації щодо підвищення точності оцінки стану водних ресурсів, що дозволяє враховувати складність та мінливість водних об’єктів на базі ТОВ «Глобал-трафік ЛПГ» (акт впровадження від 25.11.2024 р.) та ТОВ «Рітейл ЛПГ» (довідка про впровадження від 10.12.2024 р.).

8. Основні положення та науково-теоретичні результати дисертаційного дослідження інформаційно-ентропійного підходу управління екологічною безпекою річкового басейну впроваджено у навчальний процес: кафедри екології та природозахисних технологій Сумського державного університету (акт впровадження від 10.09.2024 р.) під час викладання дисциплін «Моніторинг довкілля», «Основи технологій захисту навколишнього середовища», для здобувачів вищої освіти спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища»; кафедри здорового способу життя, технологій і безпеки життєдіяльності Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця (довідка про впровадження №24/86-14-05 від 02.01.2024 р.) під час викладання дисциплін «Екологія», «Екологія людини» для здобувачів усіх спеціальностей.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізуванні стану проблеми, обґрунтуванні ідеї роботи та її реалізації шляхом постановки мети і завдань дослідження, узагальнення і впровадження результатів досліджень та розроблення рекомендацій щодо їх використання, розробленні методик експериментальних досліджень і їх проведенні, підборі та адаптації до умов експериментів методик аналізу, аналізуванні термодинамічних процесів у річкових басейнах [23, 24]; дослідженні та аналізі закономірностей забруднення поверхневих водних об’єктів [3, 11, 13]; інтегральній оцінці та виборі індикативних показників екологічного стану вод [1, 8, 22, 25]; вдосконаленні

методики моніторингу поверхневих вод [5]; оцінці екологічного ризику для поверхневих водних об'єктів [6, 7, 9, 21, 26]; а також розробленні та апробації нової методології інформаційно-ентропійного аналізу і впровадженні ентропійно-зваженої оцінки якості поверхневих вод [12, 15, 16, 20].

Вищезазначена нумерація робіт, виконаних у співавторстві, відповідає списку праць дисертанта, наведеному в рефераті.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати роботи доповідалися та обговорювалися на таких науково-технічних, науково-практичних конференціях і семінарах всеукраїнського й міжнародного рівнів: IX International Scientific and Practical Conference "*International Trends in Science and Technology" (*Warsaw, Poland. January 31, 2019); Міжнародна науково-практична конференція *«Інформаційні технології та системи» (м. Харків,* 10–11 квітня 2019 р.); IX міжнародна науково-технічна конференція *"Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління"* (Баку–Харків–Жиліна, 11–12 квітня 2019 р.); Науковий круглий стіл та II всеукраїнська науково-практична конференція (м. Харків, 26 квітня 2019 р.); XVII Міжнародна науково-методична конференція "*Безпека життя і діяльності людини – освіта, наука, практика" (м.* Рівне, 18–19 квітня 2019 р.); I Міжнародна науково-практична конференція "*VinSmartEco"* (м.Вінниця, 16–18 травня 2019 р.); Міжнародна науково-практична конференція *"Державне управління у сфері цивільного захисту*: наука, освіта, практика" (м.Харків, 17–18 травня 2019 р.); 18 Міжнародна науково-практична конференція "*Ресурси природних вод карпатського регіону. Проблеми охорони та раціонального використання"* (м. Львів, 23–24 травня 2019 р.); III спеціалізований міжнародний Запорізький екологічний форум "*Еко Форум–2019" (м.* Запоріжжя, 29–31 травня 2019 р.); XIII Міжнародна науково-технічна конференція "*Проблеми екології та енергозбереження" (*м. Миколаїв, 20–22 вересня 2019 р.); XVII міжнародна науково-технічна конференція "*Проблеми екологічної безпеки" (м.* Кременчук, 2–4 жовтня 2019 р.); Всеукраїнська наукова конференція "*Четверті Сумські наукові географічні читання" (м.* Суми, 11–13 жовтня 2019 р.); Міжнародна науково-практична конференція "*Регіон–2019: стратегія оптимального розвитку"*, (м. Харків, 16–17 жовтня 2019 р.); XV всеукраїнські наукові Таліївських читання *"Охорона довкілля" (м.* Харків, 30 жовтня 2019 р.); IX Всеукраїнська науково-практична Інтернет-конференція "*Техногенно-екологічна безпека України: стан та перспективи розвитку.* ТЕБ-2019" (м. Ірпінь, 04-15 листопада 2019 р.); III Міжнародна науково-практична конференція *"Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки"* (м. Київ, 14–15 листопада 2019 р.); 10-а науково-технічна конференція "*Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління (*Баку–Харків–Жиліна, 9–10 квітня 2020 р.); VII Всеукраїнська науково-технічна конференція "*Сучасні технології у промисловому виробництві"* (м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.); 9th International scientific and practical conference "*Perspectives of world science and education"* (Osaka, Japan. may 20–22, 2020); II Всеукраїнська наукова конференція

"*Актуальні питання техногенної та цивільної безпеки України"* (м. Миколаїв, 18 –19 вересня 2020 р.); XVIII міжнародна науково-технічна конференція "*Проблеми екологічної безпеки"* (м. Кременчук, 6–8 жовтня 2020 р.); V науково-практична конференція "*Економічний розвиток і спадщина Семена Кузнеця" (м.* Харків, 26–27 листопада 2020 р.); I Міжнародна інтернет-конференція "*Екологічна безпека – сучасні напрямки та перспективи вищої освіти"* (м. Харків, 25 лютого 2021 р.); V Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих науковців "*Актуальні проблеми сучасної хімії*" (м. Миколаїв, 21 травня 2021 р.); IX Міжнародна наукова конференція молодих вчених "*Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування" (*м. Харків, 25–26 листопада 2021 р.); II Міжнародна науково-практична конференція, присвяченої 203-річчю Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» "Екологія. Довкілля. Енергозбереження" (м. Полтава, 2–3 грудня 2021 р.); II Всеукраїнська заочна наукова конференція "*Освітні та наукові виміри природничих наук"* (м. Суми, 8 грудня 2021 р.); II Міжнародна інтернет-конференція "*Сучасні проблеми екологічного контролю та аудиту"* (м. Харків, 23 лютого 2022 р.); IV Всеукраїнська науково-практична конференція "*Актуальні проблеми та перспективи розвитку охорони праці, безпеки життєдіяльності та цивільного захисту"* (м. Одеса, 5–6 травня 2022 р.); XVIII Всеукраїнські наукові Таліївські читання "*Охорона довкілля"* (м. Харків, 20 жовтня 2022 р.); IV Міжнародна науково-практична конференція "*Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки"* (м. Київ, 25-26 жовтня 2022 р.); 16th International Conference "*Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment" (*Kyiv, Ukraine, November 15–18, 2022); Міжнародна науково-практична конференція "*Environment recovery and reconstruction: War context 2022"* (м. Полтава,17–18 листопада 2022 р.); VIII Міжнародний молодіжний конгрес "*Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування"* (м. Львів, 02–03 березня 2023 р.); Міжнародна науково-практична конференція молодих учених "*Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту"* (м. Харків, 20–21 квітня 2023 р.); *6th International scientific and practical conference* "*Progressive research in the modern world"* (Boston, USA. 2–4 march 2023); XXV Міжнародна науково-практична конференція "*Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво – 2023"* (м. Харків, 27–28 квітня 2023 р.). V Всеукраїнської науково-практичної конференція "*Актуальні проблеми та перспективи розвитку охорони праці, безпеки життєдіяльності та цивільного захисту"* (м. Одеса, 4–5 травня 2023 р.); I Міжнародної науково-практичної конференції "*Екологічні проблеми сучасності"* (м. Луцьк, 10 травня 2023 р.); Всеукраїнська науково-практична конференція науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти "*Природно–ресурсний комплекс Західного Полісся в контексті сталого розвитку"* (м. Березне, 16–17 травня 2023 р); X Міжнародної наукової конференції "*Актуальні проблеми дослідження довкілля"* (Суми-

Тростянець, 25-27 травня 2023 р.); Всеукраїнська науково-практична конференція "*Актуальні проблеми та перспективи розвитку фундаментальних, прикладних, загальнотехнічних та безпекових наук"* (м. Київ, 21 червня 2023 р.); V Міжнародна науково-практична інтернет-конференція "*Integration of education, science and business in modern Environment: summer debates*" (м. Дніпро, 3–4 серпня 2023 р.); Міжнародна науково-практична конференція за участю молодих науковців "*Галузеві проблеми екологічної безпеки – 2023" (м.* Харків, 26 жовтня 2023 р.); XIX Всеукраїнські наукові Таліївські читання "*Охорона довкілля"* (м. Харків, 27 жовтня 2023 р.); 17th International Conference "*Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"* (Kyiv, Ukraine, 7–10 November 2023); XI міжнародна науково-технічна конференція "*Проблеми інформатизації" (*Баку–Харків–Бельсько-Бяла, 16–17 листопада 2023 р.); IV Міжнародна науково-практична конференція "Екологія. Довкілля. Енергозбереження" (м. Полтава, 7–8 грудня 2023 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 60 наукових праць, з яких: 1 авторська монографія, 1 колективна монографія, 19 статей у наукових фахових виданнях із переліку МОН України категорії «Б», 7 статей у зарубіжних наукових періодичних виданнях та у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних (Scopus та Web of Science), 32 – матеріали доповідей у збірниках праць конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 405 найменувань на 45 сторінках, та 10 додатків на 52 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 437 сторінок, з яких основного тексту – 296 сторінок, робота містить 94 рисунки та 20 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми та наукової проблеми, сформульовані мета та завдання досліджень, наведені основні наукові положення і практична цінність одержаних результатів, дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації, структуру та обсяг роботи тощо.

У першому розділі проаналізовано літературні джерела і розглянуто науково-теоретичні основи управління екологічною безпекою річкових басейнів на основі інформаційно-ентропійного підходу в контексті досягнення Цілей сталого розвитку, зокрема, особлива увага приділена таким цілям, як ЦСР 6 «Чиста вода та санітарія» та ЦСР 12 «Раціональне споживання і виробництво», що визначають важливість інтегрованого підходу до управління водними ресурсами з акцентом на їх екологічну стійкість.

Питанням вирішення проблеми управління екологічною безпекою на рівні річкового басейну та інтегрованого управління водними ресурсами присвятили свої наукові праці такі українські та зарубіжні учені як: Р. В. Пономаренко, І. Л. Головинський, Є. Д. Гопченко, А. В. Гриценко, І. О.

Єременко, М. Р. Забокрицька, С.М. Маджд, В. І. Осадчий, В. А. Сташук, М. А. Хвесик, В. К. Хільчевський, О. В. Яроцька, F. Cavalcante, M. Falkenmark, I. Moss, Liu Wei-Hong та ін. Аналіз теоретичних засад управління річковими басейнами проведено через призму еволюції наукових підходів: від інженерних методів стародавніх цивілізацій до сучасних інтегрованих підходів, які враховують екологічні, соціально-економічні та інформаційні аспекти. Значна увага приділена концепції інтегрованого управління водними ресурсами (ІУВР), яка розглядає річковий басейн як єдину екосистему. Важливою складовою цього є підхід до екологічного управління через впровадження інформаційно-ентропійного аналізу, що дозволяє оцінювати стійкість річкових систем до антропогенного впливу та прогнозувати зміни у водних екосистемах. Ентропія, як міра невизначеності або дезорганізації – характеризує стан екосистеми, зростання ентропії свідчить про втрату стабільності річкової системи під впливом забруднень або інших зовнішніх факторів. Використання інформаційно-ентропійного підходу сприяє більш об’єктивній оцінці екологічного стану річкових басейнів, виявленню критичних зон та розробці ефективних управлінських рішень для підтримки стійкості екосистем. Інформаційно-ентропійний підхід в управлінні річковими басейнами передбачає використання інформаційних технологій для збору даних і моделювання процесів в екосистемах. Сучасні екологічні дослідження активно використовують інформаційно-ентропійні підходи для вивчення відкритих систем, якими є річкові басейни.

Перевага інформаційно-ентропійного підходу полягає в тому, що систему моніторингу вод можна оцінити або спроектувати на основі інформації, яку мережа контролює. Це може відрізнятися від заданої щільності станцій, запропонованої в керівних нормативних документах. Мережа може бути краще пристосована до конкретного використання або оптимізована для забезпечення найбільшої ефективності при щільності, нижчій від тієї, що пропонуються в нормативних рекомендаціях. Крім того, у поєднанні з методами багатоцільової оптимізації в оптимальний процес проектування мережі можна включити специфічні критерії водокористувачів. У літературних джерелах описується багато нових підходів до проектування ентропії та еволюції концепцій, але ретельні порівняння мають вирішальне значення для надання загальних рекомендацій для проектування мережі. Окрему увагу приділено класифікації застосувань інформаційної ентропії у проєктах систем моніторингу, включаючи опади, стік, рівень води, вологість ґрунту та стан підземних вод. Перевага таких підходів полягає в гнучкості системи моніторингу, яка може бути адаптована до конкретних потреб або оптимізована для досягнення максимальної ефективності. На основі аналізу сучасної наукової літератури, практичних досягнень і виявлених недоліків, обґрунтовано необхідність розробки науково-теоретичних засад для управління екологічною безпекою річкових басейнів, що базуються на інформаційно-ентропійному підході. Ці засади спрямовані на забезпечення стійкості водних ресурсів, підвищення

ефективності управління і досягнення цілей сталого розвитку у сфері охорони водних екосистем.

У другому розділі розглянуті об’єкт і методи досліджень, здійснена організація структури проведення теоретичних та експериментальних досліджень. Системний аналіз є одним із напрямків системного підходу. Розв’язування задач системного аналізу досліджуваної проблеми проводили за наведеною на рисунку 1 схемою алгоритму. На рисунку 2 наведені етапи системного аналізу для розв’язання задачі щодо підвищення ефективності управління екологічною безпекою річкового басейну та підвищення інформативності системи моніторингу.

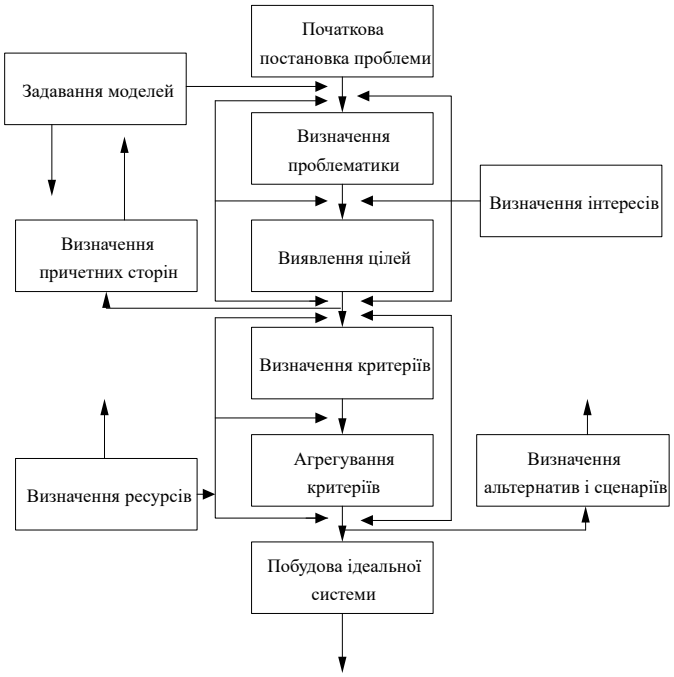


Рисунок 1 – Узагальнений алгоритм розв’язання задач системного дослідження конкретної проблеми

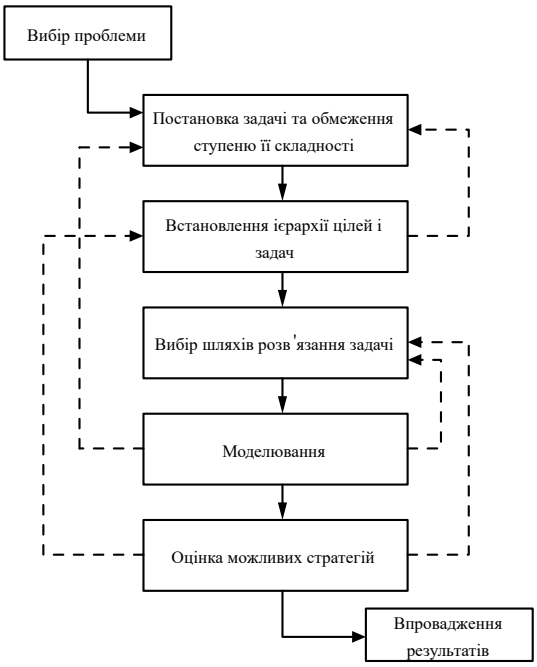


Рисунок 2 – Принципова схема системного аналізу для вирішення поставлених завдань дослідження

Об'єктом дослідження є управління екологічною безпекою водних ресурсів України, що включає підвищення інформативності оцінок (індексів) якості води, оптимізацію мережі моніторингу вод та кількості параметрів якості води з метою підвищення інформативності та мінімізації надмірності отримуваної інформації.

Термін ентропія в теорії інформації описує кількість інформаційного вмісту у випадковій величині. Інформація про подію, що сталася, обернено пропорційна її ймовірності, $1/p$. Сума інформації від кожної окремої події не дорівнює інформації від спільної події, тобто:

$$\frac{1}{p_A p_B} \neq \frac{1}{p_A} + \frac{1}{p_{|B}}. \quad (1)$$

Перехід, який зробить обидві частини рівняння (1) рівними, є логарифм, який можна записати так:

$$\log\frac{1}{p_A p_B} = \log\frac{1}{p_A} + \log\frac{1}{p_{|B}} = -\log p_A - \log p_b. \qquad (2)$$

Невизначеність події з імовірністю p дорівнює $-\log p$, що стало основою інформаційної ентропії – міри невизначеності або випадковості в системі, яка розраховується наступним чином:

$$H = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i \qquad (3)$$

де p_i – ймовірність i-го стану системи, n – кількість можливих станів.

Ентропія оцінює розподіл і різноманітність хімічних елементів та забруднювачів у воді, що дозволяє визначити екологічний баланс водойми. ЕІЗВ, який включає показники, такі як рівні розчинених речовин, біохімічне споживання кисню та pH. Вага кожного показника залежить від його внеску у загальну ентропію системи: чим більша варіабельність, тим більша вага.

Розробка ЕІЗВ передбачає наступні етапи:

Перший крок передбачає побудову вихідної матриці проб води і оцінюваних параметрів (4).

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \qquad (4)$$

де x_{ij} - концентрація i-ї речовини для j-го створу, мг/дм^3.

Другий крок передбачає побудову нормованої матриці, що містить нормовані значення кожного оцінюваного параметра в конкретному зразку з метою усунення похибок, викликаних різними розмірами і одиницями виміру.

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mn} \end{bmatrix} \qquad (5)$$

де y_{ij} – нормоване значення i-ї речовини для j-го створу.

Нормоване значення параметру якості води знаходимо за виразом (6):

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \qquad (6)$$

Нормоване значення параметру якості води для розчиненого у воді кисню знаходимо за виразом (7):

$$y_{ij} = \frac{\left(x_{ij}\right)_{\max} - x_{ij}}{\left(x_{ij}\right)_{\max} - \left(x_{ij}\right)_{\min}} \tag{7}$$

Третій крок передбачає обчислення інформаційної ентропії (E) кожного оцінюваного параметра за формулою (8):

$$E_n = -\left(\frac{1}{\ln n}\right)\sum_{i=1}^{m} V_{ij} \ln V_{ij} \tag{8}$$

де n – кількість точок відбору проб, а

V_{ij} – ймовірність появи нормалізованого значення (v_{ij}) оцінюваного параметра j у i-й вибірці, що визначається наступним чином:

$$V_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sum v_{ij}} . \tag{9}$$

Четвертий крок включає обчислення ентропійних ваг (W), щоб параметрам з нижчою ентропією або мірою безпорядку присвоювалася таким чином більша вага:

$$W_j = \left(1 - E_j\right) \Big/ \sum_{j=1}^{t}\left(1 - E_j\right). \tag{10}$$

Параметрам з меншою ентропією присвоюється більша вага, оскільки вони вказують на наявність більш структурованої системи, яка є більш організованою і менш випадковою, а тому може бути більш інформативною для оцінки якості води.

Нарешті, агрегація ваг ентропії та шкали оцінки якості в індекс ЕІЗВ виражається наступним чином:

$$\text{ЕІЗВ} = \sum_{j=1}^{n} W_j U_j, \tag{11}$$

де ЕІЗВ – ентропійнозважений індекс якості води;

U_j для кожного параметра задається як відношення контрольованого значення j-го параметра (I_j) до його стандартного значення (S_j):

$$U_j = \left(\frac{I_j}{S_j}\right). \tag{12}$$

Якість води визначається за сімома класами: від «дуже чиста» до «надзвичайно брудна».

Оптимізація кількості пунктів спостереження мережі моніторингу поверхневих вод та вибіру оптимального набору показників еколоігчного стану води здійснюється на основі критерію максимуму інформативності при мінімальній надмірності інформації (МІМН). Основна концепція підходу МІМН

полягає у виборі набору параметрів, здатного: 1) максимізувати весь інформаційний вміст (спільна інформація), 2) максимізувати всю здатність передачі інформації (трансінформація) і 3) мінімізувати надлишкову інформацію (загальна кореляція).

У третьому розділі розроблено науково-методологічні основи до управління екологічною безпекою річкового басейну на основі інформаційно-ентропійного підходу. Застосування інформаційно-ентропійного аналізу є перспективним підходом до забезпечення екологічної безпеки, який дозволяє кількісно оцінити рівень невизначеності в екологічних системах. Ентропія, як міра невизначеності, широко використовується в теорії інформації та статистиці, що дозволяє адаптувати її до завдань моніторингу та управління водними ресурсами.

Різні окремі визначення ентропії залежать від вибору вихідної множини Ω , розбиття ξ і ймовірнісної міри ν .

Найпростіший приклад такого вибору – ентропія кінцевої імовірнісної схеми

$$A = \begin{pmatrix} A_1 A_2 \dots A_N \\ P_1 P_2 \dots P_N \end{pmatrix} \tag{13}$$

де $A_1 A_2 \dots A_N$ - повна множина (випадкових) подій; $P_1 P_2 \dots P_N$ - відповідні їм ймовірності . Ентропія кінцевої імовірнісної схеми визначається виразом

$$H = -k \sum_i P_i \log P_i. \tag{14}$$

Принцип максимальної ентропії (ПМЕ) стверджує, що з усіх можливих розподілів, які задовольняють заданим обмеженням, слід вибрати той, який максимізує ентропію. У контексті оцінки якості вод, це означає вибір розподілу параметрів якості води, який є найбільш нейтральним або непристрастним відносно недостатньої інформації.

У сфері оцінки якості вод та управління водними ресурсами, ПМЕ може використовуватися для визначення найбільш ймовірного розподілу забруднюючих речовин або параметрів якості води на основі обмеженої кількості зразків або даних; моделювання та прогнозування змін у якості води та її впливу на екосистеми з урахуванням невизначеності та неповноти даних; управління ризиками забруднення водойм, виходячи з максимальної ентропії розподілів, що дозволяє краще розуміти потенційні загрози та планувати заходи з мінімізації ризиків.

Принцип МІМН відіграє ключову роль у оптимізації систем моніторингу, особливо в контексті поверхневих вод. Цей принцип заснований на ідеї максимізації важливої інформації, отриманої з даних, при одночасній мінімізації повторюваної або нерелевантної інформації. Це дозволяє зробити процес моніторингу більш ефективним та економічним.

Принцип максимальної інформативності означає вибір таких даних для аналізу, які найбільш повно відображають потрібні характеристики моніторингового об'єкта, з мінімальною кількістю дублюючої або несуттєвої інформації.

При застосуванні цього принципу до моніторингу поверхневих вод, вибір локацій для вимірювань, частоти збору даних і типів параметрів води для аналізу повинен здійснюватись на основі їх інформативності. Це означає, що замість створення густої мережі моніторингу з великою кількістю станцій спостереження, що часто збирають однотипну інформацію, слід зосередитись на стратегічному розміщенні моніторингових станцій та виборі параметрів, які найбільше впливають на оцінку стану водних об'єктів.

Оптимізація мережі моніторингу за допомогою цього принципу включає аналіз великих даних, моделювання екосистем і застосування алгоритмів машинного навчання для ідентифікації "гарячих точок" з високою екологічною значимістю або ризиком забруднення.

Передбачається, що для кожної потенційної станції-кандидата $X_1, X_2, X_3, ..., X_N$. є кілька років записів про досліджувану змінну X (параметри якості води). S – набір уже вибраних для мережі моніторингових постів, а його елементи - X_{S1}, $X_{S2}, X_{S3}, ..., X_{Sk}, X_{S1}, X_{S2}, ..., X_{Sk}$, де S_i може бути 1, 2, ... , k.

F – набір станцій-кандидатів які необхідно вибрати, і його елементи – X_{F1}, X_{F2}, X_{F3} , ..., X_{Fm}, де F_i може бути 1, 2, ... , m або лише деяким із них. Сума k і m дорівнює N, загальній кількості потенційних станцій-кандидатів. Обсяг ефективної інформації, що зберігається S, можна моделювати в термінах спільної ентропії та трансінформації як

$$H\left(X_{S_1}, X_{S_2}, \dots, X_{S_k}\right) + \sum_{i=1}^{m} T\left(X_{S_1:S_k};\ X_{F_i}\right) \tag{15}$$

де $X_{S_1:S_k}$ – об’єднаний часовий ряд $X_{S_1}, X_{S_2}, X_{S_3}, \ \dots\ , X_{S_K}$ такий, що його гранична ентропія є такою ж, як багатовимірна спільна ентропія $X_{S_1}, X_{S_2}, X_{S_3}, \ \dots\ , X_{S_K}$., тобто об'єднана змінна $X_{S_{1:}\,S_K}$ містить таку саму кількість інформації, яку зберігають усі її окремі члени $X_{S_1}, X_{S_2}, X_{S_3}, \ \dots\ , X_{S_K}$.

Ефективна інформація складається з двох частин. Перша частина – це спільна ентропія вибраних станцій, що вимірює загальну, але не дубльовану кількість інформації, яку можна отримати від вибраних станцій. Друга частина – це підсумовування переданої інформації з групи вже вибраних станцій до кожної окремої станції, яка все ще знаходиться, відповідно, в наборі кандидатів.

Інформативна гідрометрична мережа повинна надавати якомога більше інформації і водночас максимально обмежувати надлишкову інформацію. Цей вид максимальної інформації та мінімальної надлишкової мережі визначимо як:

$$\begin{cases} \max : H(X_{S_1}, X_{S_2}, \ \dots\ , X_{S_K}) + \sum_{i=1}^{m} T\,(X_{S_1:S_K};\ X_{F_i}) \\ \min : C(X_{S_1}, X_{S_2}, \ \dots\ , X_{S_K}) \end{cases} \tag{16}$$

Або

$$\begin{cases} \max : H(X_{S_1}, X_{S_2}, \ \dots, X_{S_K}) + \sum_{i=1}^{m} T\,(X_{S_1:S_K};\ X_{F_m}) \\ \min : C(X_{S_1}, X_{S_2}, \ \dots, X_{S_K}) \end{cases} \tag{17}$$

Це являє собою багатоцільову задачу оптимізації, яка зводиться до єдиної цільової задачі оптимізації, оскільки, як ефективна інформаційна частина, так і надлишкова частина мають одну і ту ж одиницю вимірювання. Таким чином, обидві цілі об'єднуємо:

$$Max:\ w_1\left[H(X_{S_1}, X_{S_2}, \ \dots, X_{S_K}) + \sum_{i=1}^{m} T\,(X_{S_1:S_K};\ X_{F_i:F_m})\right] - \\ - w_2 C(X_{S_1}, X_{S_2}, \ \dots, X_{S_K}) \tag{18}$$

де w_1 і w_2, сума яких дорівнює 1, є інформаційною вагою та вагою надлишковості відповідно, оскільки інколи особа, яка приймає рішення, потребує компромісу між інформативністю та надлишковістю моніторингової мережі.

Уніфікуємо цілі інформації та надлишковості як

$$\max : \frac{H(X_{S_1}, X_{S_2}, \ \dots, X_{S_K}) + \sum_{i=1:1}^{m} T(X_{S_1:S_K}; X_{F_i})}{wC(X_{S_1}, X_{S_2}, \ \dots, X_{S_K})} \tag{19}$$

де w — коефіцієнт компромісу між інформаційною здатністю та надмірністю мережі.

Використовуючи критерій МІМН, процедура вибору проекту моніторингової мережі передбачає наступні кроки:

1. Зібрати дані екологічної змінної, що представляє інтерес, на кожному кандидатському посту;
2. Дискретизувати дані безперервного часового ряду за рівнянням у разі необхідності;
3. Ініціалізувати оптимальний набір *S* як порожній набір, а набір-кандидат *F* як такий, що містить усі станції-кандидати;
4. Визначити центральний пост як пост з максимальною граничною ентропією серед усіх кандидатів;
5. Оновити набори *S* і *F*;
6. Вибрати наступну оптимальну станцію *F* за критерієм МІМН. На цьому етапі всі станції *F* скануються послідовно для пошуку однієї, яка задовольняє рівняння (19);
7. Повторювати кроки 5 і 6 по черзі, доки не буде вибрано очікувану кількість постів.

Збіжність вибору може бути визначена відношенням спільної ентропії вибраних постів до ентропії всіх кандидатів. Якщо співвідношення перевищує порогове значення, наприклад 0.90, вибір припиняється. Якщо порогове значення не вказано, усі пости-кандидати будуть ранжовані в порядку зменшення пріоритетності.

У четвертому розділі проведено оцінку антропогенного впливу на екологічну безпеку річкових басейнів. Водні об'єкти зазнають значного антропогенного навантаження у вигляді хімічного, мікробного, радіонуклідного забруднення та шкідливого біологічного і фізичного впливу.

Для оцінки тенденцій зміни екологічного стану аналізувалися набір даних державного моніторингу поверхневих вод, що містить первинну інформацію (дані спостережень) державного моніторингу поверхневих вод за період 2003 – 2023 рр. Дані представлені в розрізі постів моніторингу й дат відбору проб. Оскільки поверхневі води використовуються як джерела централізованого питного водопостачання, то в якості нормативних значень для порівняння використовувався ДСТУ 4808:2007 Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання.

У кожному басейні показники хлору, азоту та фосфору відносять якість води до 4-го класу, а найгірша ситуація в середньому по басейну в річках Причорномор'я та Приазов'я. Для виявлення можливих тенденцій у динаміці показників якості води проаналізовано багаторічну їх багаторічну динаміку для басейнів річок Причорномор'я та Дніпра (графіки на рис 3 – 6).

Для річок Причорномор'я є характерною загальна тенденція до зростання середнього рівня БСК$_5$ з 2000 по 2006 рік. З 2006 по 2011 рік спостерігається зменшення середнього рівня БСК$_5$, після чого наступає період коливань з кількома вираженими піками, особливо близько 2010 та 2020 років, де середні значення БСК$_5$ піднімаються вище 20 мгО$_2$/дм^3. Після піку близько 2020 року, знову спостерігається різке зниження середнього рівня БСК$_5$. Найвищі піки на графіку, які перевищують 20 мгО$_2$/дм^3, вказують на періоди з підвищеним біохімічним споживанням кисню, що може свідчити про підвищену органічну забрудненість води в ці роки (рис. 3).

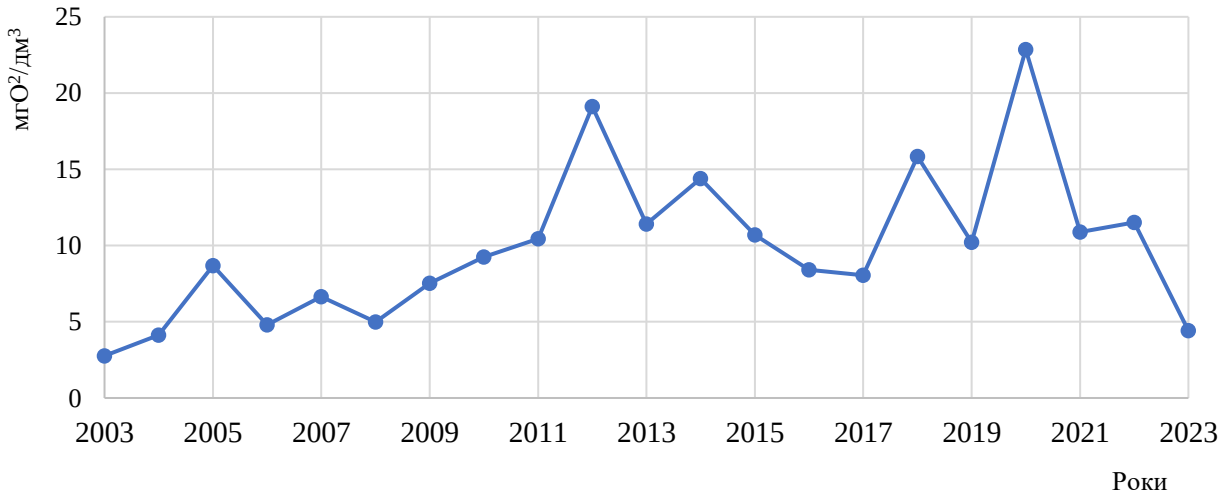


Рисунок 3 – Багаторічна динаміка БСК$_5$ мгО^2/дм^3 в басейні річок Причорномор'я

У 2003 році рівень сульфатів був дуже низьким (близько 200 мг/л або нижче), але потім різко зріс до понад 800 мг/л у наступні роки. Протягом приблизно 2002–2018 років спостерігається відносна стабільність з деякими коливаннями, де середні рівні сульфатів знаходяться переважно у діапазоні від 800 до 1200 мг/л. Виділяється пік у період між 2010 та 2015 роками, де середній рівень сульфатів перевищив 1300 мг/л. Після 2018 року спостерігається тенденція до зростання середнього рівня сульфатів, і ця тенденція триває до кінця представленого періоду (рис. 4).

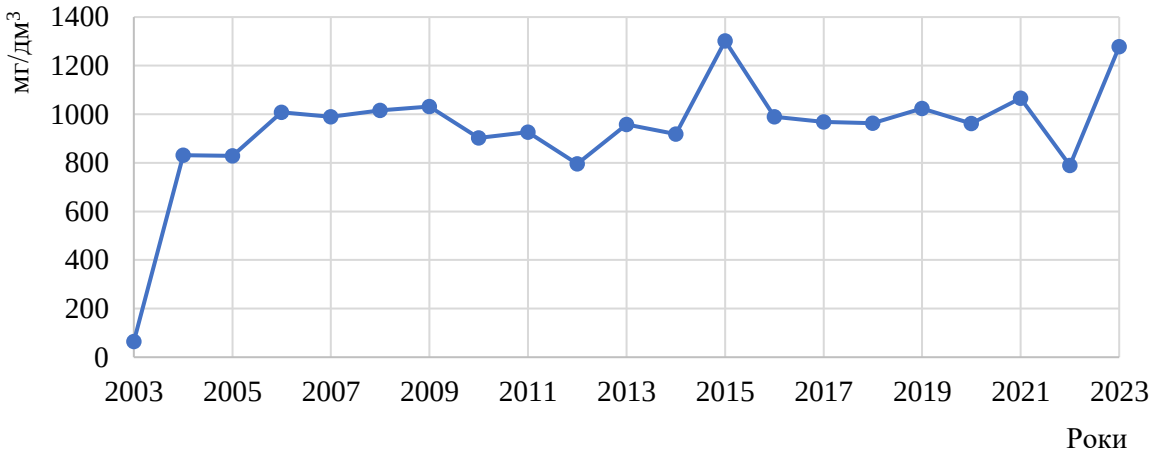


Рисунок 4 – Багаторічна динаміка сульфатів в басейні річок Причорномор’я

У період з 2003 по 2004 рік спостерігається швидке зростання середніх рівнів хлоридів від дуже низьких значень до приблизно 2000 мг/л. Від 2005 до 2010 року рівні хлоридів залишаються відносно стабільними з невеликими коливаннями, перебуваючи більшу частину часу між 2500 і 3000 мг/л. Після 2010 року спостерігається тенденція до зниження середніх рівнів хлоридів, яка триває до 2017 року, де вони досягають рівня нижче 2000 мг/л. З 2017 року і далі рівні хлоридів продовжують коливатися, але вже на більш низькому рівні, генеральна тенденція зниження зберігається і до кінця періоду, на графіку середні значення хлоридів становлять приблизно 500 мг/л або нижче (рис. 5).

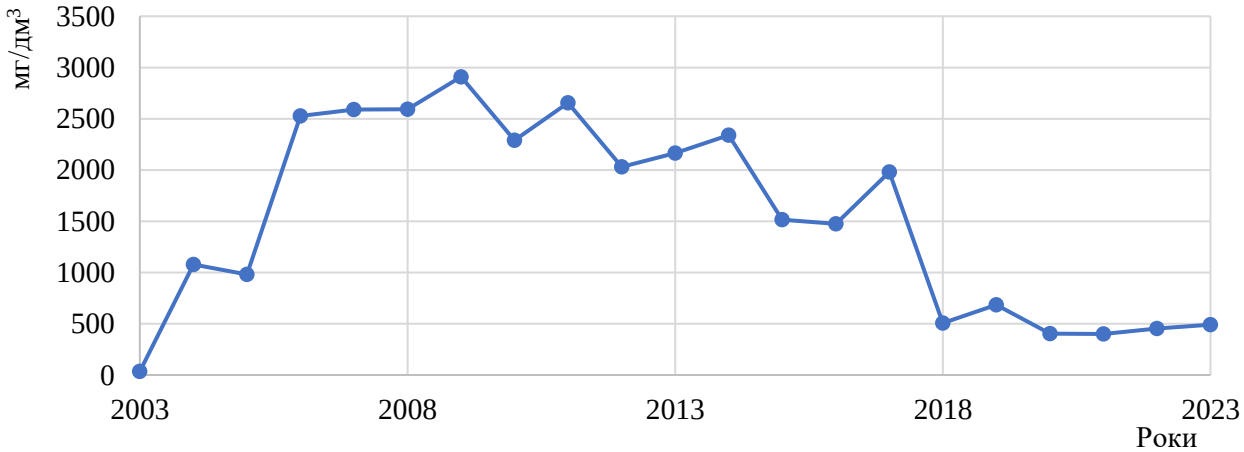


Рисунок 5 – Багаторічна динаміка хлоридів басейні річок Причорномор’я

Спостерігається поступове збільшення середнього рівня нітратів від 2003 до 2019 року, з невеликим зростанням від приблизно 5 мг/л до близько 10 мг/дм^3. Починаючи з 2019 року, рівень нітратів починає зростати більш стрімко. Особливо виражений пік спостерігається у 2023 році, де середній рівень нітратів раптово підскакує до понад 35 мг/дм^3. Таке різке зростання в останній точці даних може вказувати на якусь надзвичайну подію або зміну в умовах, які вплинули на якість води. Такі значення можуть вказувати на забруднення від сільського господарства, промисловості, або забруднення води стічними водами (рис. 6).

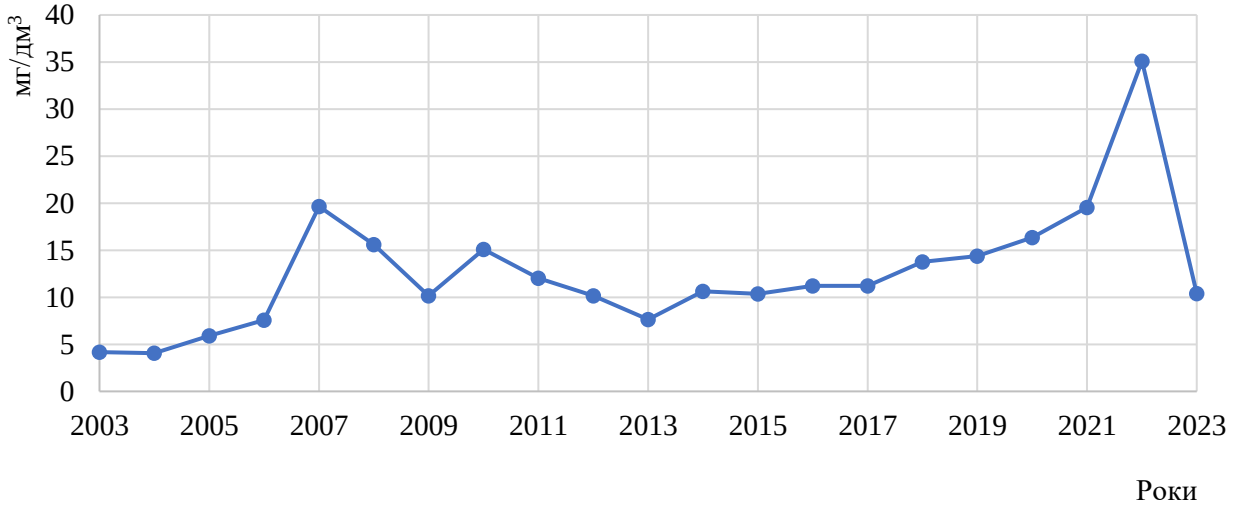


Рисунок 6 – Багаторічна динаміка нітратів в басейні річок Причорномор’я

Сезонна динаміка екологічного стану поверхневих вод є ключовим елементом у розумінні екосистемних процесів та впливу антропогенних факторів на водні ресурси. Сезонні зміни впливають на біохімічний склад, температуру, рівень води та інші важливі параметри, що в сукупності визначають якість води та її придатність для живих організмів.

Основу аналізу складають параметри, які найбільш точно відображають екологічний стан водойм, зокрема, рівні розчиненого кисню, прозорість води, наявність хімічних забруднювачів: сульфат-іонів, хлорид-іонів, амоній-іонів, нітрат-іонів, нітрит-іонів, фосфат-іонів, СПАР, перманганатної окислюваності, ХСК. Враховуючи значну кількість показників якості води, для аналізу сезонних динаміки екологічного стану поверхневих вод використано ІЗВ, який є важливим інструментом для оцінки якості водних об'єктів, що дозволяє отримати комплексну картину якості води на основі аналізу різноманітних показників. Він враховує усі параметри якості води, що робить ІЗВ ефективним засобом для оцінки загального екологічного стану водойм.

ІЗВ був розрахований для кожного пункту спостереження мережі моніторингу поверхневих вод, згідно з формулою:

$$\text{ІЗВ} = (1/N)^* \Sigma\, (C_i \,/\, ГДК_i), \qquad (20)$$

де C_i – середнє арифметичне значення показника якості води;

$ГДК_i$ – гранично допустима концентрація;

N – кількість параметрів якості води, які вимірюються даним постом спостереження.

Шкала оцінки якості води за ІЗВ поділяється на 7 класів:

I – дуже чиста (ІЗВ≤0,3); II – чиста (0,3<ІЗВ≤1); III – помірно забруднена (1<ІЗВ≤2,5); IV – забруднена (2,5<ІЗВ≤4); V – брудна (4<ІЗВ≤6); VI – дуже брудна (6<ІЗВ≤10); VII – надзвичайно брудна (ІЗВ>10).

В якості ГДК було використано нормативні значення показників, що відповідають нижній межі 2-го та 3-го класу якості води за ДСТУ 4808:2007.

Аналіз даних якості води проведено за наступними періодами: «Зима» (грудень, січень, лютий); «Весна» (березень, квітень); «Межень» (травень, червень); «Мілководдя» (липень, серпень, вересень); «Осінь» (жовтень, листопад)".

Просторовий розподіл ІЗВ показано на картах візуалізації (рис. 7 – 11). Кольори маркерів мають наступні значення: ІЗВ≤0,3 – синій; (0,3<ІЗВ≤1) – зелений; (1<ІЗВ≤2,5) – оранжевий; (2,5<ІЗВ≤4) – рожевий; (4<ІЗВ≤6) – червоний; (6<ІЗВ≤10) – темно-червоний; (ІЗВ>10) – чорний.

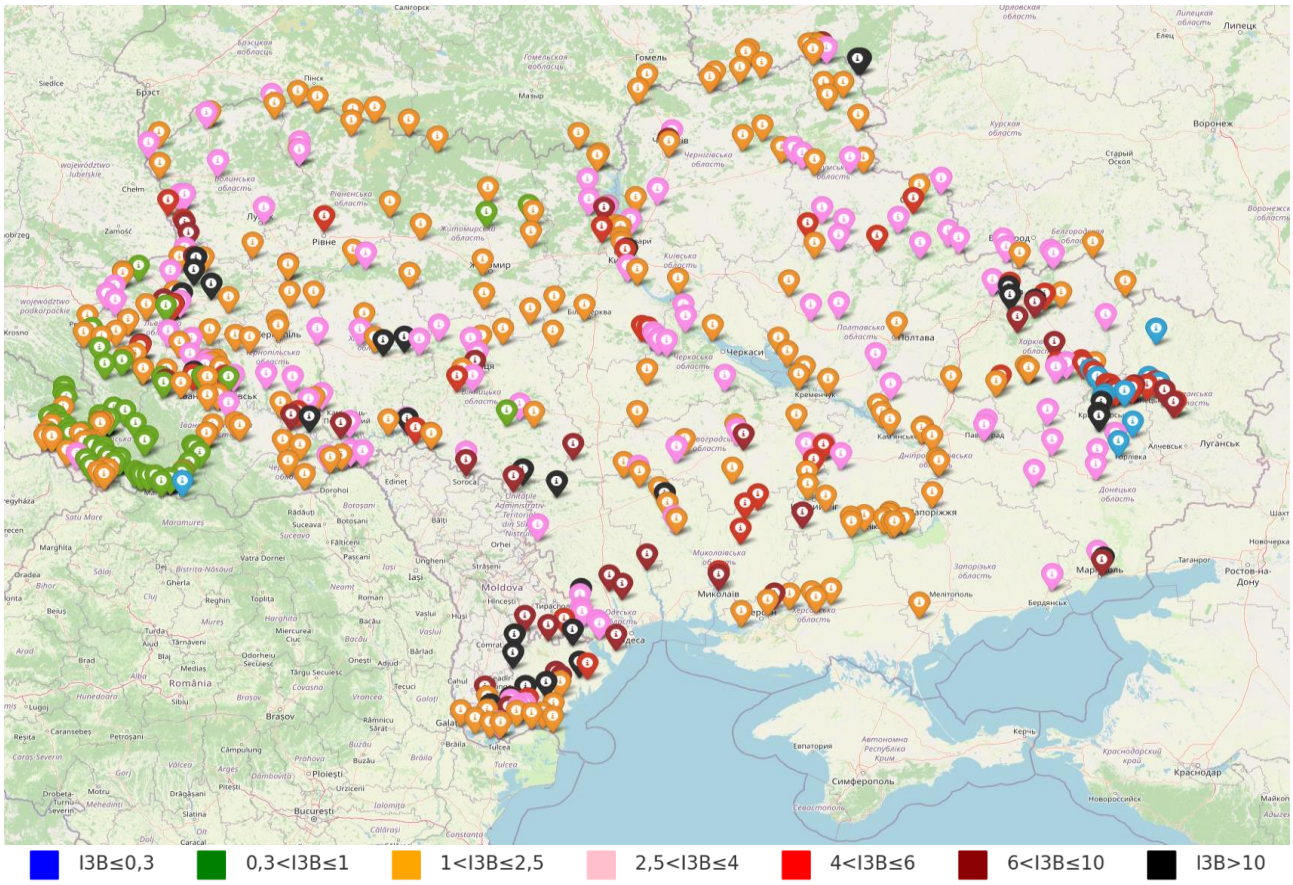


Рисунок 7 – просторовий розподіл значень ІЗВ для періоду спостережень «Зима»

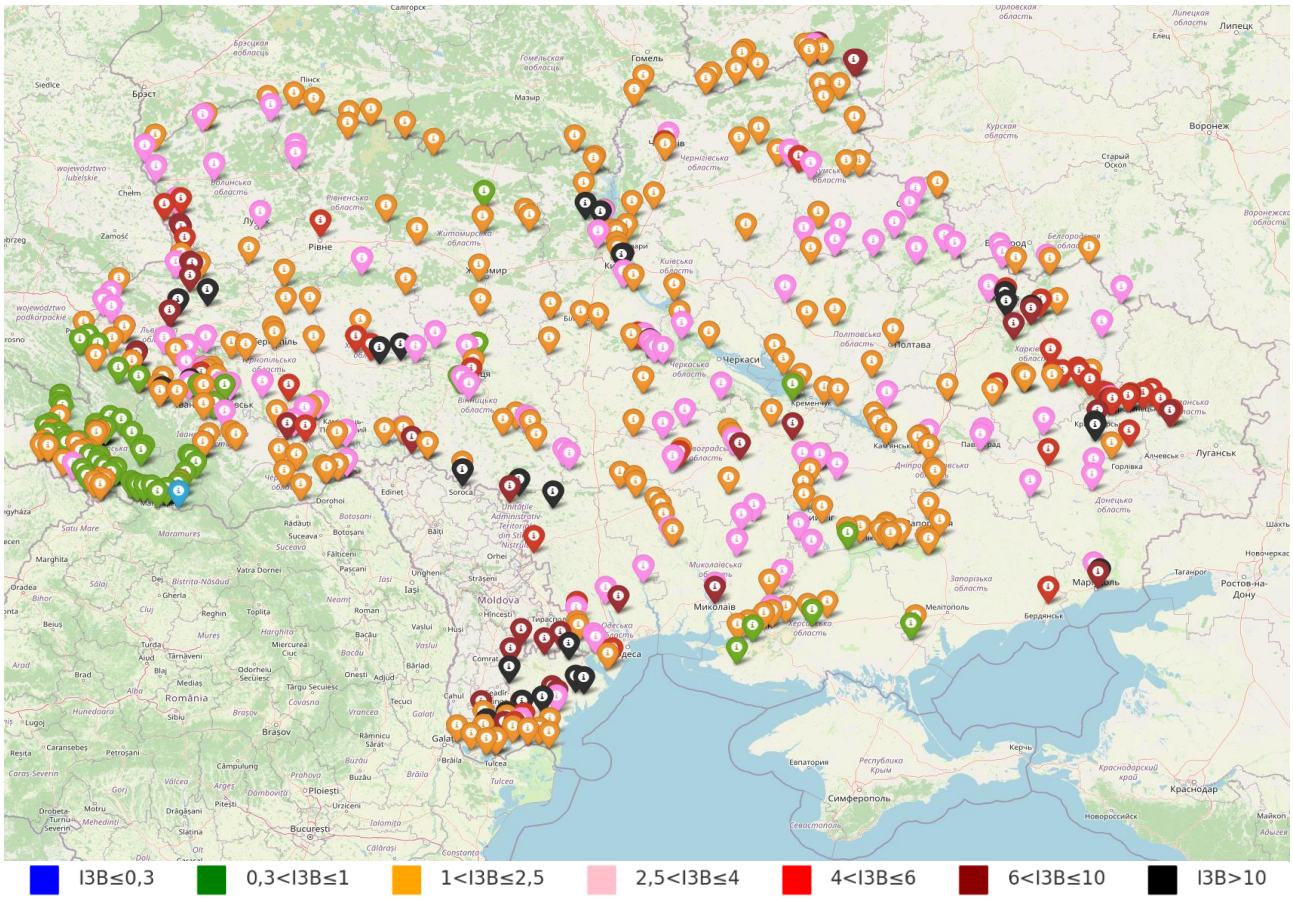


Рисунок 8 – просторовий розподіл значень ІЗВ для періоду спостережень «Весна»

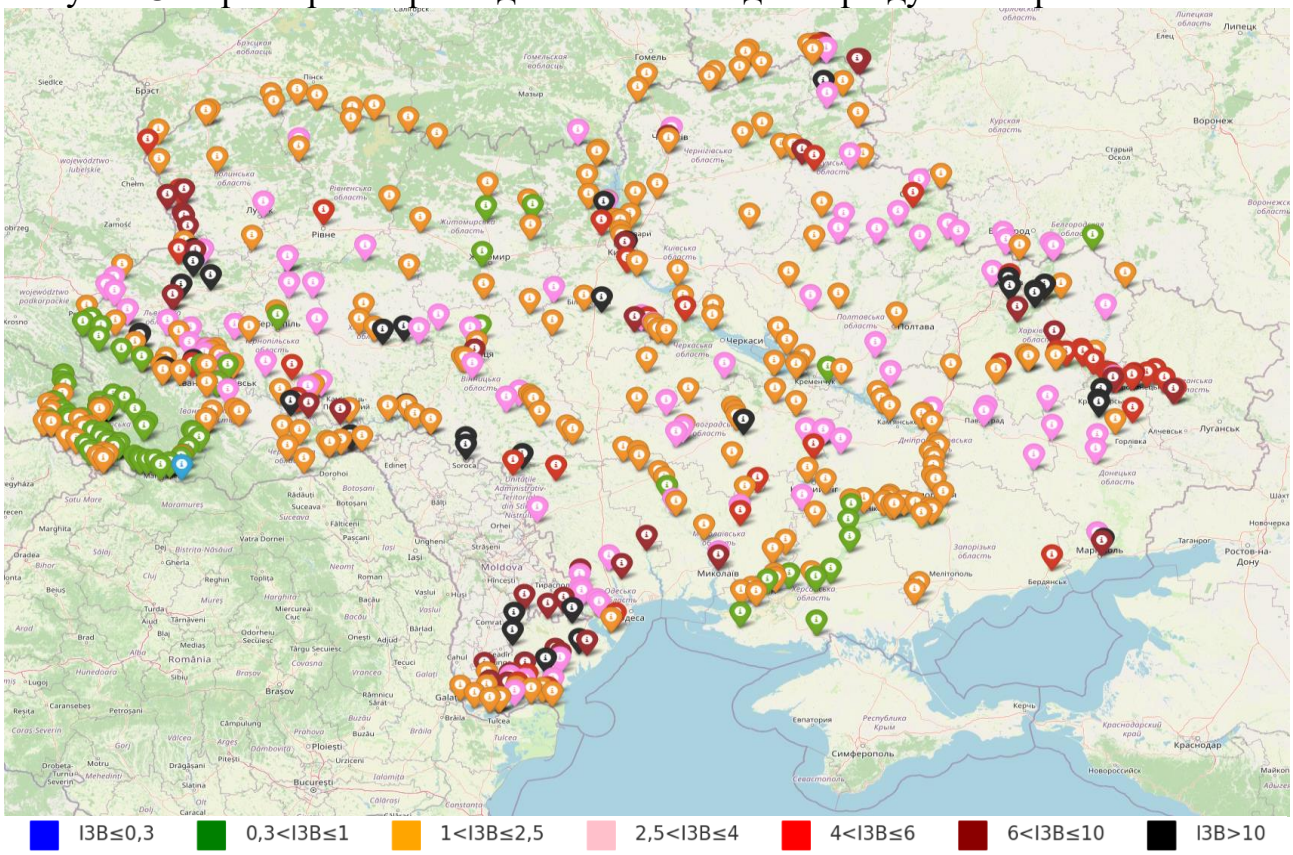


Рисунок 9 – просторовий розподіл значень ІЗВ для періоду спостережень «Межень»

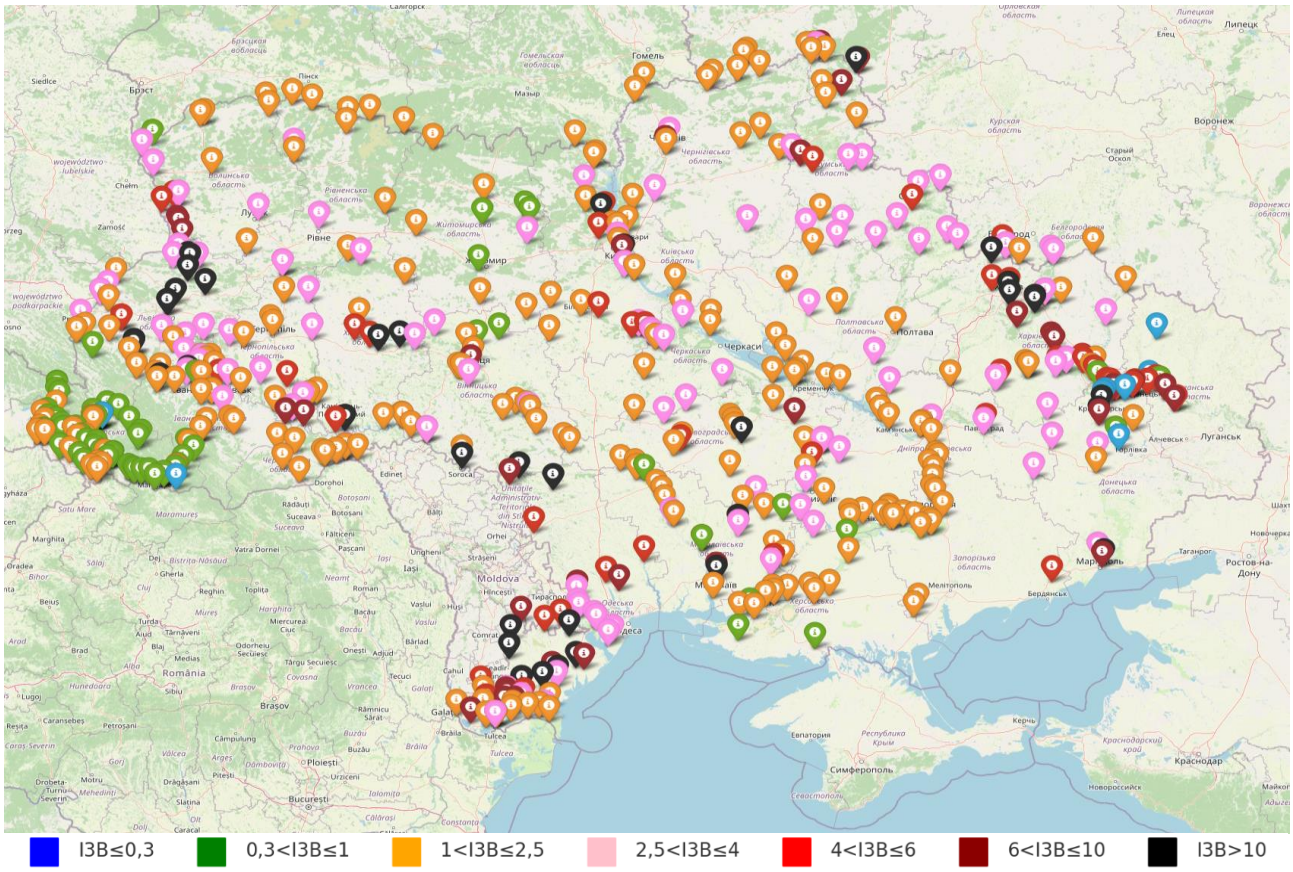


Рисунок 10 – просторовий розподіл значень ІЗВ для періоду спостережень «Мілководдя»

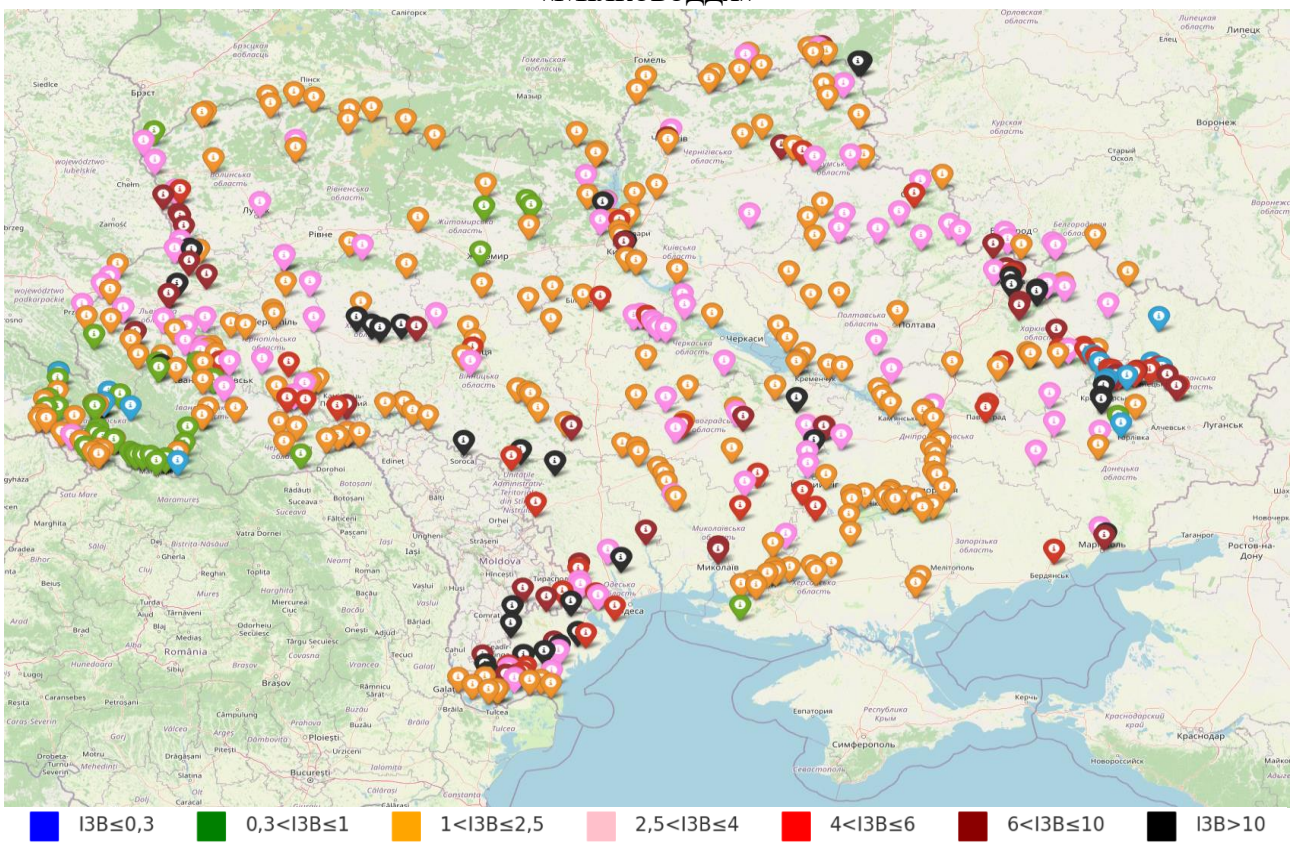


Рисунок 11 – просторовий розподіл значень ІЗВ для періоду спостережень «Осінь»

Для побудови карт вихідні таблиці зі значеннями ІЗВ та координатами спостережень (широта, довгота) форматувалися у CSV для завантаження в QGIS. Точки спостережень завантажувалися на карту, використовуючи координати, і прив'язувалися до відповідних значень ІЗВ. Для класифікації ІЗВ застосовували кольорові маркери: від синього (дуже чиста вода) до чорного (надзвичайно брудна вода), згідно з класами якості. Додавалися базові карти (OpenStreetMap), шари гідрографії та адміністративні межі для географічного орієнтування. Створювалися окремі карти для кожного сезону та двох нормативів (2-й і 3-й класи якості води). Карти виводилися у форматах PNG/PDF із легендами та шкалою.

На графіках (рис. 12) через боксплоти можна побачити розподіл оцінок у кожному сезоні, де медіана зазвичай знаходиться на рівні 3, а розмах оцінок та викиди ілюструють різноманітність забруднення води в різні періоди.

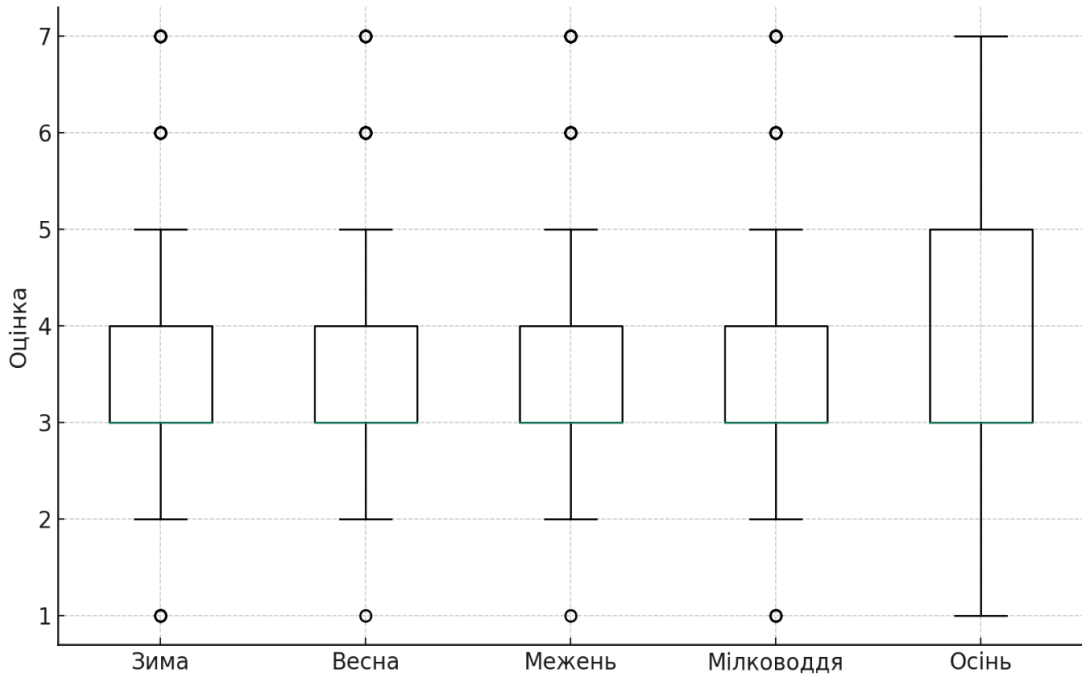


Рисунок 12 – розподіл оцінок ІЗВ за сезонами.

Як видно з таблиці 1, середні значення оцінок індексу забруднення води знаходяться в межах 3.68 до 3.79 за всі сезони, що вказує на порівняно стабільний рівень забруднення протягом року. Стандартне відхилення вказує на змінність оцінок індексу, але ця змінність не є дуже великою, оскільки значення стандартного відхилення знаходяться в межах 1.33 до 1.44. Мінімальні та максимальні значення показують, що в кожному сезоні були як низькі, так і високі оцінки індексу забруднення (від 1 до 7), що може свідчити про наявність епізодичних випадків сильного забруднення.

Можна помітити, що розподіли для всіх сезонів мають схожі характеристики, з центральними піками навколо оцінки 3, що вказує на високу частоту помірних значень індексу забруднення. Також, присутній деякий розмах в оцінках, що свідчить про варіативність забруднення води в різні періоди.

Таблиця 1 – загальні статистичні характеристики ІЗВ за сезонами

	Зима	Весна	Межень	Мілководдя	Осінь
Кількість значень	510	508	526	548	495
Середнє	3.71	3.68	3.70	3.72	3.79
Стандартне відхилення	1.42	1.33	1.40	1.41	1.44

На графіках (рис.13) відображено розподіл оцінок індексу забруднення води за кожним сезоном. Ці графіки демонструють щільність розподілу оцінок, де піки вказують на найбільш часто зустрічані значення оцінок у кожному сезоні.

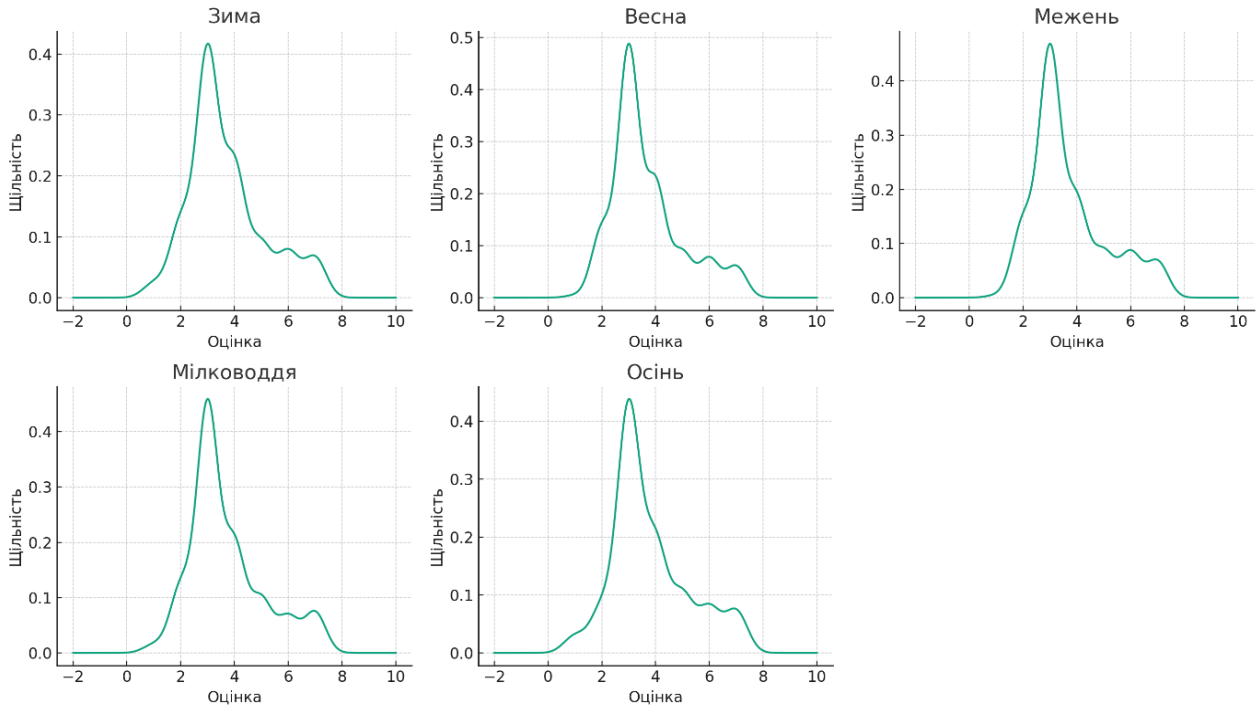


Рисунок 13 – розподіл оцінок індексу забруднення води за кожним сезоном

Найвищі значення ІЗВ, що спостерігаються у кожному сезонному періоді, характерні для наступних постів (рис. 14): р. Уди, 41 км, с. Хорошево, міст (басейн Дону); р. Окни, 28 км, с. Лабушне, кордон з Молдовою (басейн Дністра); р. Уди, 3 км, с.Єсхар, ехн.в/з ГРЕС-2, міст (басейн Дону); р. Полтва, 30 км, с.Кам’янопіль, Пустомитівський р-н, кільцева дорога біля шлюзу (басейн Вісли); р. Хаджидер, 10,1 км, с. Сергіївка (басейн річок Причорномор'я); р. Південний Буг, 711 км, смт. Меджибіж, Меджибіжське вдсх. (басейн Південного Бугу); р. Каплань, 19 км, с. Крутоярівка, кордон з Молдовою (басейн річок Причорномор'я); р. Кальчик, 1 км, м. Маріуполь, місто (басейн річок Приазов'я); р. Дніпро, 855 км, Скидний канал БСА (басейн Дніпра); р. Південний Буг, 744 км, с. Копистин, нижче м.Хмельницький (басейн Південного Бугу); р. Казений Торець, 55 км, м. Дружковки, нижче впадіння нижче міста технічний в/забір

(басейн Дону); р. Киргиж-Китай, 49 км, с. М. Ярославець, кордон з Молдовою (басейн Дону); р. Нерушай, 29,2 км, с. Баштанівка, у межах с. Баштанівка (басейн Дунаю); р. Лопань, 1 км, м. Харків, гирло (басейн Дону).

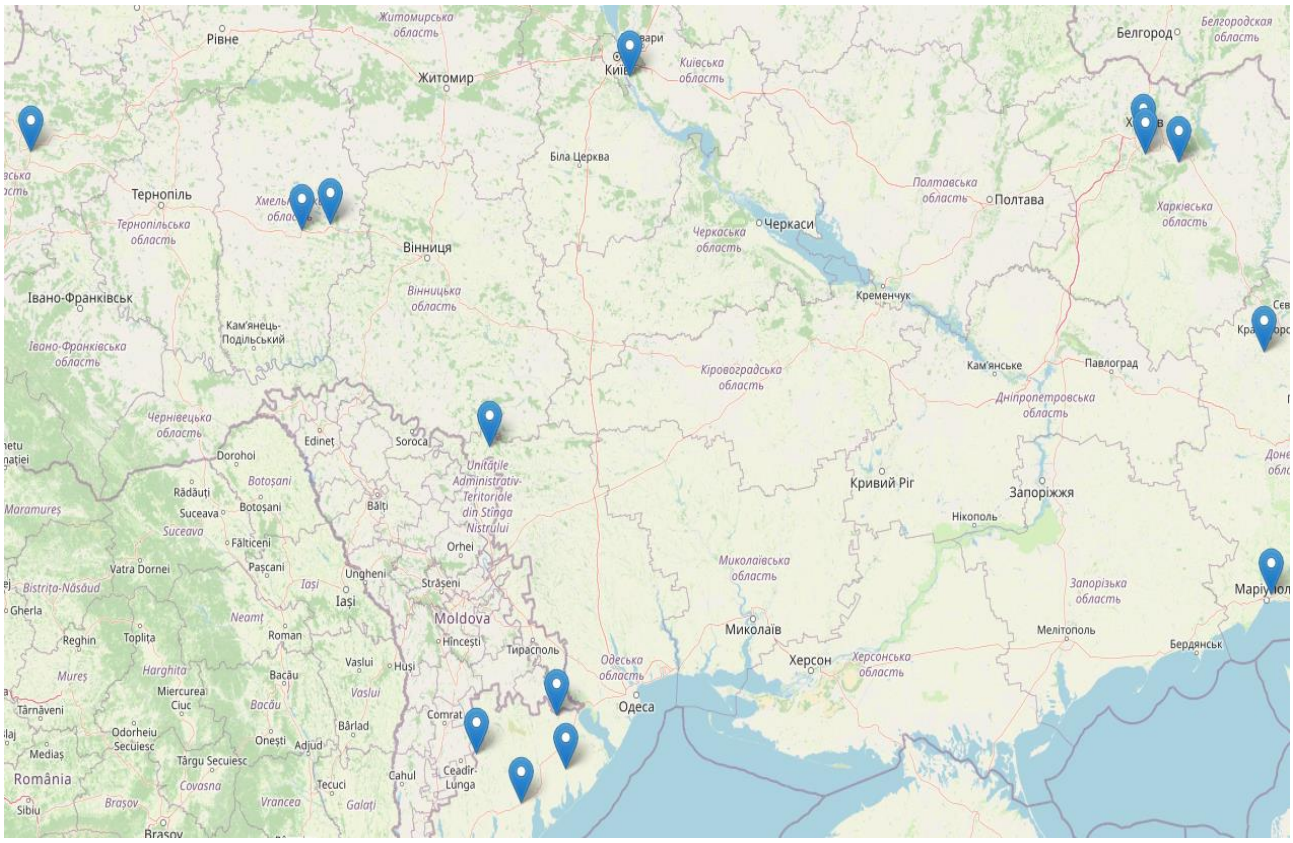


Рисунок 14 – просторовий розподіл найвищих значень ІЗВ

Пункти спостереження з найвищими значеннями ІЗВ мають стабільно високий рівень забруднення впродовж року, з піком у період мілководдя або межені, що може вказувати на збільшення концентрації забруднювачів у меншій кількості води або на викиди забруднюючих речовин.

Пункти з найнижчими середніми значеннями ІЗВ вказують на кращу якість води, особливо у період межені, коли збільшення об'єму води може розбавляти забруднювачі.

У п’ятому розділі здійснено наукове обґрунтування інтеграції інформаційно-ентропійних принципів в управління екологічною безпекою річкового басейну. Використовуючи методику визначення ентропійно-зваженого індексу стану водного об’єкту було розраховано ентропійно-зважені індекси якості води для кожного пункту моніторингу на основі даних моніторингу поверхневих вод Державного водного агентства України. Для візуалізації отриманих даних були створені карти просторового розподілу значені ЕІЗВ. Результати аналізу ентропійно-зваженого індексу забрудненості води (ЕІЗВ) за річковими басейнами та сезонами наведено на графіках (рис. 15).

Для весняного періоду найчистіші води спостерігаються в басейні Дунаю (ЕІЗВ = 0,33; «чиста вода»), а найзабрудненіші – в Південному Бузі (ЕІЗВ = 1,58; «забруднена вода»). Зимового періоду найчистіша вода знову спостерігається у

басейні Дунаю (ЕІЗВ = 0,28; «дуже чиста»); Південний Буг демонструє значно вищий рівень забруднення (ЕІЗВ = 2,33; «брудна вода»). Під час межені переважають показники помірного забруднення у більшості басейнів. Найчистіший – Дунай (ЕІЗВ = 0,48; «чиста вода»), а найбрудніший – Дністер (ЕІЗВ = 1,37; «помірно забруднена вода»). Для періоду мілководдя спостерігається найвищий рівень забруднення у всіх басейнах. Наприклад, Південний Буг (ЕІЗВ = 13,54) та річки Приазов'я (ЕІЗВ = 12,39) характеризуються як «надзвичайно брудні». Восени забруднення залишається високим, особливо в басейнах Причорномор'я (ЕІЗВ = 14,23) та Південного Бугу (ЕІЗВ = 11,60), які залишаються у класі «надзвичайно брудних». Загалом, найнижчі значення ЕІЗВ у весняний та зимовий періоди, а різке підвищення забруднення у період мілководдя, коли концентрація забруднень максимальна через зниження об'ємів води.

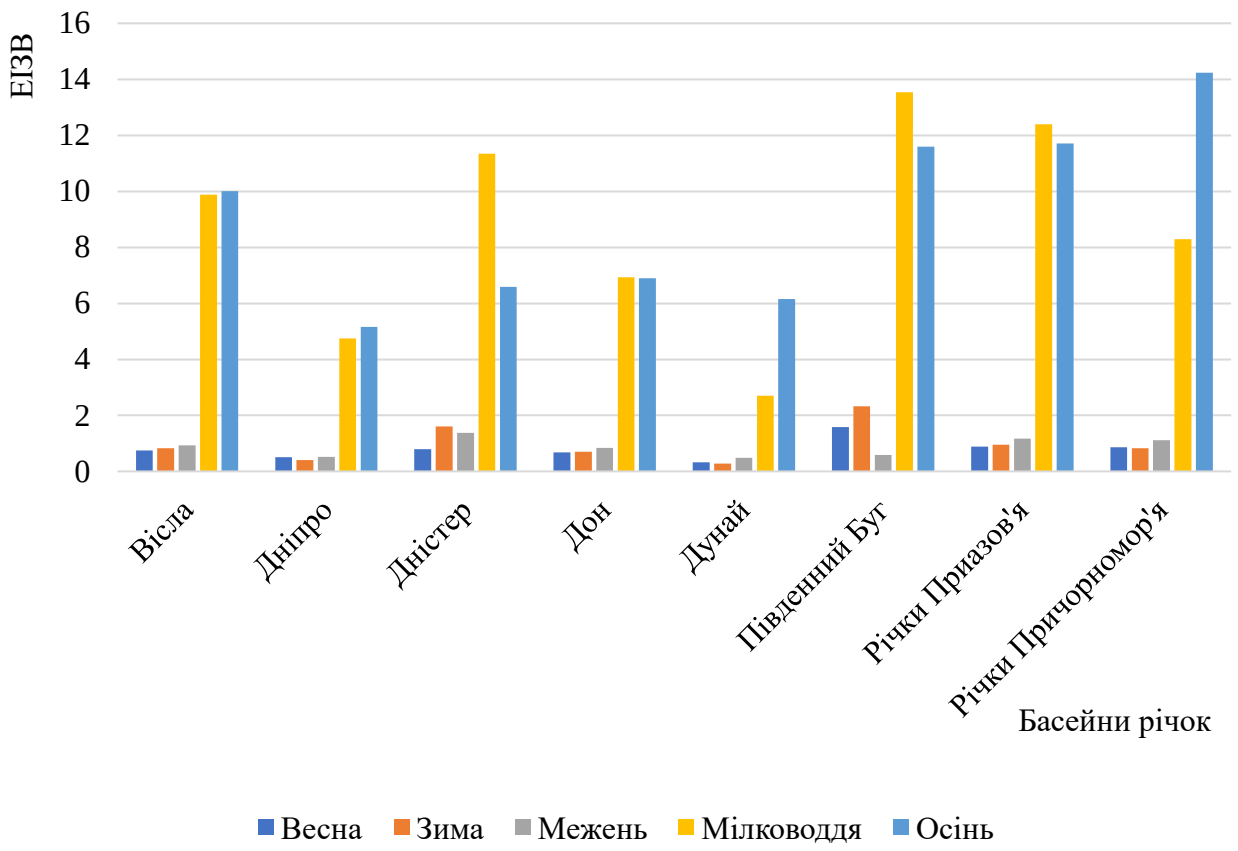


Рисунок 15 – Розподіл середніх значень ЕІЗВ за басейнами та періодами

Найчистіші річки – Дунай та частково Дніпро, які утримують відносно низькі значення ЕІЗВ навіть у забруднених періодах. Найзабрудненіші – Південний Буг, річки Причорномор'я та Приазов'я в періоди мілководдя й осені. Сезонність відіграє ключову роль у формуванні якості поверхневих вод, зокрема через зміни гідрологічних умов. Найбільше забруднення відзначається в періоди низької водності, що вимагає посиленого моніторингу та впровадження адаптивних заходів управління якістю води, особливо в басейнах Південного Бугу та Причорномор'я. Для візуалізації отриманих даних були створені карти просторового розподілу значені ЕІЗВ (рис. 16 – 20).

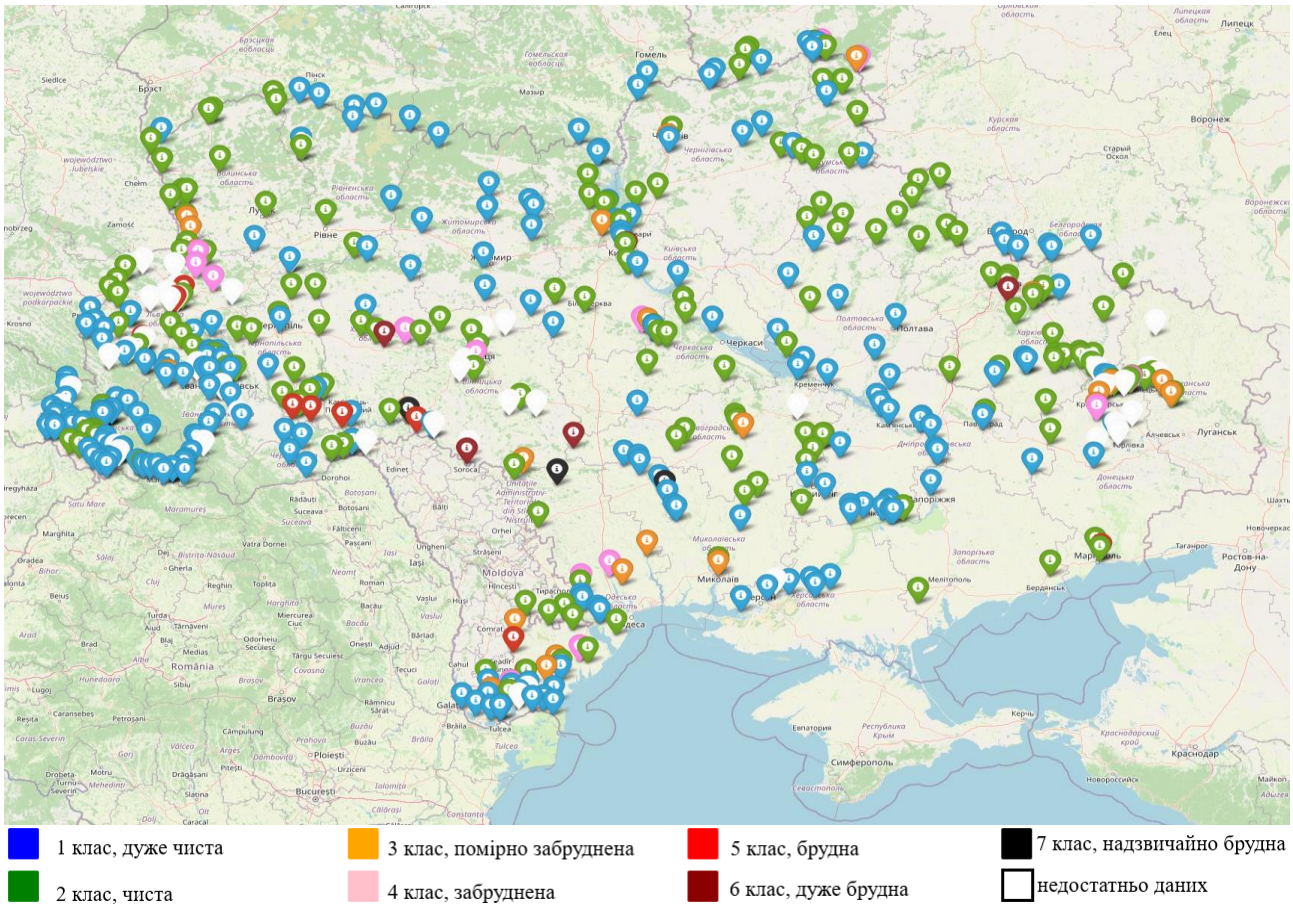


Рисунок 16 – Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Зима»

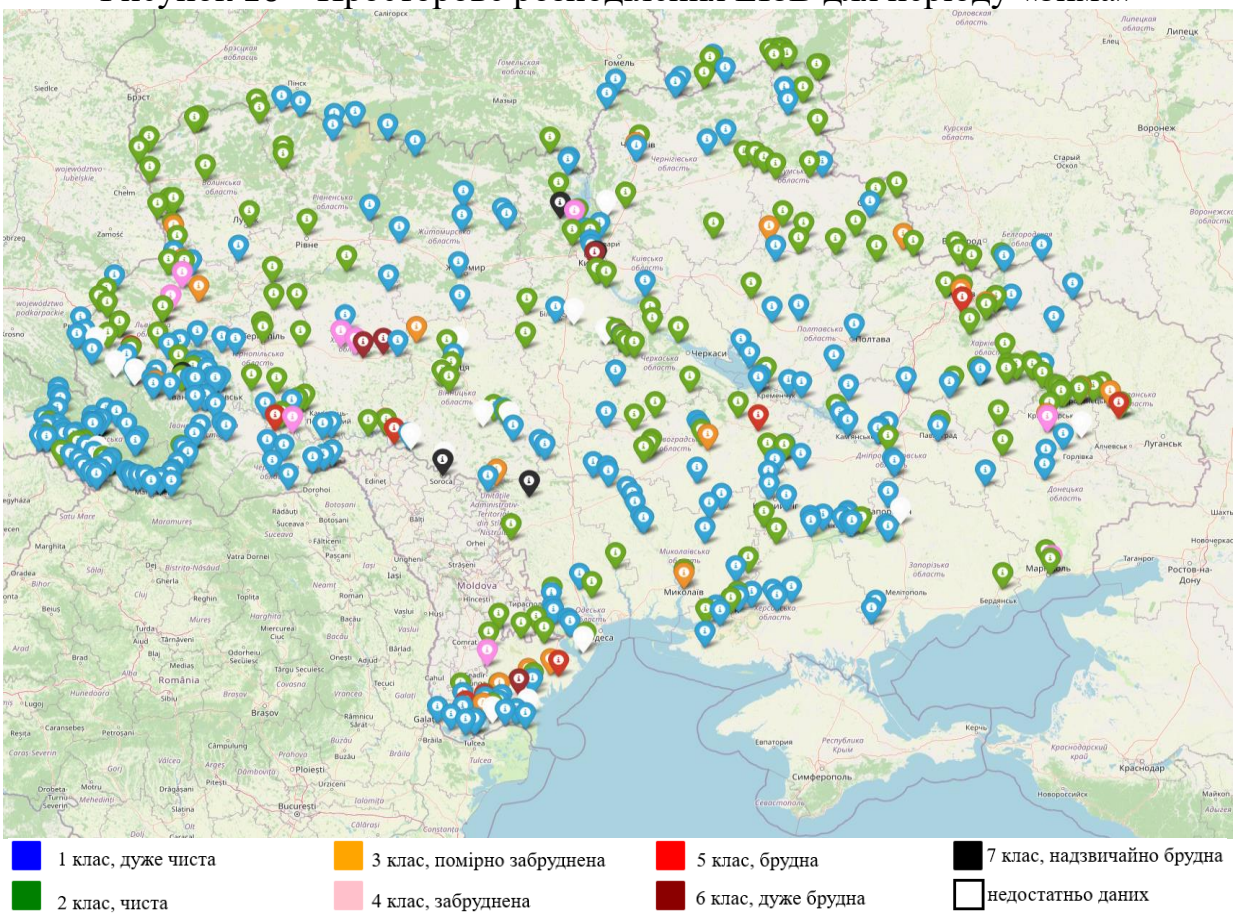
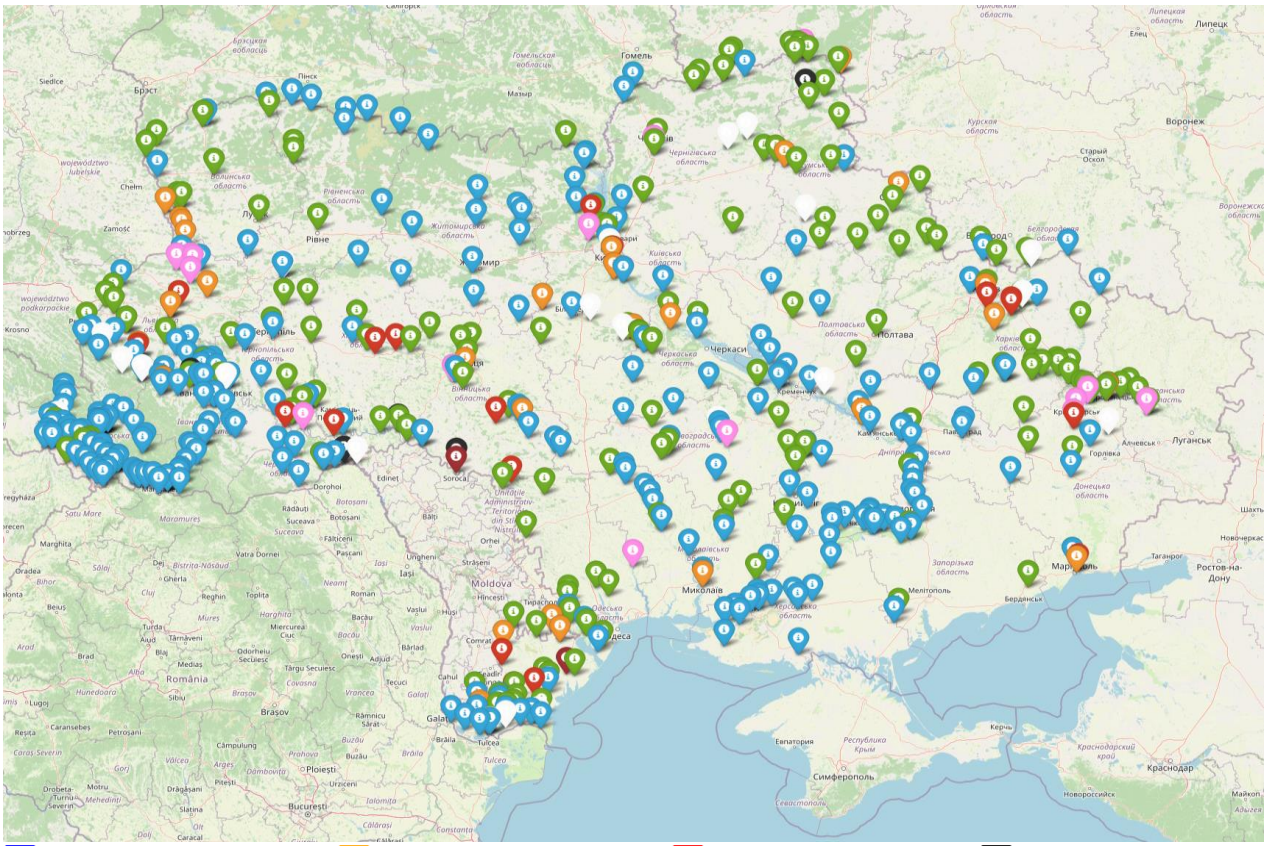
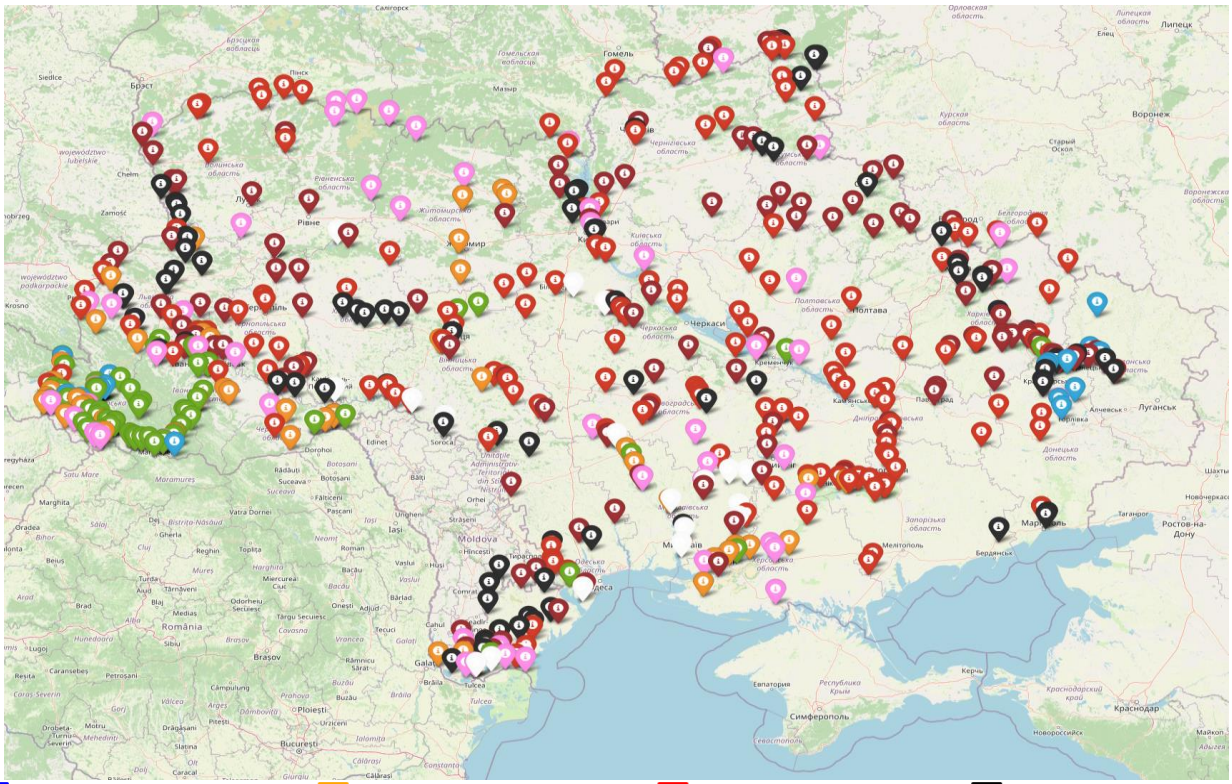


Рисунок 17 – Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Весна»



1 клас, дуже чиста
2 клас, чиста
3 клас, помірно забруднена
4 клас, забруднена
5 клас, брудна
6 клас, дуже брудна
7 клас, надзвичайно брудна
недостатньо даних

Рисунок 18 – Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Межень»



1 клас, дуже чиста
2 клас, чиста
3 клас, помірно забруднена
4 клас, забруднена
5 клас, брудна
6 клас, дуже брудна
7 клас, надзвичайно брудна
недостатньо даних

Рисунок 19 – Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Мілководдя»

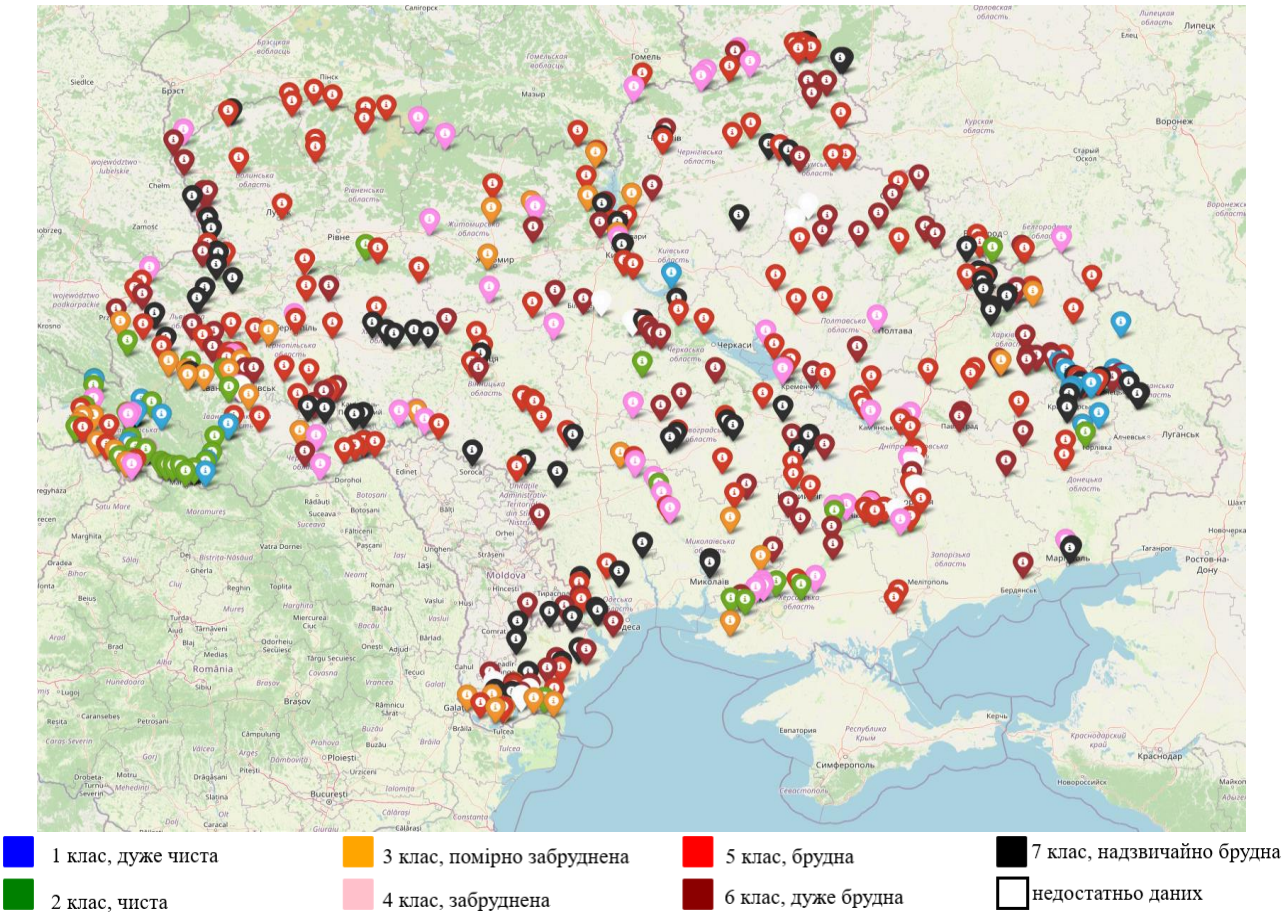


Рисунок 20 – Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Осінь»

Динаміка вказує на відносно кращу якість води в холодніші місяці (зима, весна, межень) та значне погіршення під час мілководдя та осені.

Загалом, аналіз просторового розподілу ЕІЗВ (рис. 7 – 11) та ІЗВ (рис. 16 – 20) дозволяє виявити певні закономірності сезонної та регіональної варіативності. Для періоду зими карти ЕІЗВ і ІЗВ демонструють найкращий екологічний стан у більшості басейнів України. Обидва індекси фіксують відносно низькі рівні забруднення, особливо у річках західного регіону (Дунай, Вісла) та частково в басейнах Дніпра. Весняні карти ЕІЗВ і ІЗВ показують покращення якості води завдяки збільшенню водності та розведенню забруднюючих речовин. У басейнах Дунаю та Вісли переважають I–II класи якості води. У період межені, низької водності показники забруднення зростають. ЕІЗВ, у порівнянні з ІЗВ, краще диференціює забруднення в окремих річках, демонструючи вищу чутливість до концентрації забруднюючих речовин. Найгірші показники фіксуються в період мілководдя. ЕІЗВ показує більш детальну просторову варіативність у забрудненні, особливо в басейнах Південного Бугу, Причорномор’я та Приазов’я, де спостерігаються значення VI–VII класів. Восени забруднення залишається високим, проте не досягає пікових значень, характерних для мілководдя. Карти ЕІЗВ і ІЗВ для цього періоду демонструють схожі тенденції. Найкращий стан води (I–II класи) спостерігається у західних регіонах (басейни Дунаю та Вісли), де фіксується менший антропогенний вплив. Найбільш проблемні зони — басейни Південного Бугу,

Причорномор’я та Приазов’я, які в усі сезони демонструють найвищі значення індексів забруднення. ЕІЗВ є більш чутливим індикатором, оскільки враховує ваговий внесок різних параметрів у загальний рівень забруднення та краще ідентифікує локальні джерела забруднення та просторові контрасти, тоді як ІЗВ забезпечує більш загальну оцінку.

На основі аналізу максимальних значень ЕІЗВ для кожного річкового басейну та сезону можна виділити наступні тенденції та найбільш забруднені пости. Для басейну Вісли максимальне забруднення в осінь (41.49) і мілководдя (24.98); для Дніпра пікові значення забруднення в мілководдя (75.68) та осінь (58.27); для Дністра високі рівні забруднення в мілководдя (167.57) та зима (66.66); для Дону максимальне забруднення в мілководдя (49.13) та осінь (34.52). для Дунаю екстремально високе забруднення в осінь (331.45) та мілководдя (49.48); басейн Південного Бугу характеризується високими рівнями забруднення в мілководдя (327.24) та навесні (41.69); річки Приазов'я мають максимальне забруднення в мілководдя (33.35) та восени (34.70); річки Причорномор'я найбільше забруднені восени (94.11) та в мілководдя (30.12).

Найвищі значення ЕІЗВ спостерігаються у період мілководдя та осені через зниження водності, що сприяє концентрації забруднень. Найбільш забрудненими є басейни Дністра, Південного Бугу та Дунаю. Найвищі значення ЕІЗВ фіксуються у точках із безпосереднім впливом промислових та сільськогосподарських стоків. Окремі пости спостереження з найвищими рівнями ЕІЗВ вимагають додаткової уваги та можливо подальших заходів для зменшення забруднення.

Динаміка ЕІЗВ для одного з найбільш забруднених басейнів р. Південний Буг наведена на графіках (рис. 21).

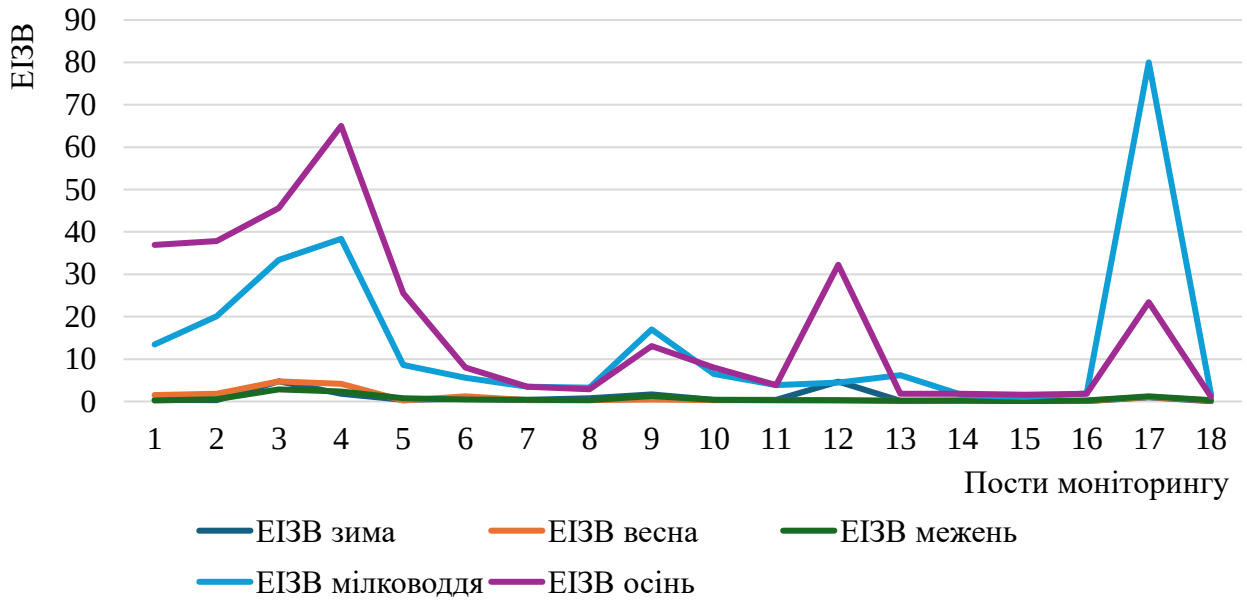


Рисунок 21 – Динаміка ЕІЗВ за постами спостережень для річки Південний Буг

Для р. Південний Буг значення ЕІЗВ вказують на змінність якості води протягом різних пор року, з найнижчими середніми значеннями в межень (0.684)

та найвищими в осінь (17.443). Стандартне відхилення показує значну варіативність індексу якості води, особливо під час мілководдя та в осінній період, що свідчить про значні відмінності між точками вимірювання. Під час зими та весни спостерігається більш висока частка вимірювань, що належать до кращих класів води (1 та 2 класи). У період межені та мілководдя спостерігається зміщення розподілу в бік гірших класів води, з особливо високою часткою вимірювань, що належать до 7 класу води під час мілководдя.

Осінь характеризується високими значеннями ІЗВ, з більшістю вимірювань, що попадають в 6 та 7 класи води, що вказує на значне погіршення якості води. Ці дані вказують на те, що якість води в річці Південний Буг зазнає значних змін протягом року, з особливим погіршенням під час осіннього періоду, що може бути пов'язано з сезонними впливами, стоком та аграрною діяльністю.

Оптимізація мережі моніторингу на основі принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації розглянемо на прикладі р. Південний Буг. Для оптимального покриття важливо розмістити пункти спостереження в такий спосіб, щоб вони відображали різноманіття водного режиму та екосистем, враховували екологічний стан та антропогенне навантаження.

Оптимізація мережі пунктів моніторингу річки Південний Буг (рис. 5.31) була проведена за принципом максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації дозволила виділити пункти, які забезпечують найбільшу інформативність для аналізу екологічного стану річки, уникаючи дублювання даних. До оптимізованого набору увійшли такі ключові пункти, що мають найвищу ентропію та забезпечують ефективний моніторинг (27132 – р. Південний Буг, 755 км, м. Хмельницький. 27133 – р. Південний Буг, 744 км, с. Компісці, нижче м. Хмельницький. 27135 – р. Південний Буг, 673 км, смт. Меджибіж, Меджибіжське вдсх. 27136 – р. Південний Буг, 626 км, с. Щедрове, Щедрівське вдсх. 27137 – р. Південний Буг, 607 км, с. Гущинці, нижче села, в районі впадіння р. Бужок. 27138 – р. Південний Буг, 570 км, с. Війтівці, Сабарівське вдсх., верхній б/з. 27139 – р. Південний Буг, 537 км, смт. Сутиски, Сутиське вдсх., в/еф. 27145 – р. Південний Буг, 153 км, с. Олексіївка, нижній б/з, м. Первомайськ. 27146 – р. Південний Буг, 70 км, м. Миколаїв, нижче міста. 27147 – р. Південний Буг, 60 км, м. Вознесенськ, нижній б/з. 27148 – р. Південний Буг, 51 км, м. Нова Одеса, КП “Прибузьке”. 27150 – р. Південний Буг, 0 км, м. Миколаїв, гідротехнічний комплекс (морська частина) – позначені червоним кольором.

Для врахування сезонних змін у гідрологічному стані річки було виділено пункти з максимальною ентропією для теплого та холодного періодів. Зокрема, для холодного періоду (листопад – березень) додатково включені такі: (27140 – р. Південний Буг, 400 км, м. Ладижин, Ладижинське вдсх; 27141 – р. Південний Буг, 327 км, с. Ставки, кордон Вінницької та Кіровоградської обл. 27142 – р. Південний Буг, 316 км, м. Гайворон, Гайворонське вдсх. 27143 – р. Південний Буг, 206 км, м. Первомайськ, Первомайське вдсх. 27144 – р. Південний Буг, 153 км, смт. Олексіївка, нижній б/з.) – виділені рожевим кольором на карті.

Оптимізовані пункти розташовані уздовж річки таким чином, щоб охоплювати промислові зони (27145 - Первомайськ, 27146 - Миколаїв, 27147 Вознесенськ), сільськогосподарські території (27135 - Меджибіж, 27136 - Щедрове) та природоохоронні зони та ділянки з високим біорізноманіттям (27132 - Хмельницький, 27133 - Компісці).

Запропонована оптимізована мережа моніторингу річки Південний Буг є адаптивною до змін екологічних умов та ефективною для збору даних. Включені пункти моніторингу охоплюють критично важливі ділянки річки, що дозволяє забезпечити точний аналіз стану водних ресурсів.

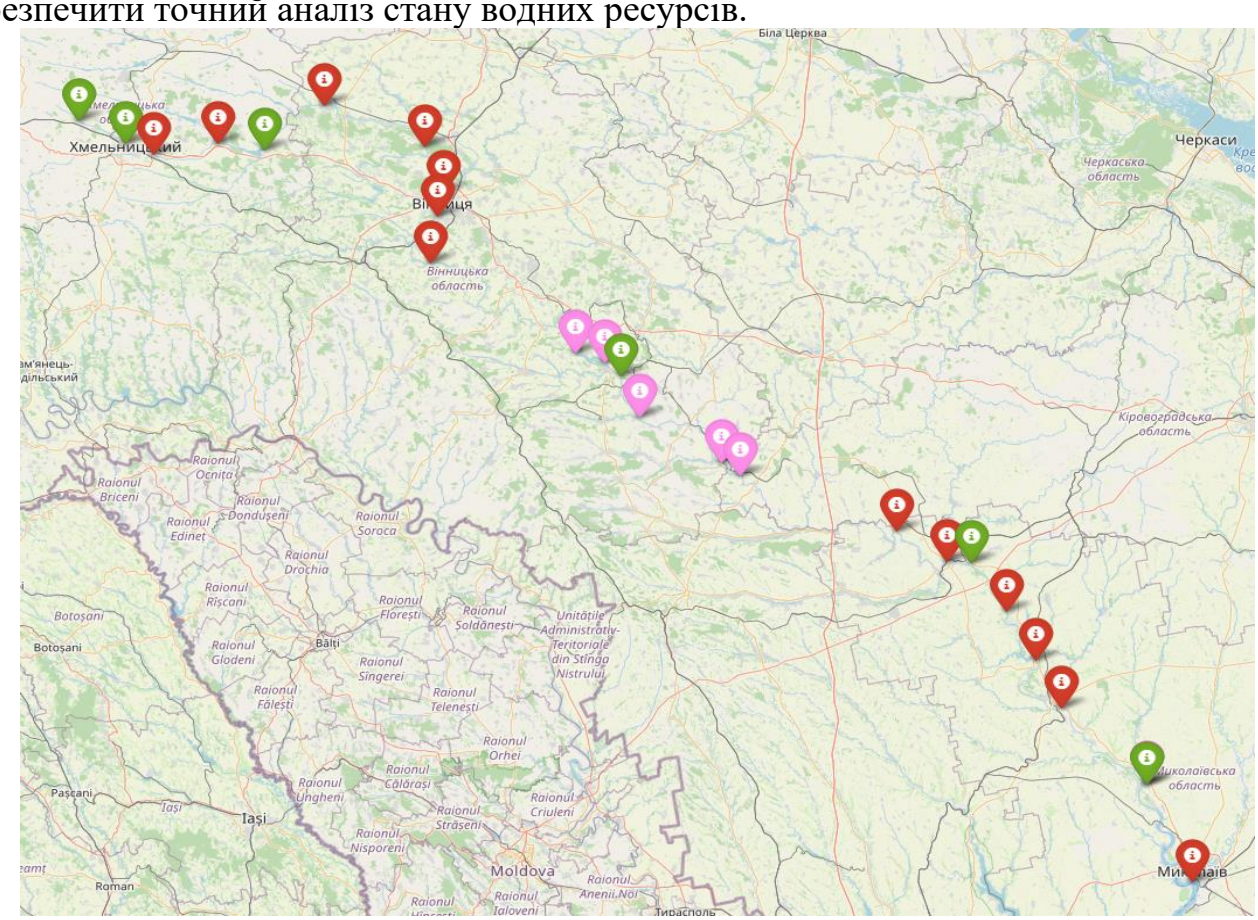


Рисунок 22 – Мережа моніторингових пунктів р. Південний Буг. Червоні маркери позначають пункти з найбільшою інформативністю, зелені дають надлишкову інформацію, рожеві інформативні за умов певного теплового режиму (холодно/тепло)

Аналогічним чином проведено процедури оптимізації для мережі моніторингових пунктів р. Дністер та р. Сіверський Донець.

Загалом, оптимізація мережі моніторингу сприяє створенню ефективної, гнучкої та економічно доцільної системи управління водними ресурсами. Це особливо актуально в умовах кліматичних змін, зростання антропогенного навантаження на водні об’єкти та необхідності забезпечення сталого розвитку річкових басейнів.

Пропонується новий підхід на основі теорії інформації для вибору змінних, що спричиняють просторові та часові варіації якості річкової води, що піддається

впливу точкових і дифузних джерел забруднення в межах басейну – максимальна інформативність при мінімальній надмірності інформації (МІМН). Критерій МІМН, що грунтується на математичному принципі, може бути більш об'єктивним і менше залежати від кількості досліджуваних змінних порівняно з іншими методами відбору.

На основі проведеного аналізу було ідентифіковано наступний оптимальний набір параметрів для трьох річок: Південний Буг, Дністер та Сіверський Донець.

Реалізація принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації для вибору оптимального числа параметрів якості води полягає у визначенні взаємної інформації між кожним параметром та загальним станом якості води, а потім мінімізується надмірність між параметрами. В результаті розрахунку взаємної інформації для кожного параметру відносно загального стану якості води визначено, що найбільшу інформативність мають такі параметри:

Фосфати з взаємною інформацією 1.2912
ХСК з взаємною інформацією 1.2815
Нітрати з взаємною інформацією 1.1903
Кисень розчинений з взаємною інформацією 1.1834
$БСК_5$ з взаємною інформацією 1.1664

Ці параметри надають найбільшу кількість інформації про загальний стан якості води, тому вони повинні бути включені до оптимального набору для моніторингу.

На наступному кроці визначається надмірність між цими параметрами, щоб вибрати ті, які мінімізують надмірність при збереженні максимальної інформативності.

Матриця кореляції (табл. 3) між обраними параметрами для набору даних показує дуже високі значення кореляції між більшістю параметрів, особливо між фосфатами, ХСК, нітратами та $БСК_5$. Це вказує на високу надмірність між цими параметрами, що означає, що деякі з них можуть бути виключені з аналізу без значної втрати інформації про стан якості води. Враховуючи високу кореляцію між параметрами, для мінімізації надмірності та оптимізації набору параметрів можна розглянути можливість вибору одного або декількох параметрів із кожної групи високо корельованих параметрів для включення в кінцевий набір.

Таблиця 3 – Матриця кореляції між обраними параметрами

	Фосфати	ХСК	Нітрати	Кисень розч.	$БСК_5$
Фосфати	1	0,991304	0,994193	0,965201	0,997731
ХСК	0,991304	1	0,99721	0,969446	0,991889
Нітрати	0,994193	0,99721	1	0,968174	0,993555
Кисень розч.	0,965201	0,969446	0,968174	1	0,964312
$БСК_5$	0,997731	0,991889	0,993555	0,964312	1

На основі цих даних, для мінімізації надмірності та забезпечення комплексного охоплення різних аспектів якості води, рекомендується вибрати параметри, які не тільки мають високу взаємну інформацію зі станом якості води, але й мінімально корелюють між собою.

Враховуючи високу кореляцію між більшістю параметрів, можна запропонувати такий підхід до вибору оптимального набору: фосфати (через високу взаємну інформацію, цей параметр є важливим для оцінки якості води); нітрати (також мають високу інформативність і відрізняються від фосфатів за своїм хімічним складом та впливом на водне середовище, тому їх варто включити до набору); кисень розчинений або БСК$_5$ (обидва параметри важливі для оцінки біологічної активності та органічного забруднення води). Вибір між ними може залежати від специфіки моніторингових цілей. Якщо головна увага приділяється оцінці біохімічного споживання кисню, варто обрати БСК$_5$. Якщо ж більш важливою є присутність розчиненого кисню для підтримки життєдіяльності водних організмів, краще вибрати кисень розчинений.

Враховуючи високу кореляцію між фосфатами та ХСК, можливо, варто вибрати один з цих параметрів для зменшення надмірності. Однак, оскільки обидва параметри мають високу взаємну інформацію, включення обох може бути виправданим, якщо моніторингова програма націлена на детальний аналіз якості води.

Отже, оптимальний набір параметрів може включати: фосфати, нітрати, кисень розчинений або БСК$_5$, залежно від цілей моніторингу. Цей набір параметрів забезпечить гарне покриття для оцінки якості води річки Південний Буг з мінімальною надмірністю.

Аналогічним чином здійснюється вибір параметрів для будь-якого водного об’єкта, зокрема оптимальний набір параметрів для набору даних річки Дністер може включати: БСК$_5$, нітрати, кисень розчинений або сульфати; для річки Сіверський Донець – сульфати, БСК$_5$, і кисень розчинений або завислі речовини, залежно від того, який з останніх двох параметрів краще відповідає цілям моніторингу.

Аналіз показав, що вибрані параметри забезпечують високий рівень інформативності про стан якості води в кожній річці з мінімальною надмірністю даних. Такий підхід дозволяє ефективно виявляти зміни в якості води та вживати відповідних заходів для її покращення.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літературних джерел і розглянуто науково-теоретичні основи управління екологічною безпекою річкових басейнів на основі інформаційно-ентропійного підходу в контексті досягнення Цілей сталого розвитку. Аналіз теоретичних засад управління річковими басейнами проведено через призму еволюції наукових підходів: від інженерних методів стародавніх цивілізацій до сучасних інтегрованих підходів, які враховують екологічні, соціально-економічні та термодинамічні аспекти. Значна увага приділена концепції інтегрованого управління водними ресурсами, що розглядає річковий басейн як єдину екологічну систему.

2. Досліджено з ентропійних позицій властивості екологічних систем річкових басейнів. Результатом впливу на екосистему антропогенного фактора буде зниження антиентропії компонентів. Реакція екосистеми буде різною залежно від сили та тривалості збурюючого впливу. Ентропія може виражати ступінь невизначеності або "безладу" в системі, що є аналогічним до кількості інформації, необхідної для опису стану системи. Повна інформація (нульова ентропія) відповідає стану з мінімальною невизначеністю, тоді як висока ентропія вказує на велику невизначеність і мінімальну кількість доступної інформації.

3. Оцінено антропогенний вплив на екологічну безпеку річкових басейнів. Проведено аналіз сезонної динаміки індексу забруднення води за річковими басейнами. Встановлено, що найвищі значення ІЗВ, що спостерігаються у кожному сезонному періоді, характерні для наступних постів: р. Уди, 41 км, с. Хорошево, міст (басейн Дону); р. Окни, 28 км, с. Лабушне, кордон з Молдовою (басейн Дністра); р. Уди, 3 км, с.Єсхар, ехн.в/з ГРЕС-2, міст (басейн Дону); р. Полтва, 30 км, с.Кам’янопіль, Пустомитівський р-н, кільцева дорога біля шлюзу (басейн Вісли); р. Хаджидер, 10,1 км, с. Сергіївка (басейн річок Причорномор'я); р. Південний Буг, 711 км, смт. Меджибіж, Меджибіжське вдсх. (басейн Південного Бугу); р. Каплань, 19 км, с. Крутоярівка, кордон з Молдовою (басейн річок Причорномор'я); р. Кальчик, 1 км, м. Маріуполь, місто (басейн річок Приазов'я); р. Дніпро, 855 км, Скидний канал БСА (басейн Дніпра); р. Південний Буг, 744 км, с. Копистин, нижче м.Хмельницький (басейн Південного Бугу); р. Казений Торець, 55 км, м. Дружковки, нижче впадіння нижче міста технічний в/забір (басейн Дону); р. Киргиж-Китай, 49 км, с. М. Ярославець, кордон з Молдовою (басейн Дону); р. Нерушай, 29,2 км, с. Баштанівка, у межах с. Баштанівка (басейн Дунаю); р. Лопань, 1 км, м. Харків, гирло (басейн Дону).

4. Розроблено методологію визначення ентропійно-зваженої оцінки якості поверхневих вод. Застосування ентропійних ваг підвищило об’єктивність ІЗВ. Методологія передбачає наступні етапи: побудову вихідної матриці проб води і оцінюваних параметрів; побудову нормованої матриці; обчислення ентропійних ваг, щоб параметрам з нижчою ентропією або мірою безпорядку присвоювалася таким чином більша вага; агрегація ваг ентропії та шкали оцінки якості.

5. Досліджено динаміку ентропійно-зваженого показника забрудненості води для річкових басейнів. Середнє значення ЕІЗВ для весни становить 0.65, що є найнижчим серед усіх періодів, вказуючи на вищу якість води. Взимку середнє значення зростає до 0.77, що може свідчити про невелике зниження якості води порівняно з весною. В період межені середнє значення ЕІЗВ дещо знижується до 0.71, що все ще вказує на добру якість води. Для мілководдя спостерігається різке збільшення середнього значення до 6.69, що свідчить про значне погіршення якості води. Восени середнє значення зберігається високим і становить 6.89, підтримуючи тенденцію погіршення якості води, зафіксовану в мілководді.

6. Розроблено метод аналізу вразливості водних ресурсів у нестабільному середовищі на основі ентропійного підходу. Ступінь вразливості водних ресурсів щодо мінливого середовища можна розділити на п’ять рівнів з 11 індексами: низький (I), незначний (II), помірний (III), високий (IV) і екстремальний (V). Розрахунок контактної ентропії показує приблизне значення контактної ентропії S із діапазоном (–1,314; 1,314). Цей інтервал ділиться на п'ять частин: [0,877; 1,314), [0,292; 0,877), [−0,292; 0,292), [−0,877; −0,292), (−1,314; − 0,877), позначаючи низький (I), незначний (II), помірний (III), високий (IV) та надмірний (V) ступені вразливості водних ресурсів відповідно.

7. Оцінено існуючі системи моніторингу вод в Україні. Державний моніторинг вод є складовою частиною державної системи моніторингу довкілля. Суб’єкти державного моніторингу вод самостійно визначають пункти моніторингу, перелік показників та періодичність їх вимірювання, загальноприйнята методологія регулювання розташування пунктів моніторингу відсутня.

8. Проаналізовано світовий досвід використання інформаційно-ентропійних підходів при здійсненні моніторингу води, останні застосування концепції ентропії для проектів систем моніторингу води, які класифікуються на опади; стік і рівень води; якість води; вологість ґрунту та підземні води. Також висвітлено інтегрований метод проектування багатофакторних систем моніторингу.

9. Розроблено науково-теоретичний підхід до проектування, оцінки та оптимізації систем моніторингу вод на основі принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації, що означає вибір таких даних для аналізу, які найбільш повно відображають потрібні характеристики моніторингового об'єкта, з мінімальною кількістю дублюючої або несуттєвої інформації, вибір локацій для вимірювань, частоти збору даних і типів параметрів води для аналізу здійснюється на основі їх інформативності.

10. Адаптовано запропоновану методологію на прикладі оптимізації мережі моніторингу на прикладі трьох річок: Південний Буг, Дністер та Сіверський Донець. Оптимізація пунктів спостереження на Південному Бузі була зосереджена на ділянках річки, що проходять через промислові та сільськогосподарські території, де ризик забруднення найвищий. Для Дністра особлива увага була приділена ділянкам з високим біорізноманіттям та зонам, що зазнають впливу гідроелектростанцій. На Сіверському Донці, через

неможливість міжнародної співпраці в галузі моніторингу трансграничних водотоків, акцент було зроблено на внутрішні методи моніторингу та аналізу, з метою ефективного виявлення та реагування на локальні джерела забруднення. Пункти моніторингу на Сіверському Донці були відібрані для забезпечення максимальної покривності критично важливих ділянок, особливо тих, що знаходяться в зонах інтенсивного промислового виробництва та сільськогосподарського використання.

11. Розроблено науково-теоретичний підхід для вибору оптимального числа параметрів якості води. Підхід на основі принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації дозволяє ідентифікувати лише параметри, які найбільше відповідають за забруднення річки. Оптимальний набір параметрів для оцінки якості води річки Південний Буг з мінімальною надмірністю включає: Фосфати, Нітрати, Кисень розчинений або БСК5, залежно від цілей моніторингу. Для р. Дністер: БСК5, Нітрати, Кисень розчинений або Сульфати. Для р. Сіверський Донець - Сульфати, БСК5, і Кисень розчинений або Завислі речовини, залежно від того, який з останніх двох параметрів краще відповідає цілям моніторингу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії та розділи в монографіях

1. Безсонний В.Л., Некос А.Н. Адаптація інтегрального показника екологічної безпеки води в умовах функціонування ЗБІ міста. *Зелено-блакитна інфраструктура в містах пострадянського простору: вивчення спадщини та підключення до досвіду країн V4*: колективна монографія / За ред. Н. В. Максименко, А. Д. Шкаруба. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2022. С.301–316.

Здобувач здійснив адаптацію інтегрального показника екологічної безпеки води, що враховує специфіку зелено-блакитної інфраструктури. Він розробив алгоритми кількісної оцінки впливу міських систем на стан водних ресурсів та запропонував інструменти для прогнозування змін екологічної ситуації в умовах інфраструктурного розвитку.

2. Безсонний В.Л. Забезпечення екологічної безпеки поверхневих джерел водопостачання в умовах упровадження положень Водної рамкової директиви ЄС [Електронний ресурс]: монографія. Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця. 2023. 114 с.

Статті у фахових наукових виданнях із переліку МОН України

3. Третьяков О.В., Безсонний В.Л., Пономаренко Р.В., Бородич П.Ю. Підвищення ефективності прогнозування впливу техногенного забруднення на поверхневі водойми. *Проблеми надзвичайних ситуацій.* 2019. № 1(29). С. 61–78.

Здобувач розробив алгоритми для моделювання впливу техногенного навантаження на поверхневі водойми, розрахував параметри математичних моделей для прогнозування розподілу забруднень у водоймах із урахуванням природних і техногенних чинників.

4. Безсонний В.Л. Моніторинг поверхневих джерел водопостачання в умовах впровадження водної рамкової директиви. *Комунальне господарство міст.* 2019. том 3, випуск 149. С. 69–76.

5. Безсонний В.Л., Пономаренко Р.В., Третьяков О.В., Калда Г.С., Асоцький В. В. Моніторинг екологічної безпеки водотоків за кисневими показниками. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека».* 10 (2/2021) С. 75–83.

Здобувач запропонував ефективну систему моніторингу водних екосистем на основі кисневих показників, які дозволяють оцінювати екологічний стан водойм.

6. Безсонний В.Л., Пономаренко Р. В., Третьяков О. В., Карпець К. М. Розробка алгоритму оптимального управління ризиками небезпечних подій на машинобудівному підприємстві. *Проблеми надзвичайних ситуацій.* 2021. № 1(33) С. 58–76.

Здобувач здійснив розробку алгоритму оптимального управління ризиками небезпечних подій на машинобудівному підприємстві, запропонувавши системний підхід до оцінки та мінімізації техногенних ризиків та математичне

моделювання для аналізу ймовірності виникнення небезпечних подій, що впливають на безпеку.

7. Безсонний В.Л., Пономаренко Р. В., Третьяков О. В., Бурменко О. А., Бородич П. Ю., Карпець К. М. Оцінка екологічного ризику внаслідок впливу комунальних об'єктів на поверхневі води. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2021. № 2(34) С. 58–76.

Здобувач виконав аналіз антропогенного навантаження на водні ресурси, використовуючи кількісні показники ризику та сучасні моделі екологічної безпеки.

8. Безсонний В.Л., Пономаренко Р.В., Третьяков О.В., Іванов Є.В., Бородич П.Ю., Луценко Т.О. Інтегральна оцінка екологічного стану Дніпровського водосховища. *Проблеми надзвичайних ситуацій.* 2022. №1(35). С. 209–227.

Здобувач обгрунтував використанняв інформаційно-ентропійний підходу для аналізу комплексних екологічних показників, що дозволило інтегрувати різнорідні дані про стан водного об'єкта в єдиний індикатор.

9. Безсонний В.Л., Пляцук Л.Д., Пономаренко Р.В., Третьяков О.В. Оцінка техногенно-екологічної безпеки водотоку за показниками ризику в умовах воєнної небезпеки. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека».* 12 (2/2022). С. 72–79.

Здобувачем розроблено концепцію оцінки екологічної безпеки водотоків у контексті ризиків воєнних дій, використано інформаційно-ентропійний підхід для аналізу змін стану водних об'єктів, а також запропонував сценарії мінімізації екологічних ризиків.

10. Безсонний В.Л. Вибір індикативного показниками екологічного стану поверхневого джерела водопостачання. *Комунальне господарство міст*, 2022, 3(170), 26–34.

11. Безсонний В.Л., Пляцук Л.Д., Третьяков О.В. Засоби математичного прогнозування оцінки екологічного стану поверхневих водних об'єктів. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. Київ. 2022. № 5(44). С. 64–68.

Здобувач запропонував і обґрунтував математичні моделі, що дозволяють точно аналізувати динаміку змін екологічних показників під впливом природних і антропогенних факторів.

12. Безсонний В.Л., Третьяков О.В., Пляцук Л.Д., Некос А.Н. Ентропійний підхід до оцінки екологічного стану водотоку. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія».* 2022. Вип. 27. С. 6–19.

Здобувач впровадив ентропійний підхід як інноваційний інструмент для оцінки екологічного стану водних об'єктів, запропонував методологію аналізу інформаційної складності екосистеми для прогнозування її реакції на антропогенне навантаження.

13. Безсонний В.Л., Некос А.Н., Сапун А.В. Екологічна оцінка якості води Канівського водосховища. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології.* 2022. Вип. 38. С. 85–96.

Здобувачем застосовано сучасні методи аналізу даних, зокрема інтегральні показники та ентропійні підходи, для визначення рівня впливу антропогенних чинників.

14. Безсонний В.Л. Методика оцінки екологічного стану водойми на основі ентропійно зваженого індексу якості води. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*, Київ. 2023. № 2(47). С. 44–48.

15. Безсонний В.Л., Пляцук Л.Д., Пономаренко Р.В., Третьяков О.В. Визначення екологічного стану Кременчуцького водосховища на основі інформаційної ентропії. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека».* 13 (1/2023). С. 20–26.

Здобувач реалізував методику визначення екологічного стану водосховища за допомогою ентропійного аналізу, яка дозволяє інтегрувати великий обсяг екологічної інформації в єдиному індикаторі, розробив критерії стійкості водної екосистеми до впливу антропогенних факторів.

16. Безсонний В.Л., Пляцук Л.Д., Третьяков О.В. Аналіз екологічного стану Каховського водосховища на підставі ентропійного індексу. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.* № 1 (490) 2023. С. 198–208.

Здобувачем розроблено методику визначення ентропійних вагових коефіцієнтів для вдосконалення індексу забрудненості води.

17. Безсонний В.Л. Реалізація концепції інформаційної ентропії при створенні мереж моніторингу вод. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*, Київ. 2023. № 3(48). С. 138–142.

18. Безсонний В.Л. Термодинамічні підходи в дослідженнях екологічних проблем. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія».* 2023. Вип. 28. С. 30–41.

19. Безсонний В.Л. Метод аналізу вразливості водних ресурсів у нестабільному середовищі на основі ентропійного підходу. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології,* 2023. Вип. 39, С. 65–76.

20. Безсонний В.Л. Ранжування екологічного стану поверхневих вод Дніпропетровської області за вдосконаленим показником якості. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.* № 2–3 (491–492) 2023. С.146-152.

21. Безсонний В.Л., Третьяков О.В., Пляцук Л.Д., Пономаренко Р. В. Застосування принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації для вибору оптимального числа параметрів якості води. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*, 15(1/2024). С.46–53.

Здобувач запропонував нову методологію для оптимізації вибору параметрів якості води, базуючись на принципі максимальної інформативності та мінімальної надмірності даних.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях, які індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science

22. Bezsonnyi V.L., Tretyakov O.V., Asotskyi V.V., Ponomarenko R.V. Production risk management in the foundry. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020, (1). P. 123–129. (**Scopus, Q3**)

Здобувач розробив підходи до управління виробничими ризиками, враховуючи вплив екологічних факторів, створив моделі для оцінки впливу технологічних процесів на навколишнє середовище.

23. Bezsonnyi V., Ponomarenko R., Tretyakov O., Asotsky V., Kalynovskyi A. Regarding the Choice of Composite Indicators of Ecological Safety of Water in the Basin of the Siversky Donets. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2021, N30, P. 622–631. (**WoS**).

Здобувач розробив підходи до вибору інтегральних показників для оцінки екологічної безпеки вод у басейні річки Сіверський Донець, використав інформаційно-ентропійний підхід для визначення ключових параметрів, що впливають на стійкість водного об'єкту.

24. Безсонний В., Третьяков О., Шерстюк М., Некос А. Термодинамічні аспекти системного підходу в екології. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»,* (2022, №57, С. 268–281. **(Scopus, WoS).**

Здобувач дослідив застосування законів термодинаміки для моделювання взаємодій у природних і антропогенних екосистемах, акцентуючи увагу на енергетичному балансі та ентропійних показниках.

25. Безсонний В. Використання ентропійного підходу в системах моніторингу водних ресурсів. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»,* 2023, №58, С. 302–320. **(Scopus, WoS).**

26. Bezsonnyi V., Plyatsuk L., Ponomarenko R., Asotskyi V., Tretyakov O., Zhuravskij M. Integrated assessment of the surface source of water supply according to environmental-risk indicators. *Journal of Geology, Geography and Geoecology,* 2023, №32(3), 461–473. **(WoS).**

Здобувач розробив інтегральний підхід до оцінки екологічних ризиків для поверхневих джерел водопостачання на основі використання інформаційної ентропії для кількісного визначення впливу антропогенних факторів.

27. Bezsonnyi V. Assessment of Environmental Risks from the Impact of Domestic and Industrial Effluents. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, European Association of Geoscientists & Engineers. 2022, Volume 2022, P. 1–5. (**Scopus**)

28. Bezsonnyi V., Plyatsuk L., Ponomarenko R., Tretyakov O. Assessment of ecological safety of a surface water object. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment.* European Association of Geoscientists & Engineers. Volume 2023, P. 1–5. (**Scopus**)

Здобувач застосував інформаційно-ентропійний підхід для оцінки екологічної безпеки поверхневих водних об'єктів шляхом інтеграції кількісних і якісних параметрів екологічного стану у зручний для практичного використання індекс безпеки.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

29. Безсонний В.Л. Modeling of integrated indicators of the environmental state of surface water. *International Trends in Science and Technology.* Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference Vol.1, January 31, 2019, Warsaw, Poland. RS Global Sp. z O.O. P. 29–33.

30. Безсонний В.Л. Узагальнена структура інформаційного забезпечення систем моніторингу довкілля. *Інформаційні технології та системи.* Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції: тези доповідей, 10-11 квітня 2019 р., ХНЕУ ім. С. Кузнеця. Х. ФОП Бровін О.В., 2019. С. 20.

31. Безсонний В.Л., Кобзін В.Г. Аналіз досвіду впровадження інтегрованого управління екологічною безпекою водних ресурсів. *Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління.* Матеріали дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції 11.04.2019 р. Баку-Харків-Жиліна. ДП «Харківський НДІ технології машинобудування». 2019. С. 78.

32. Безсонний В.Л. Зміна екологічного стану водних об'єктів під час аварійних та несанкціонованих скидів забруднень. *Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*. Матеріали дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції 11–12 квітня 2019 р. Баку-Харків-Жиліна. ДП «Харківський НДІ технології машинобудування». 2019. С.8

33. Безсонний В.Л. Транскордонне співробітництво у вирішенні проблем екологічної безпеки поверхневих вод. *VinSmartEco*. Збірник матеріалів І Міжнародної науково-практичної конференції (16.05.19, м.Вінниця, Україна). Вінниця: КВНЗ, Вінницька академія неперервної освіти, 2019. С. 64–66.

34. Безсонний В.Л. Басейновий підхід як основний інструмент державного управління водними ресурсами. *Державне управління у сфері цивільного захисту*: наука, освіта, практика: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 17–18 травня 2019 р. Х.: Вид-во НУЦЗУ, 2019. С. 171–174.

35. Безсонний В.Л. Вдосконалення системи екологічного моніторингу вод з урахуванням вимог водної рамкової директиви ЄС. *Еко Форум–2019*: ІІІ спеціалізований міжнар. Запорізький екологічний форум, 29–31 трав. 2019 р.: зб. тез доповідей. Запорізька міська рада, Запорізька торгово-промислова палата. Запоріжжя: Запорізька торгово-промислова палата, 2019. С. 93–94.

36. Безсонний В.Л. Впровадження інтегрованого управління водними об'єктами – досвід Європейського Союзу. *Проблеми екології та енергозбереження*: Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції. 20–22 вересня 2019 р. Миколаїв: Видавець Торубара В. В., 2019. С. 136–139.

37. Безсонний В. Л., Третьяков О. В., Буц Ю. В. Охорона поверхневих джерел водопостачання від антропогенного впливу (на прикладі р. Сіверський

Донець). *Проблеми екологічної безпеки*: XVII міжнар. наук.-техн. конф., 2–4 жовт. 2019 р.: зб. наук. праць. Кременчук, 2019. С. 100–104.

38. Безсонний В.Л., Третьяков О.В., Буц Ю.В. Європейський досвід управління природокористуванням та регіональною екологічною політикою. *Регіон–2019: стратегія оптимального розвитку*: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., (м. Харків, 16–17.10.2019 р.). Х.: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2019. С. 123–126.

39. Безсонний В.Л., Третьяков О.В., Дашковська О.В. Моделювання динаміки індикаторних показників при оцінці якості та безпечності поверхневих джерел питної води. *Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки*. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференція. м. Київ, 14–15 листопада 2019 р. К.: НУХТ, 2019. С. 62–64.

40. Безсонний В.Л., Гаркавий Д. М., Петько А. А., Співак В. Б. Сучасні проблеми забруднення довкілля. *Perspectives of world science and education*. Abstracts of the 9th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Osaka, Japan. may 20–22, 2020. P. 295–300.

41. Безсонний В.Л., Третьяков О.В. Прогнозна модель динаміки екологічного стану поверхневих вод. *Проблеми екологічної безпеки.* Збірник наукових праць XVIII міжнародної науково-технічної конференції. 6–8 жовтня 2020 р. Кременчук. С. 18–21.

42. Безсонний В.Л. Метрологічні аспекти контролю якості довкілля. *Екологічна безпека – сучасні напрямки та перспективи вищої освіти:* зб. тез доповідей I Міжнародної інтернет-конференції (м. Харків, 25 лютого 2021 року). Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2021. С. 16–18.

43. Безсонний В.Л. Технічні методи та засоби забезпечення техногенної безпеки як невід'ємний компонент підготовки фахівця з екологічної безпеки. *Екологічна безпека – сучасні напрямки та перспективи вищої освіти*: зб. тез доповідей I Міжнародної інтернет-конференції (м. Харків, 25 лютого 2021 року). Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2021. С. 19–20.

44. Безсонний В.Л., Третьяков О.В. До питання визначення ризику поверхневих джерел водопостачання. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження.* Збірник матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 203-річчю Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Україна, Полтава, 2–3 грудня 2021 року), Полтава, 2021, С. 64–67.

45. Безсонний В.Л. Досвід управління водними ресурсами у країнах ЄС. *Сучасні проблеми екологічного контролю та аудиту:* зб. тез доповідей II Міжнародної інтернет-конференції (м. Харків, 23 лютого 2022 року). Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2022. С. 17–19.

46. Безсонний В.Л., Третьяков О.В., Дашковська О.В. Аналіз екологічного ризику водних об'єктів в умовах воєнної небезпеки. *Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки*. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, 25-26.10.2022 р. К.: НУХТ, 2022. С.150–152.

47. Bezsonnyi V., Nekos A. Modeling of the Oxygen Regime of the Chervonooskilsky Reservoir. *Monitoring of Geological Processes and Ecological*

Condition of the Environment, Proceedings of 16th International Conference, held in Kyiv, Ukraine, November 15–18, 2022. P. 1–5.

48. Безсонний В., Некос А. Аналіз екологічних ризиків Дніпровського водосховища. *Environment recovery and reconstruction: War context 2022*: Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції (17–18 листопада 2022 року, Полтава). Полтава : НУПП, 2022. С. 28–29.

49. Безсонний В.Л., Шерстюк М.М. Оцінка екологічного стану водного об'єкту на основі ентропійнийного підхіду. *Progressive research in the modern world. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference*. BoScience Publisher. Boston, USA. 2023. P. 259–265.

50. Безсонний В.Л. Оцінка техногенної безпеки водних ресурсів на основі ентропійного підходу. *Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво – 2023*. Збірка матеріалів XXV Міжнародної науково-практичної конференції (27–28 квітня 2023 року). Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2023. С. 95–97.

51. Безсонний В., Пляцук Л., Третьяков О. Ентропійна оцінка техногенної безпеки водних ресурсів. *Екологічні проблеми сучасності* [Електронний ресурс]: збірник матер. I Міжнародної науково-практичної конференції (Луцьк, 10 травня 2023 р.). Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет». Луцьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2023. С. 5–8.

52. Безсонний В.Л., Третьяков О.В. Визначення екологічної безпеки водних ресурсів на основі ентропійного підходу. *Актуальні проблеми дослідження довкілля:* Матеріали X Міжнародної наукової конференції (Суми-Тростянець, 25-27 травня 2023 р.,) Суми: Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, 2023. С. 238–241.

53. Безсонний В.Л. Основні принципи водної політики Європейського Союзу. *Галузеві проблеми екологічної безпеки – 2023*. Міжнародна науково-практична конференція за участю молодих науковців Харків, ХНАДУ, 26 жовтня 2023 р. С.24–27.

54. Bezsonnyi V., Nekos A.. Analysis of the environmental risk of water bodies in conditions of military danger. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 17th International Conference 7–10 November 2023. Kyiv, Ukraine, Volume 2023, P. 1–5.

55. Безсонний В.Л., Третьяков О.В. Інформаційно-ентропійні методи аналізу ризиків та управління надійністю в системах критичної інфраструктури. *Проблеми інформатизації.* Тези доповідей одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції 16–17 листопада 2023 року. Том 2: секції 3, 6. Баку–Харків– Бельсько–Бяла. 2023. С. 78.

56. Безсонний В.Л., Третьяков О.В., Доронін Є.В. Оптимізація систем захисту критичної інфраструктури на основі інформаційної ентропії. *Проблеми інформатизації.* Тези доповідей одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції 16–17 листопада 2023 року. Том 2: секції 3, 6. Баку–Харків–Бельсько–Бяла. 2023. С. 79.

57. Безсонний В.Л., Некос А.Н. Моніторинг поверхневих вод відповідно до водної рамкової директиви – досвід Німеччини. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження» – 2023:* Збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції 7–8 грудня 2023 р. Полтава: НУПП, 2023. С. 16–19.

58. Безсонний В. Л., Третьяков О. В., Дашковська О. В. Використання принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації для вибору оптимального числа параметрів якості води. *Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво – 2024:* зб. мат. XXVI Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 17-18 квітня 2024 року). Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. С. 80–82.

59. Безсонний В. Л., Третьяков О. В., Дашковська О. В. Застосування максимальної інформативності за мінімальної надмірності при оптимізації набору параметрів оцінки небезпеки. *Актуальні проблеми та перспективи розвитку охорони праці, безпеки життєдіяльності та цивільного захисту*: мат-ли VI Міжнародної наук.- практ. конф. Одеса: ОДАБА, 2024. С. 134 – 137.

60. Безсонний В., Пляцук Л., Третьяков О. Принцип мінімізації надлишковості в оцінці екологічних загроз: вибір набору оптимальних параметрів. *Екологічні проблеми сучасності [Електронний ресурс]* : зб. матер. II Міжнар. наук.-практ. конф. (Луцьк, 10 травня 2024 р.) / Держ. вищ. навч. заклад «Донецький національний технічний університет». – Луцьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2024. С. 68–70.

АНОТАЦІЯ

Безсонний В.Л. Науково-теоретичні основи управління екологічною безпекою річкового басейну на основі інформаційно-ентропійного підходу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. Суми, Сумський державний університет, 2025. Спеціалізована вчена рада Д 55.051.04.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-теоретичної проблеми розробки та застосування науково-теоретичних основ інформаційно-ентропійних підходів для управління екологічною безпекою річкових басейнів. Основна увага зосереджена на дослідженні та використанні інформаційно-ентропійних принципів для підвищення ефективності оцінки та оптимізації моніторингу стану водних ресурсів.

Проведено системний аналіз теоретичних основ інформаційно-ентропійних підходів в екологічній безпеці та їх застосування для вивчення екологічних проблем. Досліджено з інформаційно-ентропійно позицій властивості екологічних систем річкових басейнів. Оцінено антропогенний вплив на екологічну безпеку річкових басейнів. Проведено аналіз сезонної динаміки індексу забруднення води за річковими басейнами.

Розроблено методологію визначення ентропійно-зваженої оцінки якості поверхневих вод.

Досліджено динаміку ентропійно-зваженого показника забрудненості води для річкових басейнів.

Розроблено науково-теоретичний підхід до проектування, оцінки та оптимізації систем моніторингу вод на основі принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації, що означає вибір таких даних для аналізу, які найбільш повно відображають потрібні характеристики моніторингового об'єкта, з мінімальною кількістю дублюючої або несуттєвої інформації, вибір локацій для вимірювань, частоти збору даних і типів параметрів води для аналізу здійснюється на основі їх інформативності.

Адаптовано запропоновану методологію оптимізації мережі моніторингу на прикладі трьох річок: Південний Буг, Дністер та Сіверський Донець.

Розроблено науково-теоретичний підхід для вибору оптимального числа параметрів якості води на основі принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації, що дозволяє ідентифікувати лише параметри, які найбільше відповідають за забруднення річки.

Практична значущість роботи підтверджена актами впровадження у виробничий і навчальний процеси.

Ключові слова: екологічна безпека, індекс забрудненості води, інформаційна ентропія, моніторинг, поверхневий водний об’єкт, річковий басейн, термодинаміка.

ABSTRACT

Bezsonnyi V.L. Scientific and theoretical foundations for managing the environmental safety of a river basin based on the information-entropy approach. – Qualifying scientific work on the manuscript.

Thesis for a Doctor of Engineering Sciences Degree by specialty 21.06.01 – ecological safety. Sumy, Sumy State University, 2025. Specialized Academic Council D 55.051.04.

The dissertation focuses on solving the scientific-theoretical problem of developing and applying scientific-theoretical foundations of information-entropy approaches for managing the environmental safety of river basins. The primary emphasis is placed on researching and applying information-entropy principles to enhance the effectiveness of assessing and optimizing the monitoring of water resource conditions.

A systematic analysis of the theoretical foundations of information-entropy approaches in environmental safety and their application to studying ecological problems has been conducted. The properties of ecological systems of river basins have been studied from information-entropy perspectives. The anthropogenic impact on the environmental safety of river basins has been assessed. The seasonal dynamics of the water pollution index across river basins have been analyzed.

A methodology for determining the entropy-weighted assessment of surface water quality has been developed. The dynamics of the entropy-weighted water pollution index for river basins have been studied.

A scientific-theoretical approach has been developed for designing, evaluating, and optimizing water monitoring systems based on the principle of maximum informativeness with minimum redundancy of information. This implies selecting data for analysis that most comprehensively reflect the required characteristics of the monitoring object with minimal duplication or irrelevant information. The choice of measurement locations, data collection frequency, and types of water parameters for analysis is made based on their informativeness.

The proposed methodology for optimizing the monitoring network has been adapted using the example of three rivers: the Southern Bug, the Dniester, and the Siverskyi Donets.

A scientific-theoretical approach has been developed for selecting the optimal number of water quality parameters based on the principle of maximum informativeness with minimum redundancy of information, which allows identifying only the parameters most responsible for river pollution.

The practical significance of the study has been confirmed by implementation acts in production and educational processes.

Keywords: environmental safety, water pollution index, information entropy, monitoring, surface water body, river basin, thermodynamics.

Підписано до друку 28.02.2025.
Формат 60×90/16. Ум. друк. арк. 2,6. Обл.-вид. арк. 1,9. Тираж 100 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Харківська, 116, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.