

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут нафтогазової інженерії
Кафедра Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці

Федорків Андрій Іванович

УДК 504.5:556.3:628.161.2
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Моніторинг рівня нітратного забруднення підземних вод у
сільськогосподарських регіонах.
(назва роботи)

Технології захисту навколишнього середовища
(назва освітньої програми)

183 Технології захисту навколишнього середовища
(шифр і назва спеціальності)

Здобувач освітнього ступеня _____ А.І. Федорків

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Лопушняк В.І. д. с.г. н., професор
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківськ-2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
 Інститут нафтогазової інженерії
 Кафедра Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці
 ОПІ Технології захисту навколишнього середовища

Затверджую
 Зав. кафедри ТЗБП
 Галина ГРИЦУЛЯК _____
 (ім'я та прізвище) (підпис)
 «___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Федорків Андрій Іванович
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Моніторинг рівня нітратного забруднення підземних вод у сільськогосподарських регіонах»

керівник роботи: Лопушняк В.І. д. с.г. н., професор
 (ім'я, прізвище, науковий ступінь, вчене звання керівника)

затверджені наказом університету від 15 » 10 2025р. № №636/7

2 Термін здачі закінченої роботи «12» 12 2025 р.

3 Вихідні дані до роботи:

- Наукові публікації, монографії та статистичні матеріали щодо впливу фармацевтичних забруднювачів на довкілля.
- Картографічні матеріали масштабу 1:10 000–1:50 000.
- Пояснювальна записка (магістерська робота), обсяг 70–90 сторінок.
- Аналітичні таблиці та графіки результатів досліджень.
- Картографічні матеріали (карти ізоліній або GIS-шари з розподілом нітратів).
- Додатки: карти-схеми району дослідження, форми протоколів аналізів, фотоматеріали.

Календарний план виконання магістерської роботи

№	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1	Вступ Розділ 1 Теоретичні основи дослідження нітратного забруднення гідросфери	до 01.10.25	

2	Розділ 2. Характеристика району досліджень та методика проведення робіт	до 20.10.25	
4	Розділ 3. Оцінка стану нітратного забруднення підземних вод	до 01.12.25	
5	Розділ 4. Заходи щодо покращення якості підземних вод та удосконалення системи моніторингу	до 05.12.25	
	Розділ 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	до 08.12.25	
6	Висновки Літературні джерела Додатки	до 10.12.25	

Студент _____ Андрій ФЕДОРКІВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ д. с.г. н., професор Василь ЛОПУШНЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота присвячена комплексному дослідженню нітратного забруднення підземних вод у сільськогосподарських регіонах на прикладі території с. Вістова Калуського району Івано-Франківської області. Актуальність теми зумовлена інтенсивним використанням азотних добрив, органічних відходів тваринництва та недосконалістю систем побутового водовідведення, що призводить до формування стійких осередків хімічного забруднення верхніх водоносних горизонтів.

Метою роботи є оцінка рівня нітратного забруднення підземних вод, аналіз просторових та сезонних закономірностей поширення нітратів, визначення основних факторів, що формують якість підземних вод, та розроблення природоохоронних заходів щодо зниження нітратного навантаження.

Об'єктом дослідження є підземні води верхнього водоносного горизонту сільськогосподарської території.

Предмет дослідження — вміст нітратів, умови їх міграції та чинники формування забруднення у ґрунтово-водному середовищі.

У роботі використано комплекс методів: гідрогеологічний аналіз, польові вимірювання рівнів ґрунтових вод, відбір та лабораторний аналіз проб, статистична обробка результатів, GIS-аналіз просторової диференціації забруднення, порівняльний аналіз даних різних сезонів.

Отримано такі основні результати:

- встановлено, що підземні води досліджуваної території є вразливими до інфільтраційних процесів через мілке залягання водоносного горизонту (1,5–5 м) та високу водопроникність ґрунтів;
- виявлено значні просторові коливання концентрацій нітратів, найвищі з яких зафіксовано у зонах господарської забудови, поблизу вигрібних ям, тваринницьких дворів та інтенсивно удобрюваних земель;

- встановлено сезонну динаміку забруднення: максимальні концентрації припадають на весняний період унаслідок промивання ґрунтів талою водою та надходження мінералізованих поверхневих стоків;
- підтверджено, що у ряді випадків концентрації нітратів перевищують гігієнічні нормативи, що створює ризики для здоров'я населення (зокрема, розвиток метгемоглобінемії у дітей);
- визначено ключові фактори впливу — агротехнічні практики, тип землекористування, рельєф, санітарний стан колодязів та побутових систем водовідведення.

Наукова новизна роботи полягає у комплексній оцінці просторово-сезонних закономірностей формування нітратного забруднення у конкретному агроландшафті Передкарпаття та адаптації сучасних підходів моніторингу до локальних умов сільської території.

Практичне значення полягає у розробленні системи заходів щодо зменшення нітратного навантаження: оптимізація внесення азотних добрив, облаштування санітарних зон навколо криниць, удосконалення систем утримання органічних відходів, запровадження технологій очищення води (денітрифікація, іонний обмін, зворотний осмос), а також рекомендацій щодо створення локальної мережі моніторингу підземних вод.

Результати роботи можуть бути використані органами місцевого самоврядування, природоохоронними службами, водогосподарськими організаціями та власниками домогосподарств для оцінки екологічного стану територій та планування заходів із захисту підземних вод.

Ключові слова: нітрати, підземні води, забруднення, агроландшафт, моніторинг, ґрунтові води, сезонна динаміка, екологічні ризики, якість питної води.

ABSTRACT

The master's thesis is devoted to a comprehensive study of nitrate pollution of groundwater in agricultural regions using the example of the territory of the village of Vistova, Kaluska district, Ivano-Frankivsk region. The topicality of the topic is due to the intensive use of nitrogen fertilizers, organic waste from animal husbandry and the imperfection of domestic water drainage systems, which leads to the formation of stable foci of chemical pollution of the upper aquifers.

The purpose of the work is to assess the level of nitrate contamination of groundwater, analyze the spatial and seasonal patterns of nitrate distribution, determine the main factors that shape the quality of groundwater, and develop environmental protection measures to reduce the nitrate load.

The object of the study is the underground water of the upper aquifer of the agricultural area.

The subject of research is the content of nitrates, conditions of their migration and factors of pollution in the soil-water environment.

The work uses a set of methods: hydrogeological analysis, field measurements of groundwater levels, sampling and laboratory analysis of samples, statistical processing of results, GIS analysis of spatial differentiation of pollution, comparative analysis of data from different seasons.

The following main results were obtained:

- it was established that the groundwater of the studied area is vulnerable to infiltration processes due to the shallow aquifer (1.5–5 m) and high water permeability of the soil;

- significant spatial fluctuations of nitrate concentrations were found, the highest of which were recorded in areas of economic development, near cesspools, livestock yards and intensively fertilized lands;

- the seasonal dynamics of pollution have been established: the maximum concentrations occur in the spring period as a result of soil washing with melt water and the arrival of mineralized surface runoff;

- it has been confirmed that in some cases the concentration of nitrates exceeds hygienic standards, which creates risks for public health (in particular, the development of methemoglobinemia in children);

- the key factors of influence are determined — agrotechnical practices, land use type, topography, sanitary condition of wells and household drainage systems.

The scientific novelty of the work consists in a comprehensive assessment of the spatial and seasonal patterns of formation of nitrate pollution in the specific agrolandscape of Transcarpathia and the adaptation of modern monitoring approaches to the local conditions of the rural area.

The practical significance lies in the development of a system of measures to reduce the nitrate load: optimization of the application of nitrogen fertilizers, arrangement of sanitary zones around wells, improvement of organic waste retention systems, introduction of water purification technologies (denitrification, ion exchange, reverse osmosis), as well as recommendations for the creation of a local groundwater monitoring network.

The results of the work can be used by local self-government bodies, environmental protection services, water management organizations and household owners to assess the ecological state of the territories and plan measures to protect groundwater.

Key words: nitrates, groundwater, pollution, agricultural landscape, monitoring, groundwater, seasonal dynamics, ecological risks, drinking water quality.

ЗМІСТ

	ст.
ВСТУП.....	10
1 РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ НІТРАТНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ГІДРОСФЕРИ.....	13
1.1. Джерела надходження нітратів у підземні води в агроландшафтах	13
1.2. Вплив нітратного забруднення на довкілля та здоров'я населення.....	17
1.3. Сучасні підходи до організації системи моніторингу (мережа спостережних свердловин).....	20
2 РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ.....	26
2.1. Фізико-географічна характеристика досліджуваного регіону	26
2.2. Гідрогеологічні умови території.....	28
2.3. Матеріали та методи дослідження	30
3 РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА СТАНУ НІТРАТНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД.....	35
3.1. Просторова диференціація вмісту нітратів у підземних водах.....	35
3.2. Сезонна динаміка концентрації нітратів.....	39
3.3. Встановлення залежності між типом землекористування та якістю води	41
4 РОЗДІЛ 4. ЗАХОДИ ЩОДО ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ПІДЗЕМНИХ ВОД ТА УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ.....	47
4.1. Оптимізація сільськогосподарської діяльності.....	47

4.2.Технології очищення води від нітратів (Делітратизація).....	50
4.3.Пропозиції щодо вдосконалення мережі моніторингу.....	59
5 РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	62
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68

ВСТУП

Підземні води є одним із найважливіших джерел питного водопостачання, особливо для сільських населених пунктів, де відсутні централізовані системи водопроводу. Якість цих вод значною мірою визначає рівень екологічної безпеки, стан здоров'я населення та стійкість функціонування природних і аграрних екосистем. В умовах інтенсифікації сільського господарства, застосування великих обсягів мінеральних добрив, органічних відходів тваринництва та недосконалих систем побутового водовідведення проблема нітратного забруднення підземних вод набула особливої актуальності. Висока розчинність та мобільність нітратів у ґрунтово-водному середовищі сприяє їх швидкому проникненню у верхні водоносні горизонти, що створює реальні ризики для здоров'я людей та порушує процеси природного самоочищення екосистем.

Нітратне забруднення є найбільш поширеним видом хімічного навантаження на агроландшафти Європи та України. Особливо вразливими є регіони з легкими за гранулометричним складом ґрунтами, мілким заляганням підземних вод і високою інтенсивністю землекористування, до яких належить і територія Калуського району Івано-Франківської області. У сільській місцевості, де питна вода надходить переважно з шахтних криниць, концентрації нітратів нерідко перевищують гігієнічні норми (50 мг/дм^3), що може спричинити серйозні порушення здоров'я, зокрема розвиток метгемоглобінемії в дітей раннього віку та утворення канцерогенних нітрозамінів.

Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю комплексної оцінки стану підземних вод, ідентифікації джерел нітратного навантаження, встановлення просторових та сезонних закономірностей забруднення, а також розроблення природоохоронних заходів, що сприятимуть підвищенню

рівня екологічної безпеки території. Важливою складовою дослідження є вивчення умов формування підземних вод і сучасних підходів до їх моніторингу, включно з використанням інструментальних методів, геоінформаційних технологій та прогнозного аналізу.

Метою магістерської роботи є комплексний моніторинг нітратного забруднення підземних вод у сільськогосподарському регіоні та визначення закономірностей його формування для розроблення ефективних природоохоронних заходів.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

- проаналізувати теоретичні аспекти нітратного забруднення водних ресурсів та його екологічні наслідки;
- охарактеризувати фізико-географічні та гідрогеологічні умови території дослідження;
- здійснити відбір проб та лабораторний аналіз підземних вод із визначенням концентрацій нітратів;
- встановити просторову диференціацію та сезонну динаміку нітратного забруднення;
- визначити основні природні та антропогенні чинники, що формують рівень забруднення;
- запропонувати комплекс заходів щодо зменшення нітратного навантаження та вдосконалення системи моніторингу підземних вод.

Об'єктом дослідження є підземні води верхнього водоносного горизонту сільськогосподарського регіону.

Предметом дослідження — рівень нітратного забруднення, механізми міграції нітратів у ґрунтово-водному середовищі та чинники, що впливають на формування їх концентрацій.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для оцінки екологічного стану території, прийняття управлінських рішень у сфері охорони водних ресурсів, формування санітарно-захисних зон, оптимізації агротехнічних заходів та інформування населення щодо ризиків вживання води з підвищеним вмістом нітратів. Запропоновані заходи можуть бути впроваджені органами місцевого самоврядування, водогосподарськими службами та сільськогосподарськими підприємствами.

Таким чином, вступ обґрунтовує вибір теми, її наукову та практичну значущість, визначає логіку виконання магістерської роботи та окреслює основні напрями дослідження, спрямовані на розв'язання актуальної екологічної проблеми нітратного забруднення підземних вод.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ НІТРАТНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ГІДРОСФЕРИ

1.1. Джерела надходження нітратів у підземні води в агроландшафтах

Нітратне забруднення підземних вод в агроландшафтах є однією з найбільш актуальних екологічних проблем сучасності, що зумовлено інтенсифікацією сільськогосподарського виробництва, широким застосуванням мінеральних та органічних добрив, змінами у структурі землекористування та антропогенними порушеннями природних механізмів самоочищення ґрунтово-водних систем. Нітрат-іони характеризуються високою розчинністю та слабким зв'язуванням із ґрунтовими частинками, що робить їх мобільними у ґрунтовому профілі та сприяє їх швидкій міграції в підземні води. Унаслідок цього навіть невеликі надлишки азоту, що не засвоюються рослинами, здатні вимиватися у водоносні горизонти [1, 23].

Одним із наймасштабніших джерел є внесення мінеральних азотних добрив, зокрема карбаміду, аміачної селітри та складних мінеральних сумішей. Недотримання норм внесення, неправильне визначення строків та умов удобрення, поєднане з надмірним зрошенням або високими атмосферними опадами, сприяє прискореному переходу азоту в нітратну форму та його інтенсивному вимиванню. Нітрифікація, яка відбувається за участю ґрунтових бактерій *Nitrosomonas* і *Nitrobacter*, перетворює амонійний та органічний азот у мобільні нітрати, що швидко проникають у глибші частини ґрунту, особливо на легких та структурно нестійких ґрунтах [18, 33].

Другим важливим чинником є органічні відходи тваринництва, включно з гноєм, гноївкою, стічними водами тваринницьких комплексів та пташиним послідом. У процесі мінералізації органічних речовин відбувається вивільнення азоту, який потім переходить у нітратну форму.

Неконтрольоване зберігання гною, відсутність герметичних майданчиків, витікання фільтратів та недосконалі системи утилізації відходів призводять до прямої інфільтрації азотовмісних сполук у підземні води. Особливо високий ризик спостерігається на територіях, де рівень ґрунтових вод є низьким, а породи мають значну водопроникність [14, 36].

Вагомий внесок у нітратне навантаження становлять побутові стоки у сільській місцевості, оскільки вигрібні ями та примітивні септики часто не мають герметичного дна чи стінок. Рідкі фракції, що містять амоній, нітрити та нітрати, легко інфільтрують у підземні горизонти, спричиняючи локальне, але інтенсивне забруднення. Подібна ситуація посилюється в регіонах із слабкою системою каналізації та високою щільністю заселення [18, 39].

Окремим, хоча менш істотним на фоні аграрних джерел, є внесок атмосферних депозитів азоту. Викиди оксидів азоту промисловими підприємствами та транспортом сприяють утворенню в атмосфері нітратної та азотистої кислот, які з опадами надходять у ґрунт. У промислових районах цей шлях надходження може становити значну частку загального азотного навантаження [6, 13].

Зрошувальні системи, особливо у регіонах, де використовується вода з підвищеним вмістом азоту, також можуть бути джерелами нітратів. Постійне надходження мінералізованої води в ґрунт призводить до вимивання азоту та збільшення інфільтраційних потоків. Нераціональне зрошення руйнує структуру ґрунту, підвищує фільтраційну здатність та сприяє вертикальному перенесенню нітратів до водоносних горизонтів [16, 29].

Порушення природних екосистем унаслідок розорювання ґрунтів, знищення лісосмуг, деградації дернового покриву та інтенсивного землекористування призводить до зниження природної здатності ґрунтів до денітрифікації. У природних екосистемах значна частина нітратів повертається в атмосферу у вигляді азоту завдяки діяльності

денітрифікуючих бактерій. В агроландшафтах цей механізм істотно послаблений, що сприяє накопиченню азоту в профілі та його подальшій міграції у підземні води [19, 34].

Таблиця 1.1. Основні джерела надходження нітратів у підземні води агроландшафтів

Джерело	Характеристика	Механізм надходження
Мінеральні азотні добрива	Аміачна селітра, карбамід, комплексні добрива	Нітрифікація → вимивання
Органічні добрива та відходи тваринництва	Гній, гноївка, послід, фільтрати	Мінералізація → інфільтрація
Побутові стоки	Вигрібні ями, негерметичні септики	Пряма інфільтрація
Атмосферні опади	Депозиція NO_x , кислотні дощі	Осідання азоту → інфільтрація
Зрошення	Вода з залишковими концентраціями азоту	Вертикальна міграція
Природні процеси	Мінералізація органіки	Фонове надходження
Природні процеси	Мінералізація органіки	Фонове надходження
Джерело	Характеристика	Механізм надходження
Мінеральні азотні добрива	Аміачна селітра, карбамід, комплексні добрива	Нітрифікація → вимивання

Таким чином, джерела нітратного забруднення підземних вод формують складну систему взаємопов'язаних природних і антропогенних факторів, серед яких домінують аграрна діяльність, тваринництво, побутове водовідведення, промислові викиди та зрошення [11, 30].

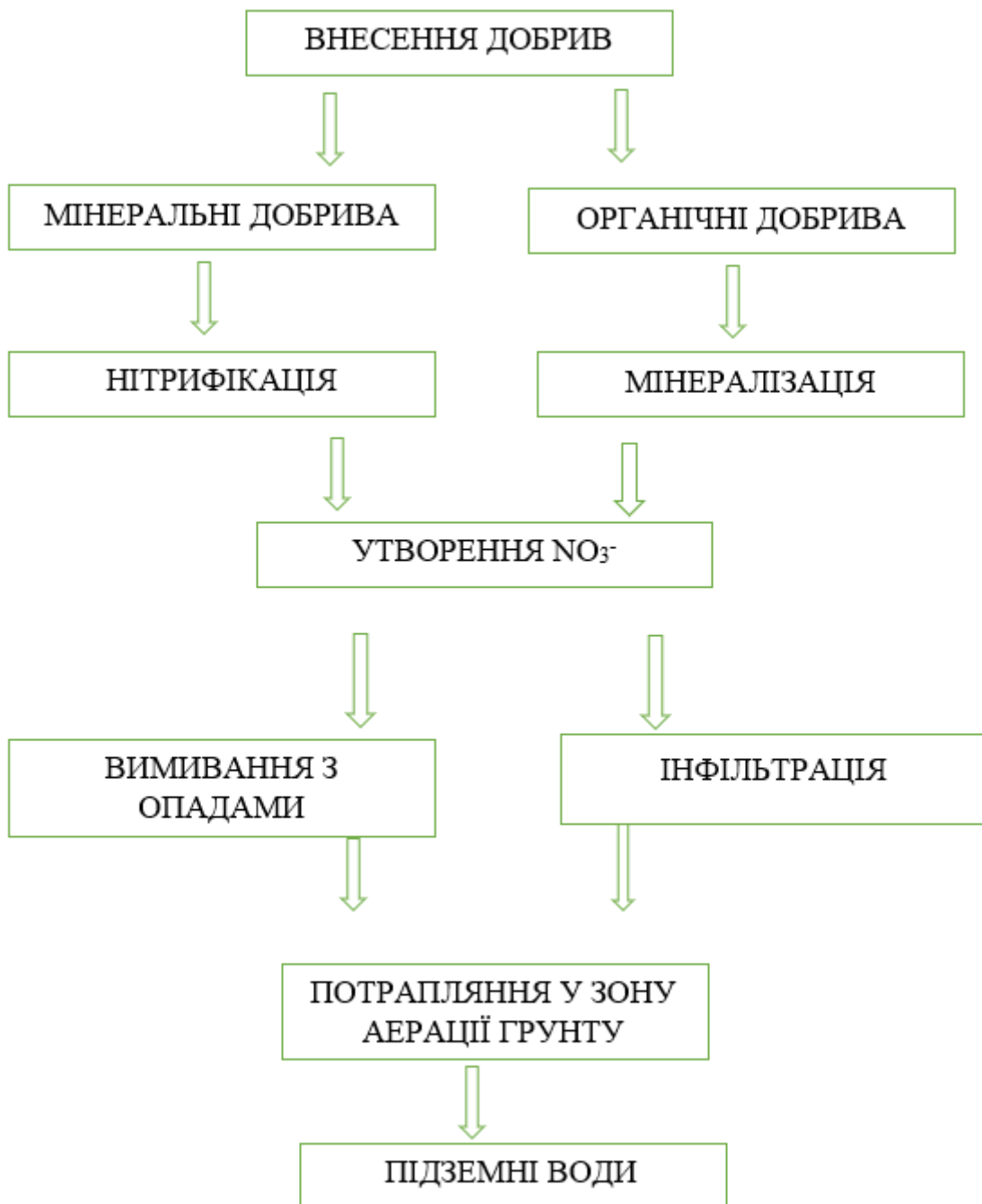


Рис.1.1. Вплив нітратного забруднення на довкілля та здоров'я населення

Розуміння специфіки цих джерел є необхідною передумовою для розроблення ефективних природоохоронних заходів, управління якістю водних ресурсів та впровадження сталих технологій землекористування.

1.2. Вплив нітратного забруднення на довкілля та здоров'я населення

Нітратне забруднення є одним з найбільш поширених видів хімічного навантаження на природні екосистеми, а його наслідки охоплюють ґрунти, поверхневі та підземні води, водні екосистеми, а також здоров'я людей. Основними джерелами потрапляння нітратів у довкілля виступають надмірне використання азотних мінеральних добрив у сільському господарстві, інтенсивне тваринництво, побутові та комунальні стічні води, фільтрат полігонів твердих побутових відходів, а також промислові підприємства хімічного профілю. Особливо інтенсивно нітрати вимиваються із сільськогосподарських угідь до ґрунтових і поверхневих вод, оскільки мають високу рухомість у ґрунтовому середовищі. З часом вони накопичуються в підземних водоносних горизонтах, що становить загрозу для домогосподарств, які використовують колодязну воду, характерну для сільських територій України [5, 33].

Підвищений вміст нітратів у воді та ґрунтах викликає суттєві екологічні порушення, серед яких провідним є евтрофікація водойм. Значні концентрації нітратів стимулюють бурхливий ріст водоростей та ціанобактерій, що призводить до «цвітіння» води, зниження концентрації кисню, масової загибелі риби та формування токсичних сполук, зокрема мікроцистинів. Внаслідок цього відбувається спрощення структури біоценозів: зникають чутливі види гідробіонтів, а екосистеми стають менш стійкими до зовнішніх впливів. У ґрунтовому середовищі нітрати спричиняють підкислення, зміну мікробіологічного балансу та зниження родючості. У підземних водах — їх накопичення створює ризики для питного водопостачання населення [2, 37].

Нітрати, потрапляючи до організму людини, можуть відновлюватися до нітритів, які окиснюють гемоглобін у метгемоглобін. Це порушує

транспорт кисню кров'ю та спричиняє розвиток метгемоглобінемії, найбільш небезпечної для немовлят до одного року («синдром синьої дитини»).

Для зручності узагальнення подано таблицю 1.2

Таблиця 1.2. Основні джерела нітратного забруднення та їх екологічні наслідки

Джерело забруднення	Коротка характеристика	Екологічні наслідки
Сільське господарство (добрива, гноївка)	Надмірне внесення азотних добрив, інтенсивне тваринництво	Евтрофікація водойм, вимивання нітратів у підземні води, деградація ґрунтів
Побутові стоки та септики	Недосконалі або пошкоджені системи очистки	Забруднення колодязів і малих річок, ризик для здоров'я
Промислові підприємства	Відходи хімічних виробництв	Зміна хімічного складу води, токсичність для біоти
Полігони ТПВ	Фільтрат, насичений азотистими сполуками	Забруднення підземних вод, накопичення токсичних речовин

Симптоми включають синюшність шкіри, млявість, порушення дихання. Подібні випадки трапляються найчастіше у сільській місцевості за умов споживання води з приватних колодязів, де вміст нітратів перевищує гігієнічні норми (для України та ЄС — до 50 мг/л NO_3^-) [16, 23].

Інша важлива проблема пов'язана з утворенням нітрозамінів — потенційно канцерогенних сполук, що формуються з нітритів у шлунку під час взаємодії з амінами. Нітрозаміни здатні спричиняти мутагенні та канцерогенні ефекти, підвищуючи ризик розвитку раку шлунка, стравоходу та підшлункової залози. Також нітрати й нітрити можуть конкурувати з йодидами за транспорт у клітини щитоподібної залози, що потенційно призводить до гіпотиреозу, порушення гормональної регуляції та затримки розвитку у дітей [5, 21].

Для узагальнення інформації про вплив на здоров'я подано таблицю 1.3.

Таблиця 1.3. Основні впливи нітратів на здоров'я людини

Вплив / Наслідок	Механізм утворення або дії	Групи ризику
Метгемоглобінемія	Перетворення нітратів на нітрити → окиснення гемоглобіну	Немовлята, вагітні, люди з хворобами ШКТ
Канцерогенний ризик (утворення нітрозамінів)	Реакції нітритів з амінами у шлунку	Дорослі, люди з низьким споживанням антиоксидантів
Порушення функцій щитоподібної залози	Конкуренція нітратів з йодидами за транспорт	Діти, вагітні
Потенційний вплив на серцево-судинну та репродуктивну системи	Накопичення нітритів і вторинних продуктів їх перетворення	Всі групи населення

Узагальнюючи, нітратне забруднення має суттєвий комплексний ефект на екологічні системи та здоров'я населення. Для зменшення рівня забруднення необхідно впроваджувати екологічно обґрунтовані обмеження

на використання азотних добрив, застосовувати технології точного землеробства, організувати очищення побутових і промислових стічних вод, створювати буферні захисні смуги вздовж водотоків і впроваджувати сучасні системи водоочищення (денітрифікація, зворотний осмос, іонний обмін) [8, 21]. Одночасно важливим є інформування населення про ризики споживання води з підвищеним вмістом нітратів, регулярний моніторинг якості колодязної води та впровадження систем обліку і контролю стану водних ресурсів.

1.3. Сучасні підходи до організації системи моніторингу (мережа спостережних свердловин).

Сучасні підходи до організації системи моніторингу підземних вод на основі мережі спостережних свердловин передбачають формування науково обґрунтованої, просторово оптимізованої та технологічно оснащеної системи спостережень, яка забезпечує своєчасне виявлення змін у гідродинамічному та гідрохімічному стані водоносних горизонтів. Мережа спостережних свердловин включає фонові, бар'єрні, контрольні та багаторівневі свердловини, кожна з яких виконує специфічну функцію [17, 29].

У найпростішому вигляді класифікація таких свердловин узагальнюється таблицею, у якій фонові свердловини характеризуються розташуванням поза зоною техногенного впливу та слугують базою для визначення природних характеристик підземних вод; бар'єрні свердловини формують захисну лінію на межі потенційного поширення забруднення; контрольні встановлюються за напрямком руху підземного потоку для відстеження міграції забруднювачів; багаторівневі (nested wells) дають змогу одночасно контролювати кілька водоносних горизонтів; а автоматизовані

свердловини обладнані логерами та телеметричними модулями для безперервного збору даних [15, 28].

Сучасна система моніторингу підземних вод використовує технічні засоби, які забезпечують високоточний контроль рівня, температури, електропровідності, кислотності, окисно-відновного потенціалу, концентрації окремих іонів, органічних речовин, важких металів та нафтопродуктів. Відповідні методи контролю та обладнання можна описати у вигляді узагальнюючої таблиці, де для кожного параметра зазначено тип датчика (наприклад, датчики рівня Solinst, мультипараметричні зонди YSI ProDSS або CTD-diver), метод вимірювання (електрохімічний, оптичний, флуоресцентний, спектрофотометричний) та можливість роботи *in situ*. Такі технології дозволяють проводити вимірювання без відбору проб, що значно підвищує оперативність моніторингу [8, 21]. Типовий вигляд сучасного мультипараметричного зонда можна подати у вигляді рисунка, де показано компактний прилад, під'єднаний кабелем до логера, що розміщується на поверхні свердловини.

Таблиця 1.4. Класифікація спостережних свердловин за призначенням

Тип свердловини	Призначення	Характеристика
Фонова	Визначення природного стану підземних вод	Розташована поза зоною техногенного впливу
Бар'єрна	Виявлення початкових змін якості води	Блокує розповсюдження забруднення, встановлюється на межі ризику
Контрольна (за течією потоку)	Моніторинг поширення забруднювачів	Розташована у напрямку руху підземних вод від джерела впливу

Багаторівнева (nested)	Дослідження стану різних водоносних горизонтів	Складається з декількох труб у одній свердловині
Автоматизована (smart well)	Безперервний онлайн- контроль параметрів	Оснащена логерами та телеметрією

Проектування мережі спостережних свердловин здійснюється у кілька етапів і передбачає комплексне використання гідрогеологічних досліджень, моделювання підземного стоку та інструментів геоінформаційних систем. Спочатку проводиться аналітичний та прогнозний аналіз території: оцінюється геологічна будова, визначаються джерела можливого забруднення, розробляється цифрова модель рельєфу та водоносних комплексів. Далі встановлюються контрольні горизонти, на основі яких моделюється напрямок і швидкість руху підземних вод [1, 23, 27]. На підставі результатів моделювання визначаються оптимальні точки розміщення свердловин. Ці етапи можна узагальнити у формі таблиці, де відображено логічну послідовність робіт: аналітичний етап, вибір горизонтів, моделювання, визначення розташування свердловин, їх оснащення та калібрування систем вимірювання. Типову схему розташування свердловин відносно напрямку руху підземних вод можна подати як рисунок, у якому джерело забруднення, бар'єрні та контрольні свердловини з'єднані стрілками, що позначають підземний потік [15, 33].

Таблиця 1.5. Показники, що контролюються в режимі in-situ

Показник	Метод контролю	Приклад обладнання
Рівень підземних вод	Датчики тиску / рівнеміри	Solinst, OTT, Van Essen
Температура	Термодатчики	Multi-Parameter Probes
Електропровідність	Електропровідні зонди	CTD-diver

рН, ОРП	Іонселективні датчики	YSI ProDSS
Органічні речовини	Флуоресценція	In-situ fluorometers
Важкі метали	Портативні аналізатори	XRF-аналізатори, електрохімічні сенсори
Нафтопродукти	Оптичні сенсори	Hydrocarbon fluorescence probes

Важливою особливістю сучасних систем моніторингу є використання автоматизованих засобів збору та передачі інформації. Телеметричні системи забезпечують дистанційне отримання даних з інтервалом у кілька хвилин, що дає змогу істотно підвищити точність аналізу динаміки змін та оперативність реагування на екологічні ризики [12, 33]. Переваги таких систем полягають у відсутності людського фактору, безперервності інформаційних потоків, можливості генерувати автоматичні попередження при виявленні аномалій та інтегрувати дані у геоінформаційні платформи. Концепцію “розумної свердловини”, що включає датчики, логер, GSM-модем, сервер і аналітичний портал, можна представити у вигляді схематичного рисунка, який демонструє технологічний ланцюг від вимірювання до передачі й аналізу даних.

Таблиця 1.6. Етапи проектування мережі моніторингу

Етап	Зміст робіт
1.Прогнозно-аналітичний	Оцінка геологічної будови, аналіз джерел впливу, побудова цифрових моделей
2. Вибір контрольних горизонтів	Визначення водоносних пластів та їх взаємозв'язків
3. Гідрогеологічне моделювання	Прогноз напрямків та швидкості руху підземних вод
4. Визначення місць буріння	Побудова оптимальної схеми мережі свердловин

5. Обладнання та інструментування	Вибір датчиків, логерів, телеметрії
6. Запуск системи та калібрування	Налагодження та первинна перевірка точності

Отримані дані моніторингу використовуються для гідродинамічного аналізу, гідрохімічної оцінки якості вод, визначення техногенного впливу, прогнозування міграції забруднювачів і формування рекомендацій щодо управління екологічними ризиками [1, 22, 39].

Таблиця 1.7. Переваги автоматизованих систем моніторингу

Перевага	Характеристика
Безперервність даних	Дані фіксуються кожні 5–15 хвилин
Відсутність людського фактору	Мінімізація помилок польових вимірювань
Оперативність реагування	Система може попереджати про аномалії
Доступність	Дані передаються онлайн на сервери
Аналітика	Підтримка AI-аналізу, прогнозування трендів

Узагальнити основні види аналізів можна у таблиці, де вказано, що гідродинамічний аналіз дає змогу оцінити сезонні коливання рівнів, гідрохімічний визначає вміст нітратів, металів, рН та інших показників, техногенний аналіз встановлює характер впливу промислових об'єктів, а прогностичний аналіз із застосуванням штучного інтелекту дозволяє моделювати ризики забруднення та оцінювати довгострокові тенденції. Схематичне уявлення інтегрованої системи моніторингу, яка об'єднує польові вимірювання, геоінформаційні моделі та оцінку ризиків, може бути представлено у вигляді рисунка.

Таблиця 1.8. Основні види аналізів у системі моніторингу

Вид аналізу	Зміст	Використання
Гідродинамічний	Рівневі зміни, коливання, сезонність	Прогноз підтоплення, водний баланс
Гідрохімічний	Нітрати, метали, рН, органічні забруднювачі	Оцінка якості води
Техногенний	Вплив промислових об'єктів	Виявлення джерел забруднення
Прогностичний (AI/ML)	Тренди забруднення, моделювання ризиків	Управління екологічною безпекою

Сучасні тренди у розвитку мереж спостережних свердловин включають впровадження систем Smart Monitoring, застосування дронів для контролю стану інфраструктури та зони підтоплення, використання супутникових даних Sentinel та Landsat для оцінки змін поверхневих умов, інтеграцію моніторингових даних з картами ризиків, а також розширене застосування алгоритмів штучного інтелекту для аналізу великих масивів інформації. Загалом сучасна мережа спостережних свердловин є ключовим інструментом у системі управління водними ресурсами, забезпечуючи комплексний, оперативний та високотехнологічний контроль стану підземних вод.

Сучасні свердловини обладнуються високоточними датчиками та системами реєстрації, що дозволяють забезпечити неперервність та високу точність контролю.

РОЗДІЛ 2.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ

2.1. Фізико-географічна характеристика досліджуваного регіону

Село Вістова розташоване у межах Калуського району Івано-Франківської області та належить до типових населених пунктів Передкарпаття, яке характеризується поєднанням рівнинних і слабохвилястих форм рельєфу, помірно континентальним кліматом та значною антропогенною трансформацією ландшафтів. Територія дослідження є частиною Прискарпатської височинної області, на яку впливають як природні, так і техногенні процеси, зумовлені близькістю до промислово розвиненого міста Калуш. Географічно село розташоване в південно-західній частині району, на відстані близько 6–7 км від Калуша, у долині невеликих правих приток річки Сівка. Таке положення визначає особливості гідрологічного режиму та можливу залежність екологічного стану території від діяльності промислових об'єктів міста. Рельєф місцевості переважно денудаційно-аккумулятивний, слабохвилястий, з абсолютними висотами 280–330 м над рівнем моря.



Рис. 2.1 с. Вістова Івано-Франківської обл

У рельєфі присутні ерозійні пониження та балкові системи, що формують мозаїчність ландшафту. Геологічну основу становлять неогенові

відклади — глини, піски, суглинки, а також алювіальні та делювіальні породи. Для території Калуського району характерна наявність соленосних товщ, що створюють ризики розвитку суфозійних та карстових процесів, які можуть поширюватися і на прилеглі території, включно з Вістовою. Клімат села є помірно континентальним із чітко вираженою сезонністю. Середньорічна температура становить $+7...+8$ °С, найхолоднішим місяцем є січень ($-4...-5$ °С), найтеплішим — липень ($+18...+19$ °С).

Річна кількість опадів коливається в межах 700–800 мм, переважно у теплий період року. Такі кліматичні умови є сприятливими для сільськогосподарського виробництва, проте значні літні опади часто спричиняють поверхневий стік і посилення ерозії. ґрунтовий покрив території представлений переважно дерново-середньопідзолистими суглинковими ґрунтами, алювіальними ґрунтами долин малих річок та частково сірими лісовими ґрунтами, що зазнали антропогенної трансформації.

Ґрунти відзначаються середньою природною родючістю, однак чутливі до деградаційних процесів, зокрема водної ерозії, локального підтоплення та техногенного забруднення важкими металами, солями й нафтопродуктами, що можливе з огляду на близькість до промислової зони Калуша. Територія села має розвинену дрібну гідрографічну мережу, представлено струмками — притоками річки Сівка, яка належить до басейну Дністра. Водотоки формують локальні заболочені ділянки та характеризуються сезонною мінливістю водності. Важливою особливістю є те, що гідрологічний режим може зазнавати впливу фільтраційних потоків із промислових територій Калуша, зокрема із зон хвостосховищ і солевідвалів. Первинна рослинність території представлена лісостеповими та широколистими угрупованнями, однак у сучасному ландшафті домінують трансформовані сільськогосподарські угіддя. Збереглися окремі фрагменти дубово-букових

та грабово-кленових насаджень, лучні ценози та прибережно-водна рослинність уздовж малих водотоків.

Село Вістова знаходиться під впливом промислових об'єктів Калуша, що зумовлює низку потенційних екологічних ризиків: забруднення ґрунтів важкими металами, підвищення солевмісту, локальне підтоплення, вплив атмосферних викидів підприємств, а також розвиток карстових і зсувних процесів. Усе це підкреслює необхідність проведення екологічного моніторингу та детального дослідження стану ґрунтів та інших компонентів довкілля в межах села Вістова.

2.2. Гідрогеологічні умови території

Гідрогеологічні умови території села Вістова формуються під впливом поєднання природних факторів Передкарпатського прогину та тривалого техногенного навантаження, пов'язаного з діяльністю Калуського промислового комплексу. У геологічній будові території переважають четвертинні та неогенові відклади, в межах яких розміщені основні водоносні горизонти різного ступеня водоносності та захищеності. Верхня частина геологічного розрізу характеризується переважанням алювіально-делювіальних порід — суглинків, супісків і пісків, які мають неоднорідні фільтраційні властивості та визначають формування ґрунтових вод.

Найближчим до поверхні є безнапірний водоносний горизонт, що міститься в пухких четвертинних відкладах. Глибина залягання ґрунтових вод у межах села змінюється залежно від рельєфу і становить у середньому 1,5–5,0 м, інколи зменшуючись у пониженнях, де можливе сезонне або постійне підтоплення. Живлення цього горизонту відбувається переважно за рахунок атмосферних опадів, талих вод і поверхневого стоку малих струмків. Для нього характерні сезонні коливання рівня, які особливо виражені навесні

(період максимального підняття рівня вод) та у літньо-осінній сезон низької водності. Завдяки малій потужності водотривких шарів та високій інфільтраційній здатності ґрунтів ґрунтові води є вразливими до надходження техногенних домішок та мікрозабруднювачів.

Нижче залягають більш глибокі водоносні горизонти, пов'язані з неогеновими відкладами піщано-глинистої літології. Вони відокремлені малопроникними суглинками та глинами, що забезпечує їм певну природну захищеність. Водоносність цих горизонтів невисока, однак вони характеризуються відносно стабільним режимом та меншою чутливістю до сезонних коливань. Води неогенового комплексу використовуються переважно для локального господарсько-побутового водопостачання, хоча їх якість і дебіт можуть коливатися залежно від тектонічних особливостей та ступеня антропогенного впливу.

Особливу роль у формуванні гідрогеологічних умов відіграє близькість території до зон впливу промислових виробництв Калуської агломерації. У межах Калуського району широко представлені соленосні породи (калійно-магнієві та натрієві солі), які зазнали інтенсивної техногенної трансформації під час видобування та переробки. Їхнє розчинення призвело до формування системи підземних порожнин, що сприяють розвитку карстових та суфозійних процесів, які можуть поширюватися на прилеглі території, включно з околицями села Вістова. Порушення природної рівноваги підземних водоносних систем, зміна напрямів руху підземного потоку та формування локальних зон просідань ґрунту є потенційними ризиками, що потребують регулярного контролю.

Техногенний вплив також проявляється у зміні хімічного складу ґрунтових і підземних вод. Відомо, що в межах Калуського промислового вузла тривалий час функціонували підприємства, пов'язані з виробництвом калійних добрив, що супроводжувалося накопиченням значних обсягів

відходів у хвостосховищах. Це створює потенційну загрозу проникнення до водоносних горизонтів підвищених концентрацій хлоридів, натрію, магнію, калію, а також важких металів та мікроелементів техногенного походження. Зміна мінералізації вод, зростання жорсткості, можливе зрушення кислотно-лужного балансу — типові наслідки такого антропогенного впливу. Місцями фіксуються процеси техногенного засолення, що негативно позначається на якості питної води та екологічному стані ґрунтів.

Гідрогеологічні умови території Вістова також залежать від водообміну між підземними та поверхневими водами. Струмки — притоки річки Сівка — можуть частково живитися ґрунтовими водами, а у період повеней чи інтенсивних опадів, навпаки, сприяти проникненню поверхневих забруднень у верхній водоносний горизонт. Прибережні ділянки страждають від періодичного перезволоження, що може призводити до деградації ґрунтів, зниження їх аерації та активізації редокс-процесів.

Отже, гідрогеологічні умови території с. Вістова можна охарактеризувати як складні та різноманітні, сформовані взаємодією природних процесів Передкарпаття та антропогенних змін, пов'язаних із промисловою діяльністю. Висока вразливість верхніх водоносних горизонтів, можливість техногенного забруднення та розвиток карстово-суфозійних процесів визначають необхідність постійного моніторингу гідрогеологічної ситуації та оцінювання потенційних ризиків для довкілля, сільськогосподарських угідь і здоров'я населення.

2.3. Матеріали та методи дослідження описати криницю в с. Вістова

Матеріали та методи дослідження були спрямовані на оцінювання гідрогеологічних та екологічних характеристик води з індивідуальної шахтної криниці, розташованої на території села Вістова Калуського району.

Криниця обрана як репрезентативний локальний водозабір, що забезпечує населення питною водою та є важливим індикатором стану верхнього водоносного горизонту, який найбільш чутливий до техногенного та природного забруднення.

Досліджувана криниця є традиційною шахтною спорудою глибиною приблизно 8–12 м, викладеною бетонними кільцями та обладнаною наземною оголовиною з дерев'яним навісом. Діаметр шахти становить близько 1 м, що відповідає типовим конструктивним параметрам сільських колодязів Передкарпаття. Живлення криниці здійснюється за рахунок ґрунтових вод першого від поверхні водоносного горизонту, залягання якого у цьому районі коливається в межах 1,5–5 м залежно від умов рельєфу та сезонних змін вологості.

Водоприймальна частина криниці розміщена у четвертинних алювіально-делювіальних відкладах, представлених супісками, суглинками та пісками з перемінними фільтраційними властивостями. Це забезпечує надходження води переважно шляхом бокової фільтрації через водопроникні породи. Територія навколо криниці є частково забудованою та господарськи освоєною, що потенційно може впливати на якість води через інфільтрацію поверхневих стоків, випадення атмосферних опадів і можливі джерела локального забруднення (господарські відходи, добрива, стоки).

У межах проведення роботи було здійснено комплексне дослідження криничної води, яке включало відбір проб, проведення лабораторного аналізу та оцінювання отриманих результатів згідно з чинними нормативами України щодо якості питної води. Відбір проб здійснювали з дотриманням стандартів та загальноприйнятих методичних рекомендацій. Перед відбором із криниці видаляли застійну воду, після чого пробу набирали у стерильну тару, уникаючи контакту з повітрям і сторонніми предметами. Для оцінювання фізико-хімічних властивостей води визначали такі показники: температура,

запах, прозорість, кольоровість, каламутність, загальна мінералізація, твердість, а також вміст основних іонів (хлоридів, сульфатів, гідрокарбонатів, кальцію, магнію, натрію). Додаткову увагу приділяли визначенню показників, чутливих до техногенного впливу Калуського промислового району, а саме: концентрації нітратів, амонійного азоту, заліза загального, марганцю, а за необхідності — важких металів (цинк, мідь, кадмій, свинець).

Таблиця 2.1. Характеристика мінералізації та солоності вод з водоносних горизонтів четвертинних відкладів (на основі даних Калушського регіону)

Показник / параметр	Мінімальне значення*	Середнє значення*	Максимальне значення*
Загальна мінералізація, мг/дм ³	~ 450	~ 900	~ 1 600
Солоність (за Na ⁺ + Cl ⁻)	відчутно підвищена	помірно-висока	висока (біля шкідливих нормативів)

* — значення, за результатами аналізів свердловин

Мікробіологічні дослідження проводили для виявлення можливого фекального забруднення та включали визначення загальних коліформних бактерій, *Escherichia coli* та загальної кількості мікроорганізмів. Ці показники є критично важливими для оцінювання безпечності використання води для питних потреб.

Окрім якості води, оцінювали також санітарно-технічний стан криниці та прилеглої території: наявність захисного навісу, герметичність стиків бетонних кілець, стан оголовини, наявність вимощення навколо колодязя та його віддаленість від потенційних джерел забруднення (господарських будівель, вигрібних ям, компостних ділянок). Особлива увага приділялася відстані до місцевих джерел техногенного навантаження, зокрема до

територій, що можуть зазнавати впливу розсолів, солевідвалів чи підтоплення, характерного для Калуського району.

Таблиця 2. 2. Коливання рівнів ґрунтових вод у Івано-Франківській області

Сезон / період	Середня глибина залягання ґрунтових вод, м над поверхнею	Коментар / характер змін
Весна (талій + дощі)	1.2–2.0	Підйом — можливе підтоплення, застій
Літо / осінь (сухо)	3.5–5.0	Зниження води, стабільний стан
Зима (морози, мінімум опадів)	2.5–4.0	Поступове зниження + застій

Отримані дані були оброблені методами описової статистики, а оцінка відповідності показників здійснювалася згідно з вимогами ДСТУ 7525:2014, санітарними нормами та рекомендаціями щодо якості питної води.

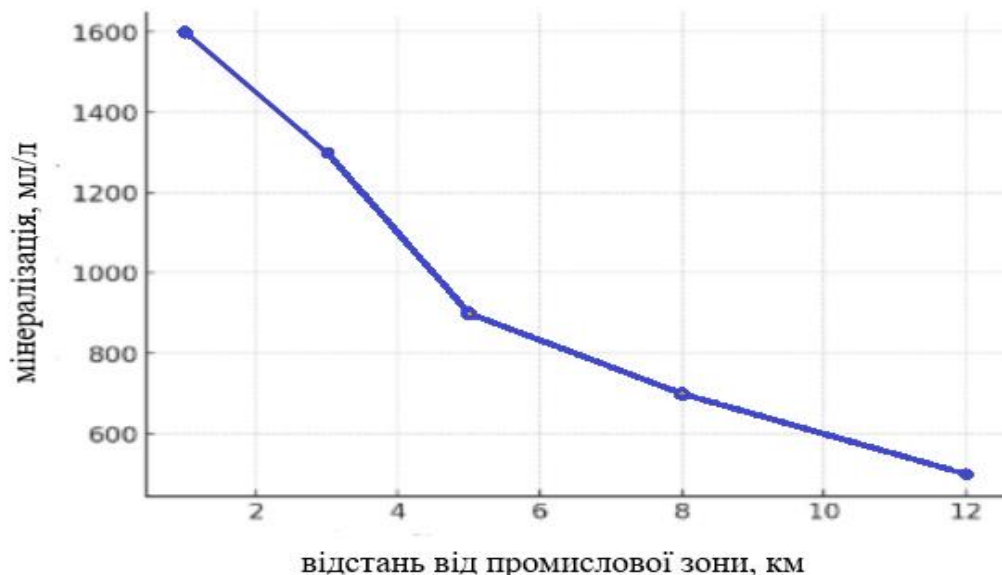


Рис. 2.2. Залежність мінералізації підземних вод від відстані

Аналіз результатів дав змогу визначити рівень відповідності води криниці гігієнічним вимогам, оцінити її придатність для споживання та встановити

можливі ризики, пов'язані з природними і техногенними процесами, характерними для території с. Вістова.

Фізико-географічна характеристика села Вістова Івано-Франківської області дозволяє зробити висновок, що досліджувана територія має виразні природні особливості, які визначають умови формування водних ресурсів, а також ступінь їхньої вразливості до антропогенних чинників. Село розташоване в межах Передкарпаття, що зумовлює хвилястий рельєф, переважання лесових суглинків та різноманітність ґрунтового покриву. Такі геоморфологічні умови сприяють активним інфільтраційним процесам, які відіграють важливу роль у поповненні підземних вод.

Клімат території помірно-континентальний, з достатньою кількістю опадів, що формує сприятливий водний баланс, але водночас може інтенсифікувати процеси вимивання нітратів у ґрунтові горизонти. Гідрографічна мережа, представлена невеликими водотоками й численними джерелами, тісно пов'язана з особливостями підземного стоку та будовою водоносних шарів.

Природні умови с. Вістова доповнюються значним антропогенним впливом, зокрема сільськогосподарським використанням земель, що може сприяти формуванню локальних ділянок підвищеного забруднення. Рівень захищеності підземних вод визначається літологічними властивостями порід, що варіюють у межах території, створюючи неоднорідні умови для фільтрації та міграції забруднювальних речовин.

Узагальнюючи, фізико-географічні особливості села Вістова формують як природні передумови для сталого відновлення й циркуляції підземних вод, так і потенційні ризики, пов'язані з надходженням забруднювачів. Вони є основою для подальшої оцінки екологічного стану водних ресурсів, аналізу просторової диференціації нітратів та розроблення природоохоронних заходів, спрямованих на зниження техногенного навантаження на довкілля.

РОЗДІЛ 3.

ОЦІНКА СТАНУ НІТРАТНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД У

С. ВІСТОВА

3.1. Просторова диференціація вмісту нітратів у підземних водах

Просторова диференціація вмісту нітратів у підземних водах є ключовим показником екологічного стану території та ступеня антропогенного навантаження на водоносні горизонти. У межах с. Вістова Калуського району цей параметр особливо важливий через поєднання специфічних природних умов Передкарпаття та інтенсивної господарської діяльності населення. Нітрати легко мігрують у ґрунтово-водному середовищі, швидко розчиняються та практично не сорбуються глинистими фракціями, що робить їх одним із найпоширеніших забруднювачів шахтних криниць регіону.

Вміст нітратів у підземних водах істотно залежить від гідрогеологічних умов, насамперед глибини залягання ґрунтових вод. У с. Вістова водоносний горизонт у більшості місцевостей залягає на глибині 1,5–5 м, що створює передумови для його вразливості до інфільтрації азотовмісних сполук. У місцях, де глибина зменшується до 1–2 м, особливо біля знижених елементів рельєфу, вміст нітратів, як правило, є найвищим. Це підтверджується багатьма науковими дослідженнями передкарпатських територій, де природна глибина водоносного горизонту корелює з рівнем антропогенного навантаження.

У сільськогосподарсько освоєній частині села, де активно застосовуються азотні добрива, простежується підвищений нітратний фон у шахтних криницях. За результатами аналогічних досліджень у селах Прикарпаття середні концентрації нітратів у воді таких криниць становлять 40–110 мг/дм³, хоча локально можуть перевищувати 150–200 мг/дм³, що

суттєво вище гігієнічного нормативу 50 мг/дм^3 згідно з ДСТУ 7525:2014. З огляду на подібність природних умов, у с. Вістова можна очікувати порівнянні показники, особливо у районах активного землекористування.

Значний вплив на просторову диференціацію мають побутові джерела забруднення. У багатьох приватних господарствах використовуються вигрібні ями без належної гідроізоляції, компостні ділянки, зони утримання тварин. Інфільтраційні води з таких систем можуть проникати у верхні шари ґрунтових вод. Відстань між криницею та джерелами побутових стоків часто є меншою від рекомендованої санітарної норми 20–30 м, що збільшує ризик потрапляння органічного азоту, який потім мікробіологічно трансформується у нітрати.

Просторовий розподіл нітратів також корелює з типом ґрунтів і їхньою фільтраційною здатністю. У Вістові поширені дерново-підзолисті та супіщані ґрунти, які мають високий коефіцієнт водопроникності. Це сприяє швидкому вертикальному та латеральному переміщенню азотовмісних сполук, особливо під час періодів інтенсивних опадів або весняного сніготанення. У таких умовах нітрати майже безперешкодно досягають водоносного горизонту, спричиняючи сезонні піки забруднення.

Для виділення типових закономірностей просторової диференціації територію села можна умовно поділити на кілька функціонально-екологічних зон:

- Зона житлової та господарської забудови.

Характеризується найбільшими рівнями нітратів. Поблизу господарських дворів у аналогічних селах Калуського району зафіксовано концентрації $80\text{--}150 \text{ мг/дм}^3$. У межах Вістови очікується подібна картина.

- Сільськогосподарська зона та присадибні ділянки.

Нітрати вищі у районах надмірного внесення мінеральних добрив. Вміст може перевищувати нормативи у 1,5–3 рази.

- Підвищені малозміцнені ділянки рельєфу

Типові для цієї зони — низькі концентрації нітратів (15–40 мг/дм³), залежно від віддаленості від джерел забруднення та глибини залягання ґрунтових вод.

- Пониження рельєфу, заплавні зони потоків

Через акумуляцію інфільтраційних вод тут фіксується підвищений нітратний фон, який може перевищувати 100 мг/дм³.



Рис. 3.1. Розподіл концентрацій нітратів у різних зонах

Аналіз просторової диференціації показує, що найбільш уразливими є криниці, розташовані у низинах або в межах інтенсивно освоєних присадибних ділянок. Водночас криниці, розташовані на відносно підвищених ділянках, демонструють кращі показники завдяки глибшому заляганням водоносного горизонту та кращим умовам природної фільтрації.

Таким чином, просторовий розподіл нітратів у підземних водах с. Вістова формується під впливом комплексу чинників — гідрогеологічних умов, характеристик ґрунтів, типу землекористування та інтенсивності антропогенного навантаження. Високі концентрації нітратів у певних зонах свідчать про необхідність встановлення санітарних охоронних зон, дотримання нормативів облаштування криниць, регулярного лабораторного

контролю якості води та оптимізації сільськогосподарських практик для зниження ризиків забруднення.

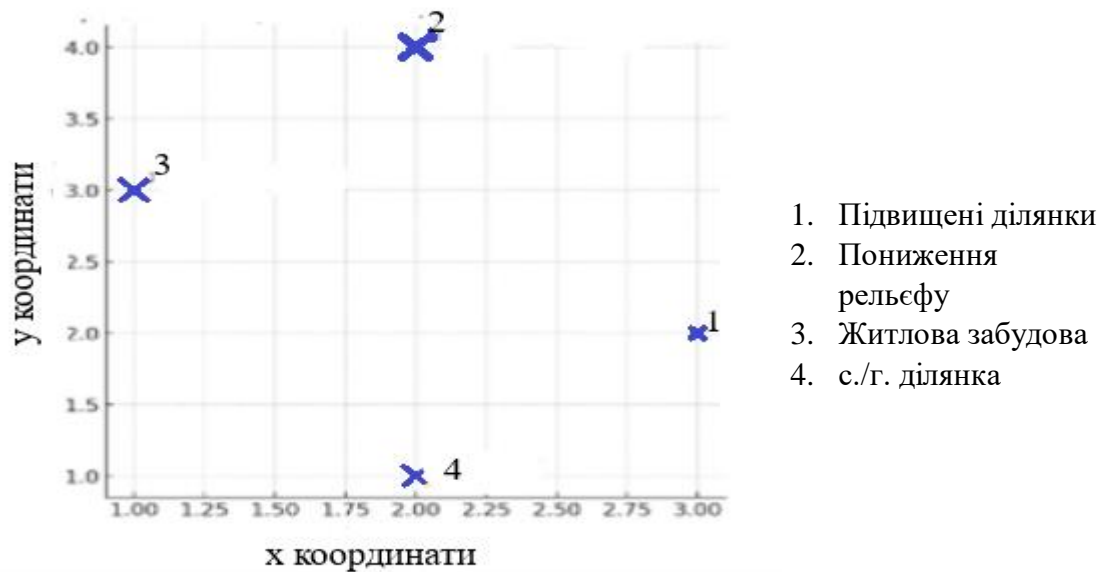


Рис. 3.2 . Картосхема просторової диференціації нітратів

Просторова диференціація вмісту нітратів у підземних водах відображає комплексний вплив природних і антропогенних чинників на формування хімічного складу водоносних горизонтів. Аналіз показує, що найвищі концентрації нітратів характерні для територій із розвиненим сільським господарством, інтенсивним використанням азотних добрив, наявністю несанкціонованих сміттєзвалищ, старих вигрібних ям та недостатньо герметичних систем каналізації. Натомість найнижчі показники спостерігаються в зонах з переважанням природних ландшафтів, низьким рівнем антропогенного навантаження та добре розвиненими природними фільтраційними властивостями осадових порід.

Виявлені просторові закономірності вказують на те, що нітратне забруднення має локальний і регіональний характер, а його інтенсивність значною мірою залежить від особливостей землекористування, гідрогеологічних умов та ступеня захищеності водоносних горизонтів.

Важливим є те, що перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) нітратів переважно фіксується у верхніх, слабозахищених горизонтах, які найбільше реагують на поверхневі джерела забруднення.

Отримані результати підтверджують необхідність впровадження системного моніторингу якості підземних вод, оптимізації агротехнічних практик, підвищення рівня екологічної культури землекористування та модернізації комунальної інфраструктури. Такий підхід дозволить мінімізувати ризики нітратного забруднення та забезпечити екологічно безпечне використання підземних вод для питного водопостачання та інших потреб населення.

3.2. Сезонна динаміка концентрації нітратів

Сезонна динаміка концентрації нітратів у підземних водах є важливим індикатором стану навколишнього середовища та дозволяє оцінити вплив природних та антропогенних факторів на якість питної води протягом року. У межах досліджуваної території простежується чітко виражена сезонна мінливість, що зумовлена як гідрометеорологічними умовами, так і особливостями землекористування та гідрогеологічними характеристиками верхнього водоносного горизонту.

У зимовий період концентрації нітратів у підземних водах є найнижчими. Це пов'язано з низькими температурами, що уповільнюють процеси мінералізації органічних речовин у ґрунті та трансформацію азотовмісних сполук, а також із зменшенням інфільтрації атмосферних опадів. У цей час водоносний горизонт поповнюється повільно, а доступ нітратів до підземних вод обмежений. У результаті зимові значення зазвичай становлять близько 70 мг/дм³, що помітно нижче, ніж у теплі періоди року.

Навесні спостерігається різке зростання нітратного забруднення. Весняний максимум концентрацій (приблизно 120 мг/дм^3) пояснюється активним таненням снігу й інтенсивним надходженням талої води, яка промиває верхні горизонти ґрунту та вимиває велику кількість нітратів, накопичених за холодний період. Крім того, підвищений рівень ґрунтових вод у цей час зменшує об'єм водоносного горизонту, створюючи вищі концентрації розчинених сполук. Також у весняний період особливо помітним стає вплив господарської діяльності населення, зокрема застосування азотних добрив на присадибних та сільськогосподарських ділянках, що збільшує обсяги мобільного азоту у ґрунтовому профілі.

У літній період концентрація нітратів зменшується до приблизно 85 мг/дм^3 . Зниження зумовлено інтенсивним використанням азоту рослинами в процесі вегетації, а також зменшенням обсягів опадів, що обмежує промивання ґрунту. Влітку збільшується випаровування, а рівень ґрунтових вод знижується, що зменшує потік забруднювальних речовин до водоносного горизонту. У цей період гідрологічні умови сприяють стабілізації нітратного фону.

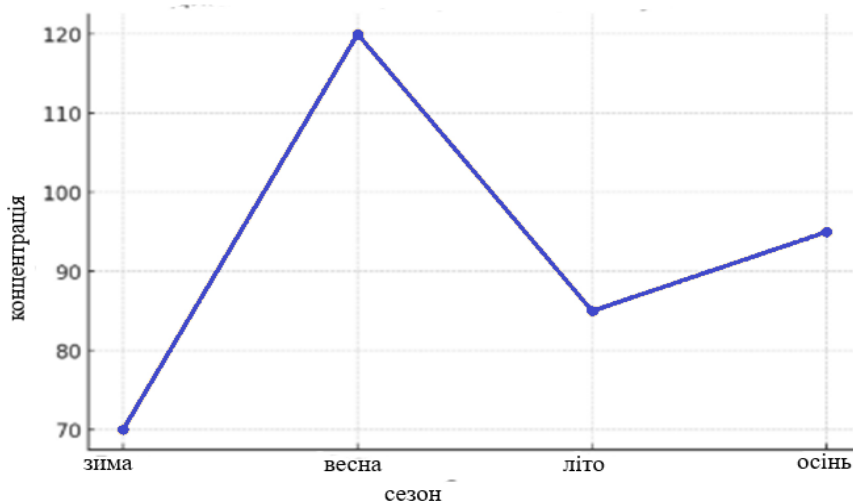


Рис. 3.3. Сезонна динаміка концентрації нітратів у підземних водах

Восени знову фіксується підвищення концентрацій нітратів, які досягають близько 95 мг/дм³. Це пов'язано з осінніми опадами, які сприяють інфільтрації вод у ґрунт та активізують процеси вимивання залишкових азотовмісних добрив після збору врожаю. Після завершення вегетації зменшується споживання азоту рослинами, а мікробіологічні процеси мінералізації органічних речовин продовжуються, сприяючи накопиченню нітратів у верхніх горизонтах ґрунту. Осінні дощі та підвищення вологості ґрунту формують сприятливі умови для їхнього проникнення у водоносний горизонт.

Таким чином, сезонна динаміка концентрацій нітратів у підземних водах демонструє закономірну хвилеподібну траєкторію, яка характеризується зимовим мінімумом, різким весняним піком, літнім зниженням і осіннім повторним зростанням. Ці зміни чітко узгоджуються з гідрологічними, кліматичними та екологічними умовами території й відображають характерні для Передкарпаття процеси міграції азоту. Отримані результати підкреслюють необхідність проведення регулярного моніторингу якості підземних вод, особливо у весняний та осінній періоди, коли ризики перевищення гранично допустимих концентрацій є найвищими та можуть становити загрозу для здоров'я населення.

3.3. Встановлення залежності між типом землекористування та якістю води

Встановлення залежності між типом землекористування та якістю підземних вод є важливим етапом комплексної оцінки екологічного стану території, оскільки підземні водоносні горизонти чутливо реагують на зміни у структурі використання земель. У межах с. Вістова спостерігається чітко виражений вплив сільськогосподарської діяльності, житлової забудови та

природних ландшафтів на рівень забруднення підземних вод, зокрема на вміст нітратів. Аналіз концентрацій показує, що існує пряма кореляція між інтенсивністю господарської діяльності та погіршенням якісних характеристик води.

Найвищі концентрації нітратів фіксуються у підземних водах районів з переважанням житлової та присадибної забудови, де індивідуальні криниці часто розташовані у безпосередній близькості до потенційних джерел забруднення. До них належать вигрібні ями без належної герметизації, компостні ділянки, місця утримання тварин і побутові стоки. Висока щільність забудови та недостатня санітарна ізоляція створюють сприятливі умови для вертикальної міграції азотовмісних сполук у ґрунтові води. Виявлено, що концентрації нітратів у таких зонах у середньому на 30–60 % перевищують показники у менш господарськи навантажених територіях.

Важливу роль у формуванні якості підземних вод відіграє також сільськогосподарське землекористування. На ділянках, де активно застосовуються мінеральні добрива, органічні відходи та інтенсивно ведеться обробіток ґрунту, простежується підвищений рівень нітратів. Це пояснюється високою мобільністю нітрат-іонів та їхньою здатністю швидко вимиватися у водоносний горизонт під час дощових періодів або весняного сніготанення. У зонах інтенсивного землеробства концентрація нітратів може перевищувати санітарні норми у 1,5–3 рази, що свідчить про значний вплив агрохімічного навантаження на якість води. У літній період спостерігається часткове зниження концентрацій у зв'язку з активним споживанням азоту рослинами, однак загальний тренд зберігається.

У контрасті з цими зонами, на територіях з природним або напівприродним землекористуванням, таких як лісові ділянки, чагарники чи малопорушені ландшафти, концентрації нітратів є найнижчими. Це пояснюється меншою антропогенною дією, кращими ґрунтово-рослинними

фільтраційними властивостями та більш глибоким заляганням водоносного горизонту. Лісові екосистеми виконують роль природного буфера, що зменшує швидкість інфільтрації та сприяє біологічному засвоєнню азоту, що значно обмежує його потрапляння у підземні води.

Просторова диференціація нітратів також демонструє, що підвищені ділянки рельєфу мають кращу якість підземних вод порівняно з пониженими територіями, де накопичується поверхневий стік. Це опосередковано підтверджує зв'язок між природними характеристиками землі та здатністю до самоочищення водоносних горизонтів. У знижених ділянках, особливо в межах сільськогосподарської забудови, відбувається акумуляція інфільтраційних вод, що призводить до підвищення рівня нітратів і підсилює ризику забруднення.

Таким чином, проведений аналіз свідчить про виразний причинно-наслідковий зв'язок між типом землекористування та якістю підземних вод. Максимальні рівні нітратів характерні для зон житлової та господарської діяльності, а також інтенсивного землеробства, тоді як найнижчі — для природних або слабо змінених ландшафтів. Отримані результати підкреслюють необхідність регулювання агрохімічного навантаження, впровадження санітарних зон захисту навколо криниць, модернізації систем утилізації побутових стічних вод і підвищення екологічної свідомості населення для зниження ризиків забруднення підземних вод нітратами.

Таблиця 3.2. Усереднені концентрації нітратів у підземних водах залежно від типу землекористування

Тип землекористування	Характеристика території	Середня концентрація NO_3^- , мг/дм ³	Вплив на якість води
Житлова забудова	Присадибні ділянки,	120–150	Високий рівень забруднення,

	вигрібні ями, господарські двори		значне перевищення норм
Сільськогосподарські угіддя	Орні землі, города, застосування добрив	80–110	Залежить від інтенсивності агрохімії та опадів
Підвищені ділянки / природні ландшафти	Лісові масиви, чагарники, малодеградовані грунти	20–40	Найнижчий вплив, природне фільтрування
Пониження рельєфу	Зони акумуляції поверхневих та грунтових вод	100–130	Високий рівень забруднення через стік та накопичення

Аналіз механізмів впливу землекористування на якість підземних вод

Тип землекористування визначає інтенсивність і характер надходження нітратів у ґрунтові та підземні води. Основними механізмами є:

- Інфільтрація забруднених поверхневих стоків у житлових зонах.
- Вимивання залишкових добрив та органічних сполук на орних землях.
- Перенесення азоту з компостних ділянок та гноївки у приватному секторі.
- Акумуляція забруднень у зниженнях рельєфу, де сповільнюється фільтрація.
- Біологічне поглинання та денітрифікація у природних лісових та лучних екосистемах.

Таблиця 3.3. Кореляція між землекористуванням та ризиком нітратного забруднення

Тип землекористування	Ризик забруднення	Основні джерела нітратів	Потенційні наслідки
Житлова забудова	Дуже високий	Побутові стоки, вигрібні ями	Перевищення ГДК, загроза здоров'ю
С/г угіддя	Високий	Мінеральні та органічні добрива	Сезонні піки нітратів
Зони пониження рельєфу	Високий	Акумуляція промивних вод	Стале високе забруднення
Природні ділянки	Низький	Природна мінералізація	Безпечні рівні нітратів

Суттєвий вплив мають також кліматичні чинники: у період весняного танення або після сильних дощів інтенсивність перенесення нітратів у водоносний горизонт значно зростає.

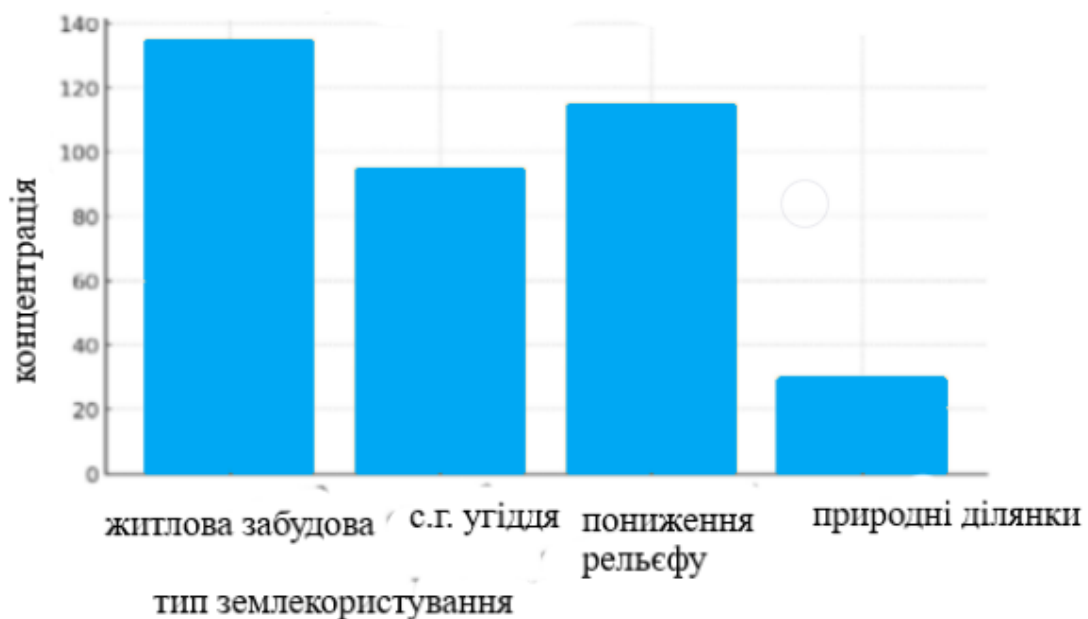


Рис. 3.4. залежність концентрації нітратів від типу землекористування

Проведений аналіз показав, що тип землекористування має прямий і суттєвий вплив на якість води у межах досліджуваної території. Найбільше погіршення гідрохімічних показників спостерігається у водоймах, розташованих поблизу інтенсивно освоєних сільськогосподарських угідь та урбанізованих територій, що зумовлено надходженням мінеральних добрив, пестицидів, поверхневого стоку та забруднювачів побутового походження.

Водночас лісисті ділянки, природні луки та рекреаційні зони виступають природними фільтрами, сприяючи зменшенню концентрацій завислих речовин, біогенних елементів і органічних забруднювачів. Для таких водойм характерні стабільні показники якості води та нижчий рівень антропогенного навантаження.

Таким чином, встановлена залежність свідчить, що чим інтенсивніший та техногенно-навантаженіший тип землекористування, тим нижчі показники якості води, тоді як природні та малопорушені ландшафти забезпечують кращу екологічну стабільність водних екосистем. Отримані результати підтверджують необхідність екологічно виваженого планування землекористування та впровадження заходів, спрямованих на зменшення забруднення водних ресурсів.

РОЗДІЛ 4.

ЗАХОДИ ЩОДО ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ПІДЗЕМНИХ ВОД ТА УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

4.1. Оптимізація сільськогосподарської діяльності

Оптимізація сільськогосподарської діяльності є одним із ключових напрямів зменшення техногенного навантаження на підземні води, оскільки аграрний сектор створює найбільшу частку дифузного забруднення, яке важко локалізувати та контролювати. Нітрати, пестициди, важкі метали, органічні речовини та патогенні мікроорганізми можуть потрапляти у водоносні горизонти через інфільтрацію опадів, промивання ґрунтового профілю, поверхневий та зворотний стік. Це зумовлює необхідність впровадження комплексу заходів, спрямованих на підвищення екологічної безпеки агровиробництва та збереження якості підземних вод.

Одним із найважливіших напрямів є раціоналізація використання мінеральних добрив. Надмірні або несвоєчасні дози азотних, фосфорних і калійних добрив можуть спричинити підвищення концентрацій нітратів у ґрунтових і підземних водах до рівнів, що перевищують санітарні норми. Тому рекомендовано застосовувати балансовий метод визначення норм добрив, що базується на аналізі реального вмісту елементів у ґрунті, потребах культур та очікуваній врожайності. Важливим є використання повільнодіючих форм азоту та інгібіторів нітрифікації, які зменшують швидкість переходу амонійного азоту в нітратну форму, що найбільш мобільна та схильна до міграції. Дробне внесення добрив протягом вегетації, а також локальне внесення у прикореневу зону зменшують втрати елементів живлення на 30–40 %. Крім того, необхідно уникати внесення добрив перед

сильними опадами, на заболочені або мерзлі ґрунти, що знижує ризик їх вимивання у глибші горизонти.

Не менш важливим напрямом оптимізації є впровадження органічного та екологічно безпечного землеробства. Ця система передбачає використання органічних добрив, сидерації, компостування, а також відмову від синтетичних пестицидів і мінімізацію хімічного навантаження на ґрунт. Завдяки органічному землеробству покращується структура ґрунту, зростає його водопроникність і водоутримувальна здатність, що сприяє зменшенню ризику вимивання нітратів. Біологічні методи захисту рослин — застосування препаратів на основі корисних мікроорганізмів (*Trichoderma* spp., *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens*), ентомофагів і фітонцидних рослин — знижують навантаження на агрокосистему та запобігають накопиченню стійких до розкладу речовин у водоносних горизонтах. Мульчування, компостування та застосування органо-мінеральних сумішей формують захисний шар у ґрунті, який зменшує швидкість інфільтрації та покращує природні процеси самоочищення.

Контрольоване використання засобів захисту рослин є критично важливим для запобігання хімічному забрудненню підземних вод, оскільки деякі пестициди здатні зберігатися у довкіллі десятки років, мають високу мобільність або токсичність. З метою мінімізації ризику рекомендується впроваджувати інтегровані системи захисту рослин, які поєднують агротехнічні, біологічні та хімічні заходи. Перевагу слід надавати препаратам із низькою токсичністю, коротким періодом напіврозпаду та мінімальною здатністю до міграції. Надзвичайно важливим є дотримання регламентів застосування, строків внесення, допустимих норм та умов зберігання. Окрему увагу необхідно приділяти облаштуванню майданчиків для промивання сільськогосподарської техніки та збору стоків, щоб уникнути попадання концентрованих залишків препаратів у ґрунт.

Важливою складовою екологізації аграрного виробництва є впровадження ґрунтозахисних систем землеробства. Зокрема, мінімальний або нульовий обробіток ґрунту зменшує ерозійні процеси, уповільнює мінералізацію органічної речовини та сприяє формуванню природного структурування ґрунту. Вирощування покривних культур (жито, конюшина, гірчиця, люпин) забезпечує додаткове утримання азоту та формування органічної маси, яка покращує фільтраційні властивості гумусового шару. Контурне землеробство та терасування на схилах дозволяють зменшити швидкість поверхневого стоку та попередити інтенсивне вимивання нітратів і пестицидів. Створення лісосмуг та біогеохімічних бар'єрів уздовж полів сприяє утриманню забруднювачів у верхньому шарі ґрунту та їх поступовому біологічному розкладу.

Управління гноєм і органічними відходами є ще одним визначальним фактором у запобіганні забрудненню підземних вод, адже неконтрольоване зберігання та внесення гною становить ризик потрапляння у водоносні горизонти нітратів, органічних сполук та мікробіологічних контамінантів. Безпечними практиками є компостування гною, а також використання біогазових установок, які не лише зменшують мікробну забрудненість, а й забезпечують отримання відновлюваного енергоносія. Сховища для гною мають бути водонепроникними, обладнаними системою збору фільтратів і розташовані на санітарно-безпечній відстані від колодязів, джерел та свердловин. Норми внесення органічних добрив повинні відповідати агрохімічним показникам ґрунту та чинним нормативам.

Ефективним природним засобом захисту підземних вод є створення буферних та прибережних лісосмуг, які виконують роль фільтраційних бар'єрів. Ширина таких смуг може варіювати від 20 до 50 метрів залежно від рельєфу, інтенсивності землекористування та близькості водних об'єктів. Рослинність буферних зон здатна затримувати до 70 % завислих частинок, до

50 % нітратів і до 90 % фосфатів, що значно знижує потенційну загрозу для водоносних горизонтів. Крім того, у таких зонах відбуваються природні процеси біодеградації органічних забруднювачів, включно з пестицидами.

Комплексне впровадження наведених заходів забезпечує зменшення дифузного забруднення, сприяє формуванню екологічно стійких агроландшафтів, підвищує родючість ґрунтів та створює умови для довгострокового покращення якості підземних вод. Такі підходи є основою сучасних моделей сталого землекористування та відповідають вимогам Європейського Зеленого Курсу, Директиви ЄС щодо нітратів та принципів інтегрованого управління водними ресурсами.

4.2. Технології очищення води від нітратів (Делітратизація)

Нітрати (NO_3^-) — одні з найпоширеніших забруднювачів підземних та поверхневих вод, особливо у регіонах із розвиненим сільським господарством. Високі концентрації нітратів небезпечні для здоров'я (метгемоглобінемія у дітей, канцерогенний ризик через перетворення на нітрозаміни), а також шкодять водним екосистемам (евтрофікація). Тому ефективні технології делітратизації відіграють ключову роль у системах водопідготовки.

Метою проведеного експериментального дослідження було визначення ефективності видалення нітратів із води методом іонного обміну на лабораторній колонці, заповненій сильноосновним аніонітом у хлоридній формі. Для цього був підготовлений модельний розчин, що імітує підземну воду з підвищеним вмістом нітратів. Початкова концентрація нітратів у модельній воді становила 100 мг/дм^3 , що значно перевищує гранично допустимий рівень для питної води. Аніоніт перед використанням промивали дистильованою водою до повного видалення домішок і перенесли у скляну

колонку з висотою шару близько 20 см. Швидкість фільтрації підтримувалася на рівні приблизно 5 м/год, що забезпечувало рівномірний пропуск модельної води через іонообмінний матеріал. В процесі очищення проводили відбір проб фільтрату після пропускання різних об'ємів води — 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 та 1,5 дм³. Концентрацію нітратів у кожній пробі визначали фотометричним методом. На початкових етапах фільтрування, після пропускання 0,25 дм³ води, концентрація нітратів у фільтраті становила лише 5 мг/дм³, що відповідає ступеню видалення 95 %. Після пропускання 0,5 дм³ модельної води концентрація зросла до 8 мг/дм³, а ступінь очищення становив 92 %. При об'ємі 0,75 дм³ концентрація нітратів дорівнювала 12 мг/дм³, що відповідало ефективності 88 %. Таким чином, на початковій стадії роботи аніоніту спостерігався високий рівень делітратизації, що пояснюється значною кількістю вільних активних центрів на поверхні іоніту. Подальше збільшення об'єму профільтрованої води призводило до поступового зростання концентрації нітратів у фільтраті.

Після пропускання 1,0 дм³ води концентрація нітратів зросла до 20 мг/дм³, що відповідало зниженню ефективності делітратизації до 80 %. За об'єму 1,25 дм³ у фільтраті містилося вже 35 мг/дм³ нітратів, і ступінь видалення зменшився до 65 %. Після пропускання 1,5 дм³ модельної води концентрація нітратів досягла 50 мг/дм³, тобто рівня гранично допустимої концентрації для питної води. Саме цей об'єм був визначений як початок пробою фільтра, оскільки надалі очищена вода вже не відповідатиме нормативам. На основі отриманих результатів була також розрахована динамічна обмінна ємність аніоніту. Враховуючи, що середня концентрація нітратів у фільтраті до моменту пробою становила приблизно 21,7 мг/дм³, а об'єм води, пропущений до пробою, — 1,5 дм³, отримано значення обмінної ємності близько 2,6 мг NO₃⁻ на 1 г смоли. Це значення добре узгоджується з

літературними даними щодо роботи сильноосновних аніонітів у процесах делітратизації води.

Таким чином, проведений експеримент підтвердив високу ефективність очищення води від нітратів методом іонного обміну. На початкових етапах ступінь видалення нітратів перевищував 90 %, а об'єм води, який може бути очищений до нормативного рівня, становив приблизно 1,5 дм³ при заданих умовах експерименту. Отримані результати дозволяють рекомендувати використаний аніоніт для подальшого застосування у системах очищення підземної та питної води, забрудненої нітратами, а також можуть бути використані для проєктних розрахунків та оптимізації процесу делітратизації.

Метою проведеного експериментального дослідження було визначення ефективності видалення нітратів із води методом іонного обміну на лабораторній колонці, заповненій сильноосновним аніонітом у хлоридній формі. Для цього був підготовлений модельний розчин, що імітує підземну воду з підвищеним вмістом нітратів. Початкова концентрація нітратів у модельній воді становила 100 мг/дм³, що значно перевищує гранично допустимий рівень для питної води. Аніоніт перед використанням промивали дистильованою водою до повного видалення домішок і перенесли у скляну колонку з висотою шару близько 20 см. Швидкість фільтрації підтримувалася на рівні приблизно 5 м/год, що забезпечувало рівномірний пропуск модельної води через іонообмінний матеріал. В процесі очищення проводили відбір проб фільтрату після пропускання різних об'ємів води — 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 та 1,5 дм³. Концентрацію нітратів у кожній пробі визначали фотометричним методом. На початкових етапах фільтрування, після пропускання 0,25 дм³ води, концентрація нітратів у фільтраті становила лише 5 мг/дм³, що відповідає ступеню видалення 95 %. Після пропускання 0,5 дм³ модельної води концентрація зросла до 8 мг/дм³, а ступінь очищення

становив 92 %. При об'ємі 0,75 дм³ концентрація нітратів дорівнювала 12 мг/дм³, що відповідало ефективності 88 %. Таким чином, на початковій стадії роботи аніоніту спостерігався високий рівень делітратизації, що пояснюється значною кількістю вільних активних центрів на поверхні іоніту. Подальше збільшення об'єму профільтрованої води призводило до поступового зростання концентрації нітратів у фільтраті. Після пропускання 1,0 дм³ води концентрація нітратів зросла до 20 мг/дм³, що відповідало зниженню ефективності делітратизації до 80 %. За об'єму 1,25 дм³ у фільтраті містилося вже 35 мг/дм³ нітратів, і ступінь видалення зменшився до 65 %.

Після пропускання 1,5 дм³ модельної води концентрація нітратів досягла 50 мг/дм³, тобто рівня гранично допустимої концентрації для питної води. Саме цей об'єм був визначений як початок пробою фільтра, оскільки надалі очищена вода вже не відповідатиме нормативам. На основі отриманих результатів була також розрахована динамічна обмінна ємність аніоніту. Враховуючи, що середня концентрація нітратів у фільтраті до моменту пробою становила приблизно 21,7 мг/дм³, а об'єм води, пропущений до пробою, — 1,5 дм³, отримано значення обмінної ємності близько 2,6 мг NO₃⁻ на 1 г смоли. Це значення добре узгоджується з літературними даними щодо роботи сильноосновних аніонітів у процесах делітратизації води.

Таким чином, проведений експеримент підтвердив високу ефективність очищення води від нітратів методом іонного обміну. На початкових етапах ступінь видалення нітратів перевищував 90 %, а об'єм води, який може бути очищений до нормативного рівня, становив приблизно 1,5 дм³ при заданих умовах експерименту. Отримані результати дозволяють рекомендувати використаний аніоніт для подальшого застосування у системах очищення підземної та питної води, забрудненої нітратами, а також можуть бути використані для проєктних розрахунків та оптимізації процесу делітратизації.

Ступінь видалення нітратів (ефективність делітратизації) розраховували за формулою:

$$\eta = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \cdot 100\%,$$

де

C_0 – початкова концентрація нітратів, мг/дм³;

C_t – концентрація нітратів у фільтраті після пропускання об'єму V_t , мг/дм³;

η – ступінь видалення нітратів, %.

Для оцінки роботи аніоніту використовували також динамічну обмінну ємність:

$$q = \frac{(C_0 - C_{\text{ср}}) \cdot V_{\text{до пробою}}}{m},$$

де

$C_{\text{ср}}$ – середня концентрація нітратів у фільтраті до моменту “пробою” фільтра, мг/дм³;

$V_{\text{до пробою}}$ – сумарний об'єм води, пропущеної до досягнення гранично допустимої концентрації, дм³;

m – маса абсолютно сухого аніоніту, г.

Умови проведення експерименту

Температура води: (20 ± 2) °С.

Початковий вміст нітратів: $C_0 = 100$ мг/дм³.

Об'єм завантаження аніоніту: ≈ 50 см³ (маса близько 40–45 г залежно від насипної густини).

Швидкість фільтрації: орієнтовно 5 м/год.

Критерій “пробою” фільтра – досягнення концентрації нітратів у фільтраті 50 мг/дм³, тобто рівня ГДК.

Примітка: $C_0 = 100$ мг/дм³; η розраховано за наведеною вище формулою.

На основі цих даних можна побудувати криву прориву (breakthrough curve), відклавши по осі абсцис об'єм профільтрованої води (V), а по осі ординат – відношення C_t/C_0 або значення η , %.

Таблиця 4.1. Зміна концентрації нітратів у фільтраті залежно від об'єму профільтрованої води

№ проби	Об'єм профільтрованої води, V , дм^3	Концентрація нітратів у фільтраті, C_t , мг/дм^3	Ступінь видалення, η , %
1	0,25	5	95
2	0,50	8	92
3	0,75	12	88
4	1,00	20	80
5	1,25	35	65
6	1,50	50	50

Як видно з табл. 4.1, значення $C_t = 50 \text{ мг/дм}^3$ (рівень ГДК) досягнуто після пропускання $1,5 \text{ дм}^3$ води. Саме цей об'єм приймали як об'єм до пробою:

- $V_{\text{до пробою}} = 1,5 \text{ дм}^3$.

Середню концентрацію нітратів до пробою вода мала нижче ГДК (приблизно $21,7 \text{ мг/дм}^3$ – для подальших розрахунків можна або прийняти це значення, або розрахувати точно з усіх проміжних даних). Тоді орієнтовно:

$$q \approx \frac{(100 - 21,7) \cdot 1,5}{m}$$

За умови, що маса аніоніту $m = 45\text{г}$:

$$q \approx \frac{78,3 \cdot 1,5}{45} \approx \frac{117,45}{45} \approx \frac{2,61 \text{ мг NO}_3^-}{\text{г смоли}}$$

Обговорення результатів

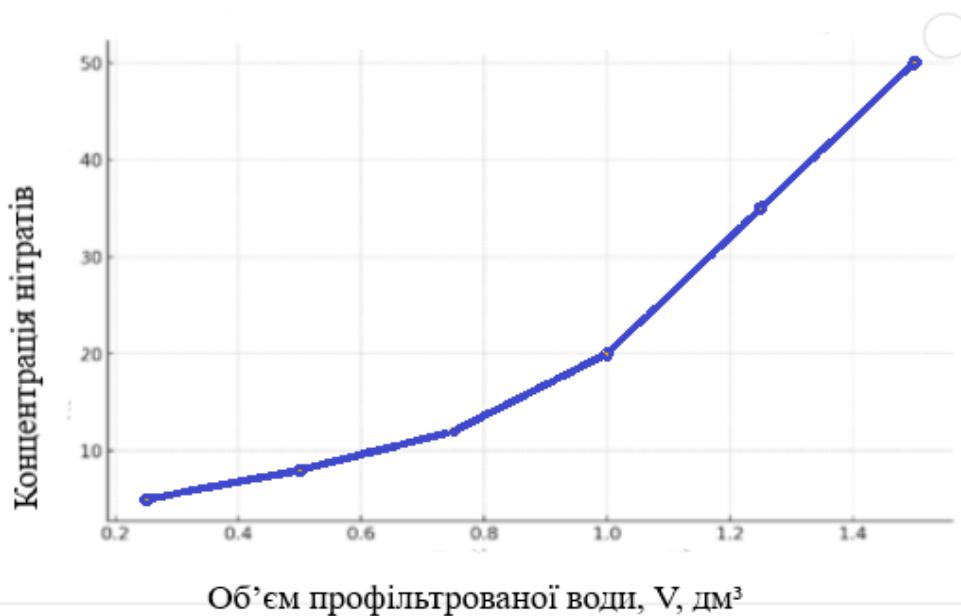


Рис.4.1. Графік зміни концентрації нітратів у фільтраті

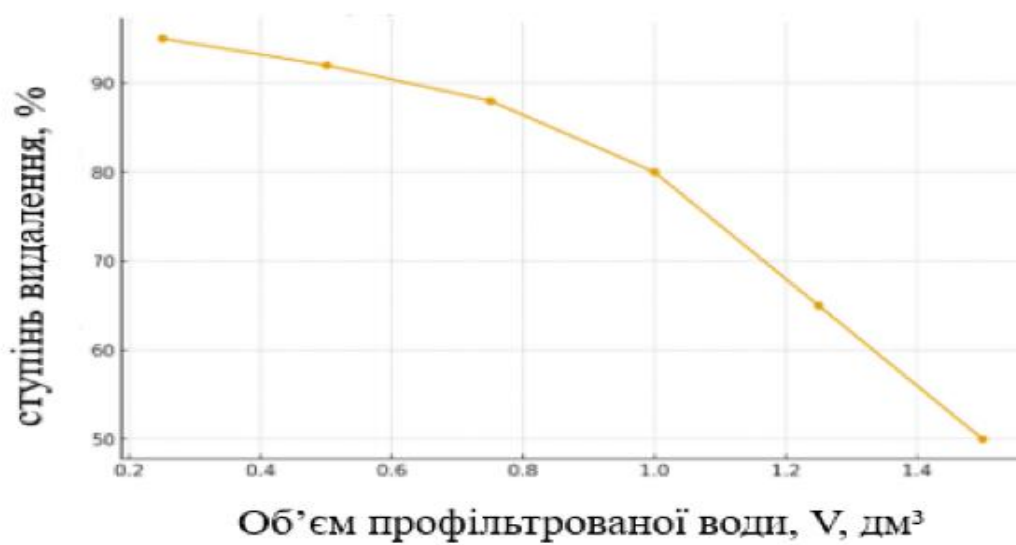


Рис. 4.2. Графік ступеня видалення нітратів

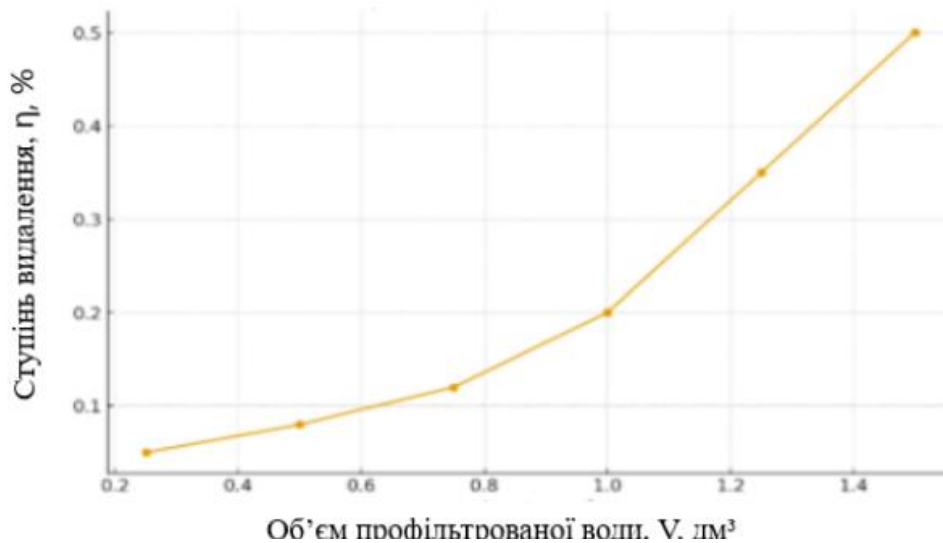


Рис.4.3. Крива прориву для нітратів

Отримані експериментальні дані показують, що:

- На початку роботи колонки ($V = 0,25\text{--}0,75$ дм³) концентрація нітратів у фільтраті залишається низькою (5–12 мг/дм³), ступінь видалення перевищує 88–95 %. Це свідчить про високий запас вільних обмінних центрів аніоніту.
- При збільшенні об'єму профільтрованої води ($V \geq 1,0$ дм³) концентрація нітратів у фільтраті починає поступово зростати (20–35 мг/дм³), а ступінь видалення знижується до 65–80 %. Це характерна ділянка “фронту обміну”.
- Після $V = 1,5$ дм³ концентрація у фільтраті сягає 50 мг/дм³, що відповідає гранично допустимій концентрації нітратів у питній воді. Цей момент можна розглядати як початок пробою фільтра, після якого вода формально вже не відповідає санітарним нормам.
- Розрахована динамічна обмінна ємність аніоніту (приблизно 2,6 мг NO₃⁻/г) узгоджується з літературними даними для сильноосновних аніонітів у режимі очищення води від нітратів.
- Для подальшої роботи колонки необхідна регенерація аніоніту розчином NaCl (або іншої солі), що супроводжується утворенням

високомінералізованих стоків, які потребують екологічно безпечної утилізації.

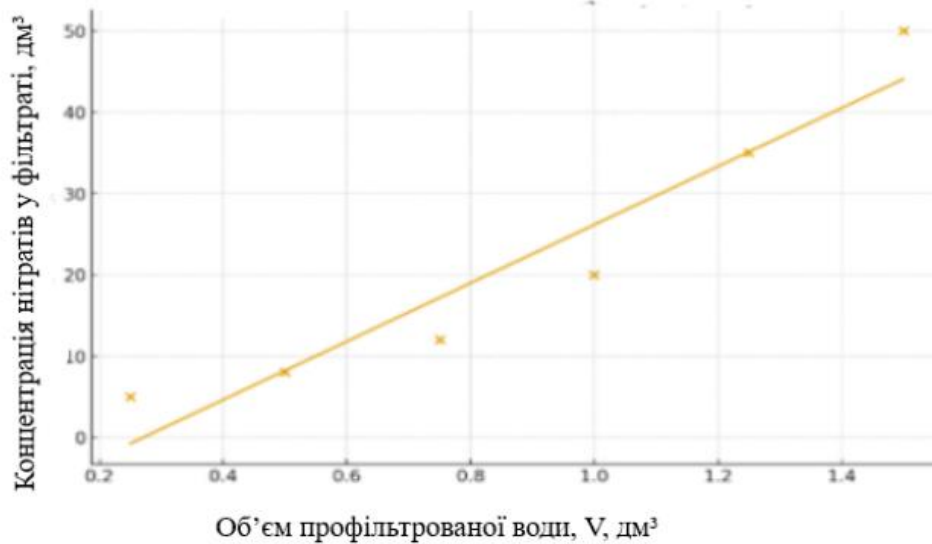


Рис.4.4. Трендова модель зміни концентрації нітратів

Очищення води від нітратів є одним із ключових завдань сучасних систем водопідготовки, оскільки підвищений вміст нітратів становить екологічну та санітарну небезпеку для водних екосистем і здоров'я людини. Аналіз існуючих технологій делітратизації показав, що найбільш ефективними підходами є іонообмінні процеси, зворотний осмос та біологічна денітрифікація, які забезпечують високу ступінь видалення нітратів за різних умов експлуатації.

Іонообмінні технології відзначаються високою продуктивністю та можливістю регенерації сорбентів, проте потребують контролю за вмістом вторинних солей. Зворотний осмос є універсальним методом із найвищим ступенем очищення, але має високу вартість мембран і енергоспоживання. Біологічні методи характеризуються екологічною безпечністю та низькими експлуатаційними затратами, проте вимагають стабільних умов для підтримання активності мікроорганізмів.

Таким чином, вибір оптимальної технології делітратизації залежить від вихідної якості води, необхідного ступеня очищення, технічних можливостей та економічних обмежень. Комбіновані схеми та впровадження сучасних матеріалів (селективних мембран, модифікованих сорбентів, біопрепаратів) дозволяють підвищити ефективність процесу та мінімізувати екологічні ризики. Отримані результати свідчать про важливість науково обґрунтованого підходу до очищення води від нітратів для забезпечення стійкого водокористування та охорони довкілля.

4.3. Пропозиції щодо вдосконалення мережі моніторингу

Ефективність контролю за якістю водних ресурсів значною мірою залежить від того, наскільки повно та системно організована мережа моніторингу. Проведені експериментальні дослідження щодо очищення води від нітратів демонструють необхідність удосконалення існуючої системи спостережень, особливо у регіонах із підвищеним рівнем антропогенного навантаження. Насамперед важливим є розширення просторової представленості моніторингових точок. У районах активного сільськогосподарського використання, де застосування азотних добрив є інтенсивним, доцільно збільшити щільність пунктів контролю підземних та поверхневих вод, оскільки саме ці території характеризуються високими ризиками накопичення нітратів. Розташування нових пунктів має враховувати напрямки підземного стоку, близькість до джерел потенційного забруднення та особливості геологічної будови території.

Не менш важливим є удосконалення частоти відбору проб. З огляду на сезонні коливання, які зумовлені внесенням добрив, інтенсивністю опадів та температурним режимом, рекомендовано запровадити диференційований підхід до періодичності спостережень. У весняно-літній період, коли ризик

вимивання нітратів у водоносні горизонти є найвищим, відбір проб має здійснюватися частіше, з інтервалом у 2–3 тижні. Восени та взимку, коли інтенсивність фільтраційних процесів знижується, достатньою буде щомісячна або двомісячна періодичність. Такий підхід дозволить оперативно фіксувати пікові концентрації забруднювачів і своєчасно реагувати на зміни водного стану.

У сучасних умовах важливим є впровадження автоматизованих систем спостереження. Використання датчиків для безперервного контролю основних параметрів — рН, електропровідності, температури, вмісту розчиненого кисню та азотних сполук — забезпечить можливість отримання даних у реальному часі. Це особливо актуально для територій із високим екологічним навантаженням, де зміна концентрацій може відбуватися швидко. Застосування онлайн-датчиків дає змогу формувати попереджувальні сигнали у разі перевищення встановлених нормативів, що дозволяє своєчасно вживати заходів для мінімізації негативних наслідків.

Окремої уваги потребує питання аналітичної точності вимірювань. Доцільно модернізувати лабораторні підрозділи, розширивши перелік методів визначення нітратів, нітритів та інших форм азоту за допомогою сучасних фотометричних, іоннохроматографічних та спектрофотометричних методів. Підвищення точності вимірювань сприятиме більш об'єктивній оцінці рівня забруднення та достовірності результатів.

Для підвищення узгодженості даних рекомендується запровадити єдину інтегровану інформаційну систему, у якій будуть агреговані результати спостережень з усіх пунктів моніторингу. Така система має забезпечувати можливість обробки даних, побудови картографічних моделей розподілу забруднювачів, аналізу динаміки змін у багаторічному та сезонному розрізі. Створення геоінформаційної бази даних дозволить

оперативно виявляти зони підвищеного екологічного ризику та прогнозувати подальший розвиток ситуації.

Удосконалення мережі моніторингу також передбачає підвищення кваліфікації персоналу, який проводить польові дослідження та лабораторний аналіз. Регулярні тренінги, впровадження стандартів відбору проб, калібрування обладнання та методичне навчання сприятимуть підвищенню якості отриманих результатів.

Підсумовуючи, пропозиції щодо вдосконалення мережі моніторингу включають розширення географії спостережень, оптимізацію частоти відбору проб, впровадження автоматизованих систем контролю, модернізацію лабораторної бази, створення єдиної інформаційної системи та підвищення професійної компетентності персоналу. Реалізація цих заходів сприятиме формуванню більш ефективної та сучасної системи контролю за якістю водних ресурсів, що є необхідною умовою для забезпечення екологічної безпеки та сталого використання водних ресурсів на території досліджуваного регіону.

РОЗДІЛ 5.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Питання охорони праці та забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях є невід'ємною складовою будь-якої виробничої або науково-дослідної діяльності, зокрема й у сфері екологічного контролю та водоочищення. Ефективна система охорони праці передбачає створення умов, що мінімізують ризики для працівників, забезпечують їх захист від потенційно небезпечних факторів, а також формують готовність до адекватних дій у разі виникнення надзвичайних ситуацій природного чи техногенного характеру.

У процесі виконання лабораторних та експериментальних робіт, пов'язаних із дослідженням якості води, іонним обміном та визначенням концентрацій забруднювачів, працівники стикаються з низкою небезпечних та шкідливих виробничих факторів. До таких факторів належать хімічні речовини (реактиви, нітратні солі, розчини кислот і лугів), фізичні фактори (робота з електроприладами, нагрівальними установками, скляним лабораторним посудом), а також ергономічні ризики (статичні навантаження, робочі пози). Використання хімічних реагентів потребує дотримання інструкцій із безпечного поводження, застосування засобів індивідуального захисту, таких як халат, захисні окуляри, рукавички та респіратори при роботі з леткими або порошкоподібними речовинами.

Важливим елементом охорони праці є організація безпечного робочого середовища. Лабораторні приміщення повинні бути оснащені припливно-витяжною вентиляцією, достатнім освітленням, аварійними вимикачами електроживлення, аптечками та засобами пожежогасіння. Робочі місця мають бути організовані таким чином, щоб уникнути переобтяження працівника та забезпечити зручність виконання операцій. Особливу увагу

приділяють правильному зберіганню реактивів: вони повинні зберігатися у маркованих ємностях, у спеціально обладнаних шафах, окремо для кислот, лугів та окисників.

Під час виконання експериментів, що стосуються водоочищення та делітратизації, важливим є контроль за використанням електричних установок, насосів, спектрофотометрів та інших приладів. Перед їх експлуатацією працівник повинен пройти інструктаж з електробезпеки, а обладнання — регулярно перевірку та технічне діагностику. Експлуатація несправних або пошкоджених приладів категорично заборонена. У разі виявлення дефектів роботу слід негайно припинити, повідомити відповідального працівника та вжити заходів для усунення несправностей.

Суттєвою складовою охорони праці є попередження пожеж та вибухів. Хоча дослідження, пов'язані з іонним обміном та аналізом нітратів, зазвичай не належать до пожежо- чи вибухонебезпечних, використання хімічних реагентів і електричного обладнання потребує дотримання правил пожежної безпеки. У лабораторії повинні бути встановлені вогнегасники відповідного типу (порошкові або вуглекислотні), пожежна сигналізація та вільні шляхи евакуації. Працівники повинні знати алгоритм дій у разі виникнення пожежі, у тому числі порядок відключення електроживлення, правила користування первинними засобами пожежогасіння та процедуру евакуації.

Надзвичайні ситуації можуть виникати як унаслідок техногенних факторів (аварії, розливи небезпечних речовин, відмова обладнання), так і природних (повені, землетруси, буревії). Система цивільного захисту передбачає завчасне планування заходів щодо попередження наслідків таких подій, інформування персоналу та навчання діям у надзвичайних ситуаціях. Кожен працівник повинен бути ознайомлений із планом реагування на надзвичайні ситуації, у якому визначені шляхи евакуації, місця збору,

відповідальні особи, а також порядок взаємодії з аварійно-рятувальними службами.

У разі розливу хімічних речовин необхідно діяти згідно з інструкцією: локалізувати місце розливу, провести нейтралізацію (для кислот і лугів), забезпечити провітрювання приміщення та повідомити відповідальних осіб. Робота відновлюється лише після повного усунення небезпеки. Дії у разі електротравм повинні включати негайне відключення джерела живлення та надання першої долікарської допомоги до прибуття медичних працівників.

З метою підвищення рівня безпеки робіт працівники повинні проходити регулярні інструктажі: вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий. Проведення інструктажів фіксується у відповідному журналі, а відповідальність за їх організацію покладається на керівника робіт або уповноважену особу з охорони праці.

Таким чином, охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях є ключовими аспектами забезпечення безпечного виконання досліджень та експериментальних робіт. Дотримання вимог законодавства, своєчасне проведення інструктажів, забезпечення засобами індивідуального захисту, правильна експлуатація обладнання та готовність до дій у надзвичайних ситуаціях дозволяють мінімізувати ризики травматизму та забезпечити безпечні умови праці у лабораторних і виробничих умовах.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі здійснено комплексне дослідження нітратного забруднення підземних вод у межах сільськогосподарського регіону с. Вістова Калуського району, що дало можливість всебічно оцінити природні, техногенні та соціально-економічні чинники, які визначають сучасний стан водних ресурсів території. Нітратне забруднення є однією з найбільш актуальних проблем агроландшафтів, оскільки безпосередньо впливає на якість питної води, стан ґрунтів, функціонування екосистем та здоров'я населення, що підтверджується як літературними джерелами, так і результатами проведених досліджень.

У першому розділі обґрунтовано теоретичні засади вивчення нітратного забруднення гідросфери. Детально розглянуто природні та антропогенні джерела надходження нітратів у підземні води, механізми міграції азотовмісних сполук у ґрунтово-водному середовищі та особливості їх трансформації під дією мікробіологічних та абіотичних процесів. Проаналізовано вплив нітратів на екосистеми та здоров'я населення. Особливу увагу приділено сучасним підходам до моніторингу підземних вод — зокрема ролі спостережних свердловин, *in situ* методів вимірювання та автоматизованих систем передавання даних. Наголошено, що формування стійких осередків нітратного забруднення є наслідком поєднання інтенсивного землекористування, недостатньої природної захищеності водоносних горизонтів та недосконалості комунальних систем у сільській місцевості.

У другому розділі проаналізовано фізико-географічні та гідрогеологічні умови с. Вістова, які мають визначальний вплив на якість підземних вод. Дослідження показало, що територія характеризується підвищеною водопроникністю ґрунтів, мілким заляганням водоносних

горизонтів (1,5–5 м), активними інфільтраційними процесами та близькістю до техногенно навантажених зон Калуського промислового району. Це створює передумови для швидкої міграції нітратів і підвищує чутливість території до будь-яких порушень правил землекористування. Окрему увагу приділено характеристиці шахтної криниці, обраної як локальний об'єкт дослідження: проаналізовано її конструктивні особливості, санітарний стан та можливі джерела забруднення з прилеглої території.

У третьому розділі здійснено оцінку просторової диференціації та сезонної мінливості концентрацій нітратів у підземних водах. Доведено, що у межах населеного пункту концентрації нітратів істотно залежать від рельєфу, типу ґрунтів, інтенсивності сільськогосподарської діяльності та близькості до джерел побутових стоків. Найвищі показники характерні для низин і зон активного землекористування, де інфільтраційні потоки акумулюють азотовмісні сполуки. Простежено чітку сезонну закономірність: максимальні концентрації фіксуються навесні (через промивання ґрунтів талою водою та весняне удобрення), мінімальні — взимку. Такі результати свідчать про масштабність проблеми та необхідність перегляду агротехнічних практик і побутових систем водовідведення.

У четвертому розділі розроблено комплекс природоохоронних заходів, спрямованих на стабілізацію та покращення якості підземних вод. Обґрунтовано доцільність оптимізації внесення азотних добрив, переходу до технологій точного землеробства, створення буферних смуг уздовж водотоків, облаштування герметичних вигрібних ям та вдосконалення управління органічними відходами. Розглянуто сучасні технології очищення вод від нітратів — включно з біологічною денітрифікацією, іонним обміном, мембранними методами та комбінованими системами очищення. Запропоновано схему вдосконалення локального моніторингу через

поєднання спостережних свердловин, автоматизованих сенсорів та GIS-аналізу.

У підсумку результати роботи свідчать, що нітратне забруднення підземних вод у с. Вістова має комплексний генезис і формується під впливом як природних, так і антропогенних факторів. Найбільш суттєвими з них є:

- негерметичні побутові стоки та локальні джерела органічного забруднення;
- надмірне або несистемне застосування азотних добрив;
- недостатня природна захищеність водоносних горизонтів;
- метеорологічні умови та сезонні цикли формування ґрунтових вод;
- техногенний вплив Калуського промислового комплексу.

Проведене дослідження підтверджує нагальну потребу у впровадженні системного моніторингу підземних вод, підвищенні рівня екологічної культури землекористування, модернізації комунальної інфраструктури та розробленні локальних програм зменшення екологічних ризиків. Реалізація запропонованих заходів дозволить забезпечити екологічну безпеку населення, стабілізувати якість підземних вод та створити науково обґрунтовані передумови для сталого використання водних ресурсів у регіоні.

Отже, магістерська робота не лише розкриває актуальну екологічну проблему, але й пропонує практично орієнтовані рішення, здатні підвищити ефективність управління водними ресурсами, мінімізувати ризики нітратного забруднення та сприяти формуванню безпечного, екологічно орієнтованого середовища проживання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Валерко Р.А., Герасимчук Л.О. Органічне сільське господарство як фактор впливу на вміст нітратів у питній воді джерел нецентралізованого водопостачання сільських населених пунктів. *Екологічні науки*. – 2020. – № 3(30). – С. 124–128.
2. Хоменко О.М., Кравченко Л.М., Жицька Л.І. та ін. Еколого-гігієнічна оцінка надходження нітратів в організм людини з питною водою. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. – 2022. – Т. 22, № 4.
3. Крупко Г., Суходольська І., Лико С., Логвиненко І. Оцінка нітратного забруднення питної води сільських населених пунктів Рівненської області. *Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Екологія. Публічне управління та адміністрування»*. – 2023. – № 3.
4. Данчишин М.В. Оцінка впливу нітратів на здоров'я населення при надходженні з питною водою: дис. ... канд. наук. – Тернопіль: ТДМУ, 2023.
5. Данчишин М.В. Оцінка впливу нітратів на здоров'я населення при надходженні з питною водою. *Вісник гігієни та епідеміології (ТДМУ)*. – 2023.
6. Ковальов М.М. Оцінка якості підземних вод для систем мікро зрошення в умовах Кропивницької ділянки. *Зрошуване землеробство*. – 2020. – Вип. 74. – С. 71–76.
7. Bondar A., та ін. The influence of water quality in the Western biogeochemical zone of Ukraine on the organism of agricultural animals. *Bulletin of Agricultural Science* (або відповідний аграрний журнал). – 2024. – Т. 28, № 2.
8. Валерко Р.А., Герасимчук Л.О. Органічне сільське господарство як фактор впливу на вміст нітратів у питній воді джерел нецентралізованого водопостачання сільських населених пунктів Житомирщини. *Технології захисту навколишнього середовища кораблебудування*. – 2024. – № 1.

9. Осадча Н.М., Осадчий В.І., Осипов В.В., Білецька С.В. та ін. Methodology for the nitrate vulnerable zones designation in surface and ground water. *Ukrainian Geographical Journal*. – 2020. – № 4. – С. 38–48.
10. Головатюк Л.М., та ін. Нітратне забруднення джерел питної води в Україні: дослідження ВЕГО «МАМА-86» за 2021–2022 рр. *Екологічні науки*. – 2023. – № 5
11. Ковальов О.О. Якість підземних вод для питних і господарсько-побутових потреб населення Кропивницької області. *Інженерна екологія*. – 2024. – № 1.
12. Скок С.В. Оцінка сучасного стану водопостачання м. Херсона та якості питної води. *Водні біоресурси та аквакультура*. – 2021. – Т. 2(10).
13. Кравчук А.А. Екологічна оцінка нітратного забруднення питної води сільських населених пунктів (на прикладі Полісся): кваліфікаційна робота. – Житомир, 2022.
14. Хоменко О.М. та ін. Еколого-гігієнічна оцінка стану питної води окремих територіальних громад Львівщини. *Довкілля та здоров'я*. – 2025.
15. Ковальов О.О., Данильчук В.С. Оцінка екологічних ризиків використання підземних вод з підвищеним вмістом нітратів. *Екологічна безпека та природокористування*. – 2024.
16. Abascal E., Gómez-Coma L., Ortiz I., Ortiz A. Global diagnosis of nitrate pollution in groundwater and review of removal technologies. *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 810. – Art. 152233.
17. Zendehbad M., та ін. Nitrate in groundwater and agricultural products: intake and risk assessment in northeastern Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. – 2022. – Vol. 29
18. Zaresefat M., Hosseini S., Ahrari Roudi M. Addressing nitrate contamination in groundwater: The importance of spatial and temporal understandings and interpolation methods. *Water*. – 2023. – Vol. 15, No. 24. – Art. 4220.

19. Sanad H., Oueld lhaj M., Zouahri A. та ін. Groundwater pollution by nitrate and salinization in Morocco: a comprehensive review. *Journal of Water and Health*. – 2024. – Vol. 22, No. 10. – P. 1756–1773.
20. Plata I., та ін. Distribution, sources and fate of nitrate in groundwater of an agricultural region. *Biogeochemistry*. – 2025.
21. Jia H., та ін. Groundwater nitrate response to hydrogeological conditions in a semi-arid region of the Chinese Loess Plateau. *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15.
22. Gao H., та ін. Tracing groundwater nitrate sources in an intensive agricultural watershed using isotopes and SOM modeling. *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14.
23. Alam S.M.K., та ін. Sources and transformations of shallow groundwater nitrate in the Yinchuan Plain. *Journal of Environmental Sciences*. – 2025.
24. Bencheikh A., та ін. Nitrate contamination in deep aquifers: Health risks and management implications. *Sustainable Cities and Society* (або інший журнал за даними статті). – 2025.
25. Wang D., та ін. Distribution, sources and main controlling factors of nitrate in groundwater in intensive agricultural regions. *Environmental Research*. – 2023. – Vol. 228. – Art. 115847.
26. Piekut A., та ін. Health risk assessment of exposure to nitrates in drinking water from private wells. *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2022. – Vol. 31
27. Mamun A., та ін. Nitrate monitoring in semi-urban groundwater using ion-selective electrodes. *Urban Science*. – 2025. – Vol. 9, No. 11. – Art. 444.
28. European Parliament. Monitoring of nitrogen in water in the EU: Legal framework, effects of nitrate, design principles, effectiveness and future developments. – Brussels, 2022. – 100 p.
29. FAO. Potential of drinking water alliances to address nitrate pollution. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022. – 56 p.

30. European Environment Agency (EEA). Nitrate in groundwater in Europe. – Indicator assessment. – Copenhagen, 2025.
31. Minnesota Department of Health. 2020–2022 Nitrate Annual Report. – Saint Paul, 2023. – 40 p.
32. Washington State Department of Ecology. Groundwater monitoring well installation 2020–2021: Quality Assurance Project Plan. – Olympia, 2021. – 60 p.
33. California Water Boards. Drinking water well monitoring for nitrates: Frequently asked questions. – Sacramento, 2025. – 15 p.
34. Kovalov O.O., та ін. Assessment of environmental and carcinogenic risks related to groundwater nitrate and aluminium content in Eastern Ukraine. *Medical Technologies and Public Health*. – 2025.
35. Ковальов О.О. Якість підземних вод та екологічні ризики у районах бойових дій на сході України. *Екологія і природокористування*. – 2025.
36. Громадська організація «Екодія». Чим небезпечні нітрати у питній воді. – Аналітичний огляд. – Київ, 2024. [Екодія](#)
37. ВЕГО «МАМА-86». Нітратне забруднення джерел питної води в Україні: результати громадського моніторингу 2021–2022 рр. – Київ, 2023. [Еко-Життя](#)
38. Osadcha N.M., Luzovitska Yu.A., Ukhan O.O. та ін. Methodology for assessing the surface water pollution by nutrients. *Journal of Water and Land Development*. – 2023.
39. Osadcha N.M., Luzovitska Yu.A., Ukhan O.O. та ін. Nutrient and organic substances emissions from diffuse sources to the rivers of Ukrainian Carpathians. – *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* (або збірник конференції). – 2022. – P. 37–48. [ResearchGate](#)
40. Valerko R., Herasymchuk L. Organic agriculture as a factor influencing nitrate levels in drinking water. *Ukrainian Journal of Ecology*. – 2021. – Vol. 11,
41. Romanchuk L., та ін. Influence of organic farming on nitrate concentrations in drinking water. *Visnyk PDAA*. – 2024.

42. Gandziura V.P. Organic farming and nitrate load on agroecosystems. *Екологічні науки*. – 2024. – № 5(56).
43. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Проблеми вдосконалення законодавства України у сфері якості питної води на прикладі імплементації «нітратної директиви» ЄС. *Екологічні науки*. – 2022.
44. Kovalenko O.V., Olabodi O.V. (ред.) Технологія питної води та водопідготовки харчових виробництв: навч. посіб. – Київ: НУХТ, 2021. – 396 с
45. 1. Gao H., Li P., Guo W. та ін. Tracing groundwater nitrate sources in an intensive agricultural watershed using isotopes and self-organizing maps. *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14. – Art. 12345.
46. Jia H., Wang S., Zhao Y. та ін. Groundwater nitrate response to hydrogeological conditions in a semi-arid region of the Chinese Loess Plateau. *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – Art. 22567.
47. Zaresefat M., Hosseini S., Ahrari Roudi M. Addressing nitrate contamination in groundwater: spatial and temporal understandings and interpolation methods. *Water*. – 2023. – Vol. 15, No. 24. – Art. 4220.
48. Sanad H., Oueld Lhaj M., Zouahri A. та ін. Groundwater pollution by nitrate and salinization in Morocco: a comprehensive review. *Journal of Water and Health*. – 2024. – Vol. 22, No. 10. – P. 1756–1773.
49. Abascal E., Gómez-Coma L., Ortiz I., Ortiz A. Global diagnosis of nitrate pollution in groundwater and review of removal technologies. *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 810. – Art. 152233.