

© О.М. Назаренко¹, А.О. Березовська¹, Є.І. Буякова¹, О.Л. Іщенко¹, Є.А. Шерстюк²

¹ Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

² Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ СКЛАДОВИХ ЕКОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД МЕТАЛУРГІЙНИХ РЕГІОНІВ ПІВДНЯ УКРАЇНИ

© O. Nazarenko¹, A. Berezovska¹, Ye. Buyakova¹, O. Ischenko¹, Y. Sherstiuk²

¹ National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

SUBSTANTIATION OF COMPONENTS OF ECOLOGICAL GROUNDWATER RECHARGE SYSTEM FOR METALLURGICAL REGIONS OF SOUTHERN UKRAINE

Мета: на основі аналізу особливостей забруднення підземних вод металургійних регіонів півдня України обґрунтувати складові екологічної системи живлення річкових басейнів.

Методика: аналіз літературних джерел, статистична обробка даних гідрологічних та гідрогеологічних досліджень, розробка експериментальних польових та лабораторних досліджень кумулятивної інфільтрації ґрунтів та адсорбційної здатності матеріалів.

Результати: Сформовані загальні уявлення про складові екологічної системи живлення підземних вод в умовах металургійних регіонів півдня України. Отримані дані щодо використання методик досліджень природних матеріалів для продуктивних інфільтрацій поверхневих і стічних вод та можливості формування резервів води для живлення річкового басейну. Запропонована методологія щодо вивчення і врахування взаємозв'язків між різними токсикантами водної системи, що дозволяє ефективніше вирішувати питання локалізації забруднення та живлення басейну.

Новизна. Вдосконалено методологію вивчення та оптимізації процесів, що впливають на стан підземних вод у регіонах з високою концентрацією металургійних підприємств, яка комплексно включає визначення специфічних забруднювачів, розробку нових методів очищення, моделювання та прогнозування інфільтрації стоків. Запропоновано нову інтегровану систему живлення водного басейну регіону, яка розглядає можливість використання стічних вод після їх локального очищення у якості резерву живлення поверхневих вод.

Практичне значення результатів: Результати дослідження матимуть значення при формуванні карт поглинання ґрунтів південних регіонів України, із врахуванням особливостей металургійних регіонів, де інтенсивно використовується вода у промислових процесах, для визначення потенційного обсягу формування резервів підземних вод, а також для подальших досліджень у питаннях інфільтрації води під впливом змін клімату та техногенних факторів.

Ключові слова: водні ресурси, живлення річкових басейнів, підземні води, інфільтрація стоків.

Вступ. В умовах сучасного промислового розвитку особливо актуальним стає питання забезпечення живлення підземних вод у металургійних регіонах України та умови отримання оптимальних ґрунтових сумішей для інфільтрації

частково забруднених та умовно чистих вод. Екологізація комплексної системи живлення водного басейну та фільтраційний підхід стічних вод для цих регіонів стає передумовою для збереження біорізноманіття та забезпечення сталого розвитку. Задоволення потреби в воді для промислового виробництва, а також для побутових потреб населення, вимагає інтегрованого підходу до управління водними ресурсами.

У роботі досліджуються можливості розвитку та впровадження систем живлення підземних вод металургійних регіонів України. Насамперед аналізуються існуючі технології очищення та використання технічних вод, враховуючи специфіку водокористувачів промисловості, у регіонах. На основі хімічного та фізичних якісних показників розробляються пропозиції щодо оптимізації використання водних ресурсів з метою мінімізації негативного впливу промислових стоків на навколишнє середовище. Результати роботи мають на меті теоретичне та практичне застосування екологічних заходів.

Аналіз останніх досліджень: Сьогодні екологічні дослідження впливу підприємств на екологічний стан регіонів розглядаються в працях багатьох українських та зарубіжних вчених. Зокрема українські науковці оцінюють вплив металургійних підприємств на підземні води, моделюють та прогнозують забруднення підземних вод, досліджують методи очищення забруднених промислових вод та проводять екологічний моніторинг підземних стічних вод. Усі вищевикладені процеси були описані в працях таких українських науковців Чижикова, О.Б. [1], Сідоренко, Л.І. [2]; Павленко О.А. [3], Литвиненко Ю.М. [4] та інших.

Проблемі очищення стічних вод присвячено багато робіт закордонних дослідників [5–10], зокрема, актуальною темою є пошук та створення ефективних адсорбуючих матеріалів для стічних вод [8], окремої уваги заслуговує спроба створення глобальної бази даних за результатами експериментів з інфільтрації [10]. Проте, спектр забруднюючих агентів є специфічним в залежності від умов утворення, а на процеси відновлювального живлення підземних вод впливають природні просторові фактори, такі як кліматичні та літо-геологічні, що визначальним чином впливає на параметризацію технологічного процесу живлення підземних вод [11, 12].

Результати досліджень на сьогодні дозволяють створювати карти стічних вод металургійних підприємств, але недостатньо вивченим є питання розробки та розбудови екологічної системи живлення підземних вод.

Таким чином, метою даного дослідження є обґрунтування складових екологічної системи живлення річкових басейнів на основі аналізу особливостей забруднення підземних вод металургійних регіонів півдня України, що ставить перед собою вирішення актуальних **задач** експериментального дослідження адсорбційних властивостей фільтрувальних матеріалів, а також дослідження процесів інфільтрації технологічних вод, які дадуть можливість визначити кумулятивну ґрунтову та миттєву інфільтрацію; дослідити та визначити фактори впливу на інфільтраційний процес, визначити математичне рівняння живлення підземних вод, миттєву швидкість інфільтрації та ефективну насичену вологу ґрунту, знайти оптимальні суміші ґрунтів та їх похідних для інфільтрації умовно чистих

та забруднених вод при формуванні резервів води для живлення річкового басейну. Результати досліджень, в свою чергу, дозволять дослідити та класифікувати фактори впливу на інфільтраційний процес.

Виклад основного матеріалу. При обґрунтуванні екологічної системи живлення підземних вод пропонується розглядати комплекс практичних підходів до поліпшення якості скидних вод шляхом природної інфільтрації та використання сорбуючих матеріалів.

Для знаходження оптимальних сумішей ґрунтів та їх похідних інфільтрації умовно чистих та забруднених вод, що є необхідним для формування технічних резервів води для живлення річкового басейну розроблені програми експериментальних досліджень у лабораторних та польових умовах з використанням зразків ґрунту різного складу (суглинків, глин, супісків, керамзиту) для найбільш результативної фільтрації умовно чистих та забруднених вод в умовах південного промислового регіону України. Дослідження результатів очищення вод методом ґрунтової інфільтрації залежно від хімічного складу проводяться протягом часу від 3 до 72 годин на кожній дослідній ділянці.

Експериментальне визначення кумулятивної глибини ґрунтової інфільтрації в лабораторних умовах виконується шляхом створення зразків ґрунту. Дослідні зразки ґрунтів в розмірі 3×10 см циліндричної форми розташовуються в мірному циліндрі та заливаються техногенними розчинами. Для формування банку даних досліджень відібрані три зразки промислових стоків з наступним якісним складом:

Зразок 1 – мутність 120 град; рН=8,4; жорсткість 12,8 мг-екв/л; лужність 7,1 мг-екв/л; $C_{O_2} = 28$ мг/л; $C_{CO_2} = 15$ мг/л; солевміст = 1200 мг/л.

Зразок 2 – мутність 78 град; рН=7,8; жорсткість 11,2 мг-екв/л; лужність 5,2 мг-екв/л; $C_{O_2} = 21$ мг/л; $C_{CO_2} = 12$ мг/л; солевміст = 810 мг/л.

Зразок 3 – мутність 28 град; рН=6,7; жорсткість 5,2 мг-екв/л; лужність 3,8 мг-екв/л; $C_{O_2} = 12$ мг/л; $C_{CO_2} = 5$ мг/л; солевміст = 670 мг/л.

Період інфільтрації фіксується секундоміром та вологоміром. Ефективно насичена провідність ґрунту визначається розчинною концентрацією кисню в порах ґрунтів (%/мм²). Середній капілярний потенціал визначається як площа пор ґрунту віднесена до середнього розміру пор. Кумулятивна глибина інфільтрації визначається вмістом середньої вологи на глибині ґрунту 10, 20, 40 см. Точність лабораторного експерименту складає 98%. У випадку фіксування граничних параметрів за межами розглянутого масиву даних, отримане значення бракується, таким чином, похибка має складати 2 %.

Визначення адсорбційної здатності рулонних тканинних матеріалів. Для виготовлення органо-неорганічних гібридних фільтрувальних матеріалів застосовується золь-гель метод. Тетраалкоксисилани ($Si(OR)_4$), подібні до таких як тетраетил ортосилікат (TEOS) або тетраметил ортосилікат (TMOS) широко використовуються як базова платформа для отримання монолітного кремнезему, завдяки їх гідрофобності та міцному ковалентному зв'язку Si-O [6].

Очевидно, що ці матеріали породили чимало цікавості для їх потенційного застосування в багатьох областях, таких як: адсорбція [6], системи доставки

живлення [5,7], біосенсорів [6, 13–18], нанотехнології та застосування наномедицини та каталізу [5].

Усі реагенти, що приймають участь у дослідженні, мають аналітичну якість, використовуються без подальшого очищення. Гідрофобний тетраетил ортосилікат (TEOS, 99%) використовується як базовий аналог кремнезему, тоді як етанол розглядається як вміщуюче середовище. Промисловий стік, який містить речовини $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \times 2,3\text{H}_2\text{O}$ та $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \times 2,6\text{H}_2\text{O}$ використовується як джерело металу для польових та лабораторних адсорбційних експериментів.

Відповідно до задач досліджень, ксерогелі синтезуються з використанням технології Helali [6]: 10,0 мл деіонізованої води, 20,0 мл етанолу та 22,8 мл TEOS змішуються при енергійному магнітному перемішуванні. До готової суміші додається необхідна кількість органічного компоненту (10,1 М, 11,6 г 1,3,4-тіадіазол-2,5-діамінолу або 15,0 г 1,3,4-тіадіазол-2,5-дитіолу). Після цього, суміш реагентів перемішується протягом часу тривалістю 6 год при температурі 78°C і на останньому етапі суміш дозріває протягом часу 48 год при температурі 100°C .

Морфологія ксерогелю вивчається за допомогою мікроскопа. Текsturні властивості гібридних матеріалів визначаються за ізотермами адсорбції-десорбції N_2 , що записані при 77 К. Питома площа поверхні розраховується за допомогою багатоточкового аналізу (ВЕТ) у інтервалі відносного тиску $0,03 < P/P^\circ < 0,3$. Хоча розподіл розміру пор отримується від адсорбційно-десорбційних гілок ізотерми, загальний об'єм пор оцінюється при відносному тиску від $P/P^\circ = 0,99$.

При проведенні експериментів в польових умовах враховується клімат району дослідження, який є переважно сухим, із високими літніми температурами із малою кількістю опадів. Активне осушення ґрунту дослідної ділянки відбувається за допомогою каналів та черепичних дренажів, як фактор осушення також розглядається інтенсифікація землекористування. Переміщення ґрунту і регулювання річок на території досліджень призвели до сильного виродження чорнозему. Зміна схем потоків води призвела до мобілізації поживних речовин від гниючої рослинності, що є фактором збільшення кількості поживних речовин для більшості каналів та деяких ділянок річки [17].

Для проведення польових експериментів підготовлено використання 4 траншей довжиною 50-100 м, шириною 0,5-1,0 м, глибиною 1,0 м. Дослідні ділянки виконані неподалік промислового майданчику (селище Запоріжжя Ліве).

Математичний експеримент проведений для встановлення ефективної глибини розташування сучасних фільтраційних промислових елементів для розробки ефективності просочення штучних ґрунтів (глибина складає 0,5 м від поверхні ґрунту).

Точність польового експерименту визначається статистичними методами та складає 96 %. Якщо отримана величина параметру видається за межі розглянутого масиву, отримане значення бракується з похибкою 4 %.

Природна інфільтрація умовно чистих стоків. Розробка системи живлення водного басейну визначає всі можливі екосервісні пости та басейни, що призначені для підготовки ресурсу живлення, чи то кавітаційні пристрої, чи рекреаційні водоймища [14–16]. Система передбачає контроль обсягу використання стічного

ресурсу по дренажних ділянках та визначення залишкової вологи на основі літологічних властивостей ґрунту району. Розроблене рівняння інфільтрації одностадійного стаціонарного стану при неглибокому рівні води (5,0 см) виглядає наступним чином:

$$f(t) = k_e \left[1 + \frac{0,78\psi_f + \Delta\theta}{F(t)} \right],$$

де $f(t)$ – швидкість миттєвої інфільтрації з розміром (L/T); k_e – ефективна насичена провідність (L/T); ψ_f – середній капілярний потенціал; $\Delta\theta$ – дефіцит насичення вологою (L/L); $F(t)$ – кумулятивна глибина інфільтрації (L).

Дефіцит насичення вологою ґрунту розраховується:

$$\Delta\theta = \varphi_{total} - \theta_i, \quad (2)$$

де φ_{total} – повна (загальна) пористість (L/L); θ_i – початковий об’ємний вміст води (L/L).

Остаточно рівняння (1) можна переформулювати:

$$k_e t = F(t) - \gamma_f \Delta\theta \ln \left[1 + \frac{F(t)}{\gamma_f \Delta\theta} \right], \quad (3)$$

де t – час (T).

Рівняння (4) може бути вирішене для кумулятивної глибини інфільтрації, F для послідовних збільшень [8] часу за допомогою ітерацій Ньютона-Рафсона разом з рівнянням (3), для одержання миттєвої швидкості інфільтрації. Для випадків постійних опадів в районі інфільтрація є двостадійним процесом. Перший етап в такому випадку відбувається, коли кількість опадів менша, ніж потенційна інфільтрація [9], а другий – коли кількість опадів перевищує потенційну інфільтрацію. Модифікований вигляд рівняння інфільтрації для двоступеневого процесу:

$$t_p = \frac{k_e 0,78\psi_f \Delta\theta}{i(i - k_e)},$$

де i – величина кількості опадів, (L).

Фактична швидкість інфільтрації отримується шляхом побудови кривої потенційної інфільтрації, починаючи з часу t_0 :

$$t = t_p - t_0. \quad (5)$$

Час інфільтрації, t_p залежить від літологічних властивостей досліджуваного ґрунту та його початкового ступеня насичення вологою:

$$t_p = \frac{F - \gamma_f \Delta \theta \ln \left(1 + \frac{F}{\gamma_f \Delta \theta} \right)}{k_e}, \quad (6)$$

де F – кумулятивна глибина інфільтрації (L) у момент поглинання, для випадку постійних опадів, дорівнює загальному вмісту води за час інфільтрації:

$$\theta_e = \gamma_{total} - \theta_r, \quad (7)$$

де γ_{total} – повна пористість, або $1 - (\text{об'ємна щільність}) / 2,65$; θ_r – залишковий вміст води в ґрунті (V/V).

Ефективна пористість ґрунту θ_e вважається властивістю незалежно від вологості ґрунту та обсягу зволожуючого фрагменту висоти всмоктування. Використовуючи параметри утримання води ґрунтом, вона показує вміст вологості ґрунту як функцію висоти всмоктування попереднього зволоження:

$$\gamma_f = \frac{2 + 4\lambda\gamma_b}{k_e}, \quad (8)$$

де γ_b – бар'єрний тиск (L), λ – індекс розподілу розмірів пор.

Величина кількості опадів в даному випадку вважається рівною величині інфільтрату ґрунту. Відкоригований час, обчислений за рівнянням (8), використовується в рівнянні (6) для характеристики одноступеневого процесу зволоження [6].

Обчислення параметрів кумулятивної та миттєвої інфільтрації ґрунтів для кожної конкретної ділянки вимагає наявності даних про літологічні параметри покривного шару ґрунту, які широко варіюються за регіонами України та є визначальним фактором при інфільтрації [17].

Таким чином, маючи дані про склад і характер покривного шару ґрунтів дає можливість обчислення кумулятивної та миттєвої інфільтрації ґрунтів по кожному регіону, що, в свою чергу, дозволяє здійснювати визначення потенційний обсяг відновлених вод для формування стратегічних резервів живлення водомищ шляхом формування карт поглинання ґрунтів південних регіонів України, із врахуванням особливостей металургійних регіонів, де інтенсивно використовується вода у промислових процесах.

Висновки. Лабораторні та польові дослідження кумулятивної та миттєвої інфільтрації вод мають важливе значення для розуміння процесів інфільтраційного водопоглинання ґрунтів та їх впливу на екологізацію техногенно навантаженого регіону:

В роботі досліджені основні фактори впливу на інфільтраційний процес, визначено математичне рівняння живлення підземних вод, миттєвої швидкості інфільтрації та ефективної насиченої води ґрунту.

Обґрунтований комплекс експериментальних польових та лабораторних досліджень проникності ґрунтів різного складу, фільтруючих матеріалів для визначення оптимальних сумішей ґрунтів та їх похідних для інфільтрації умовно

чистих та забруднених вод при формуванні резервів води для живлення річкового басейну.

Застосований системний підхід класифікує ресурсні можливості стоків, формує уявлення про хімічний склад потоків, розглядає можливості використання стічних вод після локального очищення через інфільтрацію вод з урахуванням як технічних, так і екологічних аспектів.

Різноманітність ґрунтових умов по регіонах обумовлює потребу у формуванні карт поглинання ґрунтів по районах України для визначення потенційного обсягу формування резервів підземних вод. Результати становитимуть основу для продовження досліджень гідравлічних характеристик потоків, зокрема у вивченні динаміки інфільтрації води під впливом змін клімату та техногенних факторів, а також розробку методів підвищення проникності штучних ґрунтів.

Перелік посилань

1. Чижикова, О. Б., та ін. (2018). *Вплив металургійних підприємств на стан підземних вод*.
2. Сідоренко, Л. І., та ін. (2016). *Хімічні забруднювачі в підземних водах промислових регіонів*.
3. Павленко, О.А. (2020). *Математичне моделювання розповсюдження забруднювачів у підземних водах*.
4. Литвиненко, Ю.М. (2019) *Біологічні методи очищення підземних вод*.
5. Yi, Z., Tang, Q., Jiang, T. & Cheng, Y. (2019). Adsorption performance of hydrophobic/hydrophilic silica aerogel for low concentration organic pollutant in aqueous solution. *Nanotechnology Reviews*, 8(1), 266-274. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2019-0025>
6. De Mello, J. R., Machado, T. S., Crestani, L., Alessandretti, I., Marchezi, G., Melara, F., ... & Piccin, J. S. (2022). Synthesis, characterization and application of new adsorbent composites based on sol-gel/chitosan for the removal of soluble substance in water. *Heliyon*, 8(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09444>
7. Alaoui, A., & Goetz, B. (2008). Dye tracer and infiltration experiments to investigate macropore flow. *Geoderma*, 144(1–2), 279–286.
8. Basset, C., Abou Najm, M., Ghezzehei, T., Hao, X., & Daccache, A. (2023). How does soil structure affect water infiltration? A meta-data systematic review. *Soil and Tillage Research*, 226, 105577. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105577>
9. Bagarello, V., Castellini, M., Di Prima, S., & Iovino, M. (2014). Soil hydraulic properties determined by infiltration experiments and different heights of water pouring. *Geoderma*, 213, 492–501. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.032>
10. Rahmati, M., Weihermüller, L., Vanderborght, J., Pachepsky, Y. A., Mao, L., Sadeghi, S. H., ... & Vereecken, H. (2018). Development and analysis of the Soil Water Infiltration Global database. *Earth System Science Data*, 10(3), 1237–1263.
11. Ahlström, A., Canadell, J. G., Schurgers, G., Wu, M., Berry, J. A., Guan, K., & Jackson, R. B. (2017). Hydrologic resilience and Amazon productivity. *Nature communications*, 8(1), 387. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00306-z>
12. Chushkina, I., Napich, H., Matukhno, O., Pavlychenko, A., Kovalenko, V., & Sherstiuk, Y. (2024). Loss of small rivers across the steppe: climate change or the hand of man. Case study of the Chaplynka river. *International Journal of Environmental Studies*. 1–15. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2314853>
13. Dadin, D., Celle-Jeanton, H., Crini, N., Loup, C., Steinmann, M., Vystavna, Y., Huneau, F., & Vergeles, Y. (2017) Distribution of persistent organic pollutants and trace metals in surface waters in the Seversky Donets River basin (Eastern Ukraine). *Proceedings of EGU General Assembly*, 1914670D. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..1914670D/abstract>

14. Гримак, О. Л. (2014). Екологічний моніторинг водних ресурсів Західного Бугу. «Екологія. Людина. Суспільство», XVII Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих учених (21-23 травня 2014 р., м. Київ): збірка тез доповідей, 142–143. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45436>
15. Про затвердження Національного плану дій з охорони навколишнього природного середовища на період до 2025 року: Розпорядження Кабінету міністрів України від 21 квіт. 2021 р. № 443-р. (2021). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/443-2021-%D1%80#Text>
16. Про схвалення Водної стратегії України на період до 2050 року: Розпорядження Кабінету міністрів України від 9 груд. 2022 р. № 1134-р. (2022). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text>
17. Поплавська, В.В., & Назаренко, О.М. (2015). До моніторингу якості підживлювальної води водного басейну р. Дніпро м. Запоріжжя. *Містобудування та територіальне планування*, 55, 327–333. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2015_55_46
18. Степова, О.В., & Рома, В.В. (2016). Оцінка біогенного забруднення поверхневих водойм Полтавської області. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, 1–2, 93–97. http://nbuv.gov.ua/UJRN/VPDAA_2016_1-2_21

ABSTRACT

Purpose. to substantiate the components of the ecological system of river basins based on the analysis of the characteristics of groundwater pollution within the metallurgical regions of southern Ukraine.

Methods. analysis of literary sources, statistical processing of data from hydrological and hydrogeological studies, development of experimental field and laboratory studies of cumulative soil infiltration and adsorption capacity of materials.

Findings. General ideas concerning the components of the ecological system of groundwater recharge in conditions of the metallurgical regions of southern Ukraine have been formed. Data on the use of research methods of natural materials for productive infiltration of surface water and wastewater and the possibility of forming water reserves for the river basin recharge have been obtained. A methodology for studying and considering the interrelations between various toxicants of the water system has been proposed, which allows for more effective solutions to the issues of pollution localization and basin recharge.

The originality. The methodology of studying and optimizing processes that affect the groundwater condition in regions with a high concentration of metallurgical enterprises has been improved, which comprehensively includes the identification of specific pollutants, the development of new methods of water purification, the modeling and forecasting of wastewater infiltration. A new integrated system for recharging the water basin of the region is proposed, which considers the possibility of using wastewater after its local treatment as a reserve for surface water recharging.

Practical implementation. The results of the study will be important in the formation of soil absorption maps of the southern regions of Ukraine, considering the characteristics of metallurgical regions where water is intensively involved into industrial processes, for determining the potential capacity of groundwater reserves formation, as well as for further research into water infiltration under the influence of climate change and man-made factors.

Keywords: water resources, river basin recharge, groundwater, sewage infiltration.