

**Л. Л. Березюк; О. Б. Дударенко, канд. мед. наук, доц;
Л. М. Ваколюк, канд. мед. наук, доц; Н. В. Баюрко, канд. пед. наук, доц.**

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ БАКТЕРІОЛОГІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ГРУНТОВИХ ВОД

Проблема забруднення вод є актуальною для України, оскільки її водні ресурси все більше забруднюються викидами недостатньо очищених стічних вод, промисловими та побутовими відходами, термічними водами ТЕЦ, зливом добрив, пестицидів і гербіцидів із сільськогосподарських угідь, а також кислотними дощами. Забруднення підземних вод впливає на мікробіологічні показники води та на її токсичність, а у горизонтальному напрямку бактеріологічна забрудненість водоносного шару може поширюватись на значну територію від джерела забруднення. Тому, визначення регресійної залежності, яка описує динаміку рівня бактеріологічного забруднення ґрунтових вод є актуальною науково-технічною задачею. Метою дослідження є визначення регресійної залежності, яка описує динаміку рівня бактеріологічного забруднення ґрунтових вод. В статті наведено результати визначення регресійної залежності, яка описує динаміку рівня бактеріологічного забруднення ґрунтових вод, за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування експерименту методом Бокса-Уілсона другого порядку. Отримано адекватну регресійну залежність, яка описує динаміку рівня бактеріологічного забруднення ґрунтових вод. Адекватність регресійної моделі перевірялась за критерієм Фішера, а значимість коефіцієнтів регресії за критерієм Стюдента. Запропонована математична модель може бути використана для прогнозування бактеріологічного забруднення ґрунтових вод. Встановлено, що за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність отриманої регресійної моделі можна вважати правильною з 95 %-ю достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав 0,99798, що свідчить про достатню достовірність одержаних результатів. За критерієм Стюдента визначено, що серед досліджених факторів впливу найбільше на рівень бактеріологічного забруднення ґрунтових вод впливає глибина вимірювань, а найменше час вимірювань. Побудовано графічну інтерпретацію динаміки рівня бактеріологічного забруднення ґрунтових вод, яка дозволяє наочно проілюструвати цю динаміку та показати збіжність теоретичних результатів з фактичними.

Ключові слова: динаміка, бактеріологічне забруднення, ґрунтові води, математичне моделювання, планування експерименту, багатofакторна залежність, фактори впливу, поверхня відгуку.

Вступ

Проблема забруднення вод є актуальною для України, оскільки її водні ресурси все більше забруднюються викидами недостатньо очищених стічних вод [1], промисловими та побутовими відходами [2], термічними водами ТЕЦ, зливом добрив, пестицидів і гербіцидів із сільськогосподарських угідь, а також кислотними дощами [1]. Забруднення підземних вод впливає на мікробіологічні показники води та на її токсичність, а у горизонтальному напрямку бактеріологічна забрудненість водоносного шару може поширюватись на значну територію від джерела забруднення [3]. Забруднення ґрунтових вод відбувається зокрема через інтенсивне агропромислове виробництво, що призводить до погіршення якості питної води через збільшення вмісту нітратів, фосфору, органічних сполук та бактеріологічне забруднення [4, 5]. Зростання площ перевантажених полігонів і сміттєзвалищ, а також тих, що порушують норми екологічної безпеки, загрожують забрудненням навколишнього середовища (атмосфери, гідросфери та літосфери), зокрема й через бактеріологічне забруднення ґрунтів та ґрунтових вод мікроорганізмами (бактеріями кишкової палички, стрептококами, стафілококами та аскаридами), що є збудниками та переносниками хвороб [6 – 9], прилеглих земельних ділянок [10], ґрунтових вод та джерел питної води.

Постановка проблеми

Постанова Кабінету Міністрів України № 2024 зокрема містить перелік заборонених до розміщення об'єктів, що створюють загрозу мікробного забруднення джерел водопостачання [11]. Тому визначення регресійної залежності, яка описує динаміку рівня бактеріологічного забруднення ґрунтових вод і може бути використана для прогнозування такого забруднення, є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [1], зазначено, що забруднення підземних вод, у першу чергу ґрунтових, є однією з основних екологічних проблем Чернігівщини, а для покращення екологічного стану водних ресурсів області запропоновано провести комплекс заходів, що мають забезпечити нормальний стан водних об'єктів: скоротити обсяги скидів забруднених вод у водойми шляхом удосконалення технологічних процесів, покращити очистку стічних вод, проводити повну утилізацію тваринницьких стоків тощо.

Сільськогосподарському виробництву притаманний значний вплив на забруднення водних ресурсів та показники родючості ґрунту, а діяльність підприємств аграрної галузі здійснює суттєвий тиск на біологічну систему, в тому числі і через бактеріологічне забруднення ґрунтових вод [12].

В статті [13] зазначено, що окрім фізичного та хімічного забруднень, надзвичайного поширення набуло біологічне забруднення поверхневих вод, зокрема мікробне, тест-індикатором якого є кишкова паличка *E.coli*. Проведено моніторинг еколого-санітарного стану води гідротехнічних споруд м. Кременчука як джерела мікробного забруднення поверхневих вод р. Дніпро. Встановлено вплив бактеріального забруднення скидів дренажних каналів на мікробіологічні показники води р. Дніпро нижче за течією.

В роботі [14] автор дійшов до висновку, що ґрунтові води, як і джерела децентралізованого постачання, знаходяться у незадовільному стані і у більшості випадків є причиною захворювання людей на інфекційні та неінфекційні хвороби. Просочуючись разом із стічними і атмосферними опадами та частиною поверхневого стоку, забруднюючі речовини проникають у гідрогеосферу (підземну частину гідросфери), що зумовлює зміни фізико-хімічних та органолептичних властивостей підземних вод, а отже, питної води [15].

У Вінницькій області станом на 2011 р. у понад 60 % колодязів громадського користування вода не відповідала санітарним нормам за бактеріологічними показниками [16], а у 2023 році 45,3 % зразків води з криниць не відповідали нормативам за бактеріологічними показниками [17]. Якість колодязної води виявилась гіршою на 16,8 %, ніж водопровідної за бактеріологічними показниками. Невідповідність якості води санітарному законодавству є однією з причин виникнення інфекційних (вірусного гепатиту, черевного тифу, ротавірусної інфекції тощо) та неінфекційних (патології травної, серцево-судинної, ендокринної системи тощо) хвороб.

В статті [18] досліджено стан хімічний стан та бактеріологічну забрудненість поверхневих та стічних вод шахтних відвалів Бориславського озокеритового родовища. За результатами проведених санітарно-бактеріологічних досліджень встановлено, що відвали озокеритовидобутку, які утворилися внаслідок відсипання непотрібної породи є джерелом забруднення довкілля та поверхневих вод. Вода, яка пройшла крізь відвали, у середньому збагатилася на загальне мікробне число у 11 разів, а коли-індекс зріс у 15 разів порівняно із контролем. Наявність у поверхневій та стічній воді великої кількості *Escherichia coli*, спричинена тим, що поблизу, та на території Бориславського озокеритового родовища знаходяться сміттєзвалища і при підвищенні температури чисельність патогенних мікроорганізмів різко зростає.

У матеріалах статті [19] наведені дані щодо концентрацій сапрофітних бактерій у 0 – 20 см шарі дерново-слабопідзолистого ґрунту, прилеглого до полігонів захоронення ТПВ. Робота [20] містить значення санітарно-бактеріологічного складу ТПВ. У статті [21] виявлено умовно-патогенні та патогенні види мікроорганізмів у депонованих відходах, визначено якісний і

кількісний склад мікроорганізмів, що розкладають органічні речовини в ТПВ на різних етапах їхнього життєвого циклу. Автори роботи [22] наводять дані щодо зміни санітарно-бактеріологічного складу ТПВ під час компостування. У науковій статті [10] виявлено ширшу номенклатуру санітарно-бактеріологічного складу ТПВ навесні (бактерії кишкової палички, стрептококи, стафілококи та аскариди) завдяки наявності стафілококів та аскарид, відсутніх у ТПВ під час літнього компостування. У середовищі ТПВ поруч із сапрофітними розвиваються патогенні бактерії, які є носіями різних захворювань, таких як гепатит, туберкульоз, дизентерія, аскаридоз, респіраторні, алергійні, шкірні та інші захворювання [23]. В роботі [24] методом планування багатофакторного експерименту Бокса-Уїлсона визначено регресійну залежність активності біологічних процесів у ТПВ від ступеня їхнього ущільнення з плином часу, за допомогою якої встановлено, що найбільше активність біологічних процесів у ТПВ залежить від їхньої густини, найменше від часу.

У матеріалах статті [25] побудовано математичні моделі залежності концентрацій лише сапрофітних бактерій у ґрунті від відстані до полігону захоронення ТПВ, які дали змогу встановити, що з наближенням полігону суттєво знижується концентрація сапрофітних аеробних бактерій, необхідних для біохімічних реакцій розкладання органічної фракції ТПВ в місцях їхнього захоронення та самоочищення ґрунту від чужорідних органічних речовин. В роботі [26] зазначено, що традиційно міське середовище проблему накопичення відходів вирішує за рахунок сільських територій, внаслідок чого виникає проблема забруднення останніх, а саме погіршення якості ґрунтів, води, повітря, а також встановлено, що полігон ТПВ може бути причиною погіршення якості питних вод та санітарно-гігієнічного стану ґрунтів на прилеглих сільських територіях.

В статті [27] визначено регресійну залежність рівня мікробіологічного забруднення загальними коліформами ґрунтових вод від відстані до полігону ТПВ м. Миронівки Обухівського району Київської області, яку використано для визначення безпечної відстані розміщення полігонів ТПВ від джерел питної води за показником рівня мікробіологічного забруднення загальними коліформами ґрунтових вод. В роботі [28] визначено регресійну залежність рівня мікробіологічного забруднення ґрунтових вод за загальним мікробним числом від відстані до полігону ТПВ, яку використано для визначення безпечної відстані розміщення полігонів ТПВ від джерел питної води за показником рівня мікробіологічного забруднення ґрунтових вод за загальним мікробним числом.

В роботі [29] наведені рівні бактеріологічного забруднення мезофільними анаеробними та факультативно анаеробними мікроорганізмами ґрунтових вод, виміряні в різний час на різній глибині.

Однак конкретних математичних залежностей, які описують динаміку рівня бактеріологічного забруднення ґрунтових вод, в результаті аналізу відомих публікацій, авторами не виявлено.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є побудова за допомогою планування експерименту регресійної залежності, яка описує динаміку рівня бактеріологічного забруднення ґрунтових вод і може бути використана для прогнозування такого забруднення.

Методи і матеріали

Визначення регресійної залежності, яка описує динаміку рівня бактеріологічного забруднення ґрунтових вод, проводилось за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування експерименту другого порядку методом Бокса-Уїлсона [30]. Визначення коефіцієнтів рівняння регресії здійснювалась за допомогою розробленої комп'ютерної програми "PlanExp", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [31] і детально описана в роботах [32, 33].

Результати досліджень

У таблиці 1 показані рівні бактеріологічного забруднення ґрунтових вод, виміряні в різний час на різній глибині [29]. Дані наведено у вигляді загального мікробного числа (ЗМЧ) для мезофільних анаеробних та факультативно анаеробних мікроорганізмів, що визначається числом колонієутворювальних одиниць (КУО) на 1 см^3 досліджуваного матеріалу.

Таблиця 1

Рівні бактеріологічного забруднення ґрунтових вод мезофільними анаеробними та факультативно анаеробними мікроорганізмами (ЗМЧ), КУО/см³, виміряні в різний час на різній глибині [29]

Дата вимірювань		05.04.2019	16.12.2020	09.02.2024	26.07.2024
Час вимірювань, діб		1	622	1772	1940
Глибина вимірювань, м	45	26	18	5	-
	51,5	-	-	-	3
	111,5	42	32	-	2

Використовуючи планування експерименту за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування другого порядку, застосовуючи розроблене програмне забезпечення, отримано таку регресійну залежність

$$ЗМЧ = 2,968 + 0,5537h - 1,485 \cdot 10^{-4}th - 2,405 \cdot 10^{-6}t^2 - 1,732 \cdot 10^{-3}h^2 \quad [КУО/см^3], \quad (1)$$

де ЗМЧ – загальне мікробне число для мезофільних анаеробних та факультативно анаеробних мікроорганізмів в ґрунтових водах, КУО/см³; t – час вимірювань, діб; h – глибина вимірювань, м.

Наявність від’ємного знаку для квадратичного ефекту h свідчить про те, що при подальшому зростанні глибини вимірювань h подальше збільшення значення цільової функції (1) ЗМЧ носитиме затухаючий характер.

Перевірка адекватності регресійної моделі (1) проводилась за критерієм Фішера, за яким встановлено, що гіпотезу про адекватність отриманої регресійної моделі можна вважати правильною з 95 %-ю достовірністю.

Коефіцієнт кореляції склав 0,99798, що свідчить про достатню достовірність одержаних результатів.

За критерієм Стюдента визначено, що серед досліджених факторів впливу найбільше на рівень бактеріологічного забруднення ґрунтових вод впливає глибина вимірювань, а найменше час вимірювань.

На рис. 1 показано поверхню відгуку цільової функції рівня бактеріологічного забруднення ґрунтових вод ЗМЧ в площині параметрів впливу, що дозволяє наочно проілюструвати вказану залежність.

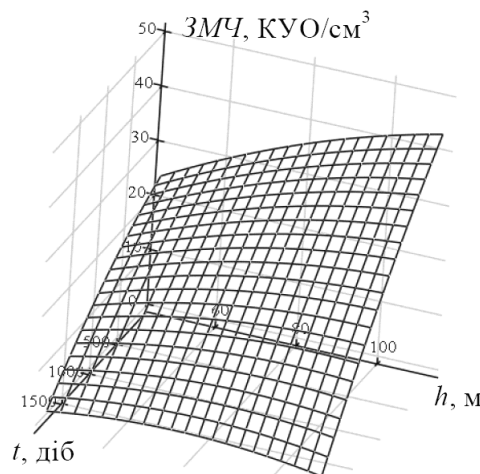


Рис. 1. Поверхня відгуку цільової функції рівня бактеріологічного забруднення ґрунтових вод ЗМЧ в площині параметрів впливу $ЗМЧ = f(t, h)$

Висновки

Визначено регресійну залежність, яка описує динаміку рівня бактеріологічного забруднення ґрунтових вод і може бути використана для прогнозування такого забруднення.

За критерієм Стюдента визначено, що серед досліджених факторів впливу найбільше на рівень бактеріологічного забруднення ґрунтових вод впливає глибина вимірювань, а найменше час вимірювань.

Побудовано графічну інтерпретацію динаміки рівня бактеріологічного забруднення ґрунтових вод, яка дозволяє наочно проілюструвати цю динаміку та показати збіжність теоретичних результатів з фактичними на рівні 0,99798.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Барановська О. В., Захлинюк М. С. Водні ресурси Чернігівщини та їх екологічний стан. *Збірник наукових праць викладачів природничо-географічного факультету*. Ніжин, 2009. Випуск 3. С. 60–69.
2. Березюк О. В. Мікробіологічне забруднення ґрунтових вод у місці знаходження полігону твердих побутових відходів. *Сучасні проблеми раціонального використання водних біоресурсів* : збірник матеріалів III Міжнародної науково-практичної конференції, 25-27 жовтня 2021 р. Київ: ПРО ФОРМАТ, 2021. С. 23–25.
3. Мадж С. М. Токсикологічна оцінка якості ґрунтових вод на територіях, прилеглих до об'єктів цивільної авіації. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. 2014. № 24. С. 60–65.
4. Ткачук В. І. Екологізація виробництва як пріоритет процесу диверсифікації аграрних підприємств. *Ефективна економіка*. 2014. № 4. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2899>
5. Березюк О. В., Павлюк В. В. Перспективи використання параметрів відбитого світла для вимірювання рівня забрудненості води. *Електронне наукове видання матеріалів XLII регіональної науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів ВНТУ*. URL: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2013/ineek/txt/pavlyuk.pdf>.
6. Шевчук Т. І., Шкарупа В. М., Хлестова С. С. Антропогенна зміна довкілля як фактор поширення паразитарних захворювань людини. *Довкілля і здоров'я* : матеріали наук.-практ. конф., 27-28 квіт. 2017 р. Тернопіль, 2017. С. 220–222.
7. Пісчун Р. П., Горбатюк С. М. Функціональна морфологія головного мозку при атеросклерозі в експерименті та під впливом вінпоцетину. *Таврійський медико-біологічний вісник*. 2006. Т. 9, № 3. С. 100–113.
8. Чорна В. В., Хлестова С. С., Гуменюк Н. І. Показники захворюваності і поширеності та сучасні погляди на профілактику хвороб. *Вісник Вінницького національного медичного університету*. 2020. Т. 24, №1. С. 158–164.
9. Горбатюк С. М., Гринчак Н. М., Мусатова К. В. Лігногумат натрію як модифікатор мутагенних ефектів мітоміцину С. *Ліки людині. Сучасні проблеми фармакотерапії і призначення лікарських засобів*: матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції, 30-31 березня 2017. Харків: Національний фармацевтичний університет, 2017. Т. 2. С. 97.
10. Березюк О. В., Горбатюк С. М., Березюк Л. Л. Моделювання динаміки санітарно-бактеріологічного складу твердих побутових відходів під час літнього компостування. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2013. № 4. С. 17–20.
11. Кабінет Міністрів України. Постанова № 2024 “Про правовий режим зон санітарної охорони водних об'єктів” 18 грудня 1998. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2024-98-%D0%BF#Text>
12. Погрішук Б. В. Екологічні засади розвитку аграрної економіки у концепції сталого розвитку. *Вісник ХНАУ ім. В. В. Докучаєва. Серія „Економічні науки”*. 2019. № 4, Т. 1. С. 368–377.
13. Зюман Б. В., Пасенко А. В., Касай О. В. Екологічна ситуація стану поверхневих вод р. Дніпро щодо мікробного забруднення. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. 2012. № 4. С. 90–96.
14. Павлюк Н. В. Оцінка якості природної води. *Збірник наукових праць ЖНАЕУ*. Ж.: ЖНАЕУ. 2014. С. 75–79.
15. Злобін Ю. А. Загальна екологія: навчальний посібник. Суми: ВТД «Університетська книга», 2003. 416 с.
16. Петрук В. Г., Гайдей Ю. А., Вовк О. С. Аналіз стану якості питної води у колодязях м. Вінниці та Вінницької області. *Збірник наукових праць ВНАУ*. 2011. № 8 (48). С. 119–123.
17. Гуфельд К. Оприлюднено результати досліджень якості води на Вінниччині. 23 березня 2024. URL: <https://presspoint.in.ua/2024/03/23/opryliudneno-rezultaty-doslidzhen-ia-kosti-vody-na-vinnychyni/>
18. Кречківська Г. В. Дослідження стічних та поверхневих вод відвалів Бориславського озокеритового родовища. *Науковий часопис НПУ імені МП Драгоманова. Серія 20: Біологія*. 2013. № 5. С. 174–181.
19. Гринчишин Н. М., Лозовицька Т. М. Вплив важких металів на мікробіоценоз дерново-слабопідзолистого ґрунту. *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С. З. Гжицького*. 2009. Т. 11, № 2(41), Ч. 4. С. 54–57.
20. Щербо А. П. Гигиенические вопросы обезвреживания бытовых отходов. *Хлопинские чтения* : доклад на XXIII научной конференции, 16 января 1991 года. Л.: Издание ин-та усовершенствования врачей им. С. М. Кирова, 1990. 25 с.

21. Зомарев А. М. Санитарно-гигиенический мониторинг полигонов захоронения твердых бытовых отходов (ТБО) на этапах жизненного цикла: автореф. дисс. на соискание уч. степени докт. мед. наук. Пермь: 2010. 50 с.
22. Microbial disinfection capacity of municipal solid waste (MSW) composting / I. Deportes et al. *Journal of Applied Microbiology*. 1998. № 85. P. 238–246.
23. Лехмус О. О. Методи та технології переробки побутових і суднових відходів. Миколаїв: НУК, 2004. 48 с.
24. Березюк О. В., Горбатюк С. М., Березюк Л. Л. Регресійна залежність активності біологічних процесів у твердих побутових відходах від ступеня їхнього ущільнення з часом. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2020. № 2. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/600/568>.
25. Березюк О. В., Березюк Л. Л. Побудова моделей залежності концентрацій сапрофітних бактерій у ґрунті від відстані до полігону захоронення твердих побутових відходів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. №1. С. 36–39.
26. Макаренко Н. А., Будак О. О. Вплив полігонів твердих побутових відходів на прилеглі сільські території. *Таврійський науковий вісник*. 2015. № 93. С. 227–233.
27. Березюк О. В., Хлестова С. С., Гринчак Н. М., Горбатюк С. М. Залежність рівня мікробіологічного забруднення загальними коліформами ґрунтових вод від відстані до полігону твердих побутових відходів. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2021. № 3. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/638/599>.
28. Березюк О. В., Хлестова С. С., Климчук І. М., Березюк Л. Л. Вплив наближення до полігону твердих побутових відходів на рівень мікробіологічного забруднення ґрунтових вод за загальним мікробним числом. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2023. № 1. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/675/639>.
29. Результаты дослідження бактеріологічних змін у водоносних горизонтах в умовах підвищення температури / А. А. Барило та ін. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 4 (79). С. 112–118.
30. Andersson O. Experiment!: planning, implementing and interpreting. John Wiley & Sons, 2012. 288 p.
31. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Планування експерименту" ("PlanExp"). Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 46876. Київ : Державна служба інтелектуальної власності України. Дата реєстрації: 21.12.2012.
32. Березюк О. В. Моделювання компресійної характеристики твердих побутових відходів у сміттєвозі на основі комп'ютерної програми "PlanExp". *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 6. С. 23–28.
33. Березюк О. В. Планування багатофакторного експерименту для дослідження вібраційного гідроприводу ущільнення твердих побутових відходів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2009. № 3 (55). С. 92–97.

Стаття надійшла до редакції 12.05.2025.

Стаття пройшла рецензування 03.06.2025.

Березюк Людмила Леонідівна – секретар деканату факультету машинобудування та транспорту. Вінницький національний технічний університет.

Дударенко Оксана Борисівна – канд. мед. наук, доцент кафедри загальної гігієни та екології.

Ваколюк Лариса Миколаївна – канд. мед. наук, доцент кафедри загальної гігієни та екології. Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова.

Баюрко Наталія Василівна – канд. пед. наук, доцент кафедри біології. Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського.