УДК 556.3

Модернізація підходів до розрахунку зон санітарної охорони підземних вод: від аналітичних методів до гідрогеологічних моделей

Дихман Є.М.[1], *ORCID 0009-0006-4729-946X, model@geosys.com.ua;*
Варюшкін М.А.[1], *ORCID 0009-0003-0077-9296, geo@geosys.com.ua;*
Негода Ю.О.[2], *ORCID 0000-0002-7708-0040, ynegoda2008@gmail.com;*
1 – ТОВ «ГЕОЛОГІЧНІ СИСТЕМИ», Харків, Україна,
2 – Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

Розглянуто проблему проєктування меж зон санітарної охорони (ЗСО) підземних водозаборів в Україні для гармонізації з європейськими стандартами. Встановлено, що традиційні аналітичні методи розрахунку (Орадовської, Лапшина) та моделі аналітичних елементів (WhAEM, GFLOW) є застарілими й обмеженими. Вони не здатні повноцінно врахувати складні гідрогеологічні умови, багатошарові напірні системи та взаємодію з поверхневими водами. Запропоновано перехід до чисельного гідрогеологічного 3D-моделювання за допомогою комплексу MODFLOW та модуля трекінгу часток MODPATH. Цей підхід дозволяє визначати фізично обґрунтовані межі ЗСО за реальним часом міграції забруднювачів, виконувати прогнозні розрахунки та інтегрувати результати в ГІС (QGIS, ArcGIS). Обґрунтовано необхідність оновлення нормативно-правової бази для впровадження моделювання як стандарту. Це дозволить уникнути ризиків забруднення водозаборів через заниження меж ЗСО та зайвих земельних обмежень через їх штучне розширення.

Ключові слова: підземні води, санітарна охорона, зони санітарної охорони, забруднення, нормативно-правова база, моделювання.

Modernization of approaches to the calculation of groundwater sanitary protection zones: from analytical methods to hydrogeological models

Dykhman Yevhen[1], *ORCID 0009-0006-4729-946X, model@geosys.com.ua;*
Variushkin Mykyta[1], *ORCID 0009-0003-0077-9296, geo@geosys.com.ua;*
Negoda Iurii[2], *ORCID 0000-0002-7708-0040, ynegoda2008@gmail.com;*
1 – GEOLOGICAL SYSTEMS LLC, Kharkiv, Ukraine
2 – Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The problem of designing the boundaries of sanitary protection zones (SPZ) for groundwater intakes in Ukraine is considered in terms of harmonization with European standards. It is established that traditional analytical calculation methods (Oradovska, Lapshyn) and analytic element models (WhAEM, GFLOW) are obsolete and limited. They cannot fully account for complex hydrogeological conditions, multilayer confined systems, and interaction with surface waters. A transition to numerical 3D hydrogeological modeling using the MODFLOW suite and the MODPATH particle tracking module is proposed. This approach allows determining physically justified SPZ boundaries based on the real migration time of pollutants, performing predictive simulations, and integrating results into GIS (QGIS, ArcGIS). The necessity of updating the regulatory framework to implement modeling as a standard is justified. This will prevent groundwater contamination risks from underestimated SPZ boundaries and unnecessary land restrictions from their artificial expansion.

Keywords: groundwater, sanitary protection, sanitary protection zones, contamination, regulatory framework, modeling.

Вступ. Вода є одним із найцінніших природних ресурсів, від якості та доступності якого залежить здоров’я населення, розвиток економіки та збереження навколишніх екосистем. В Україні, як і у багатьох інших країнах, захист водних об’єктів від забруднення та виснаження визначено як пріоритетне завдання державної політики. Одним із ключових інструментів забезпечення належної якості водних ресурсів є створення зон санітарної охорони (ЗСО) водних об’єктів.

Зони санітарної охорони – це спеціально визначені території навколо джерел питного водопостачання, які створюються з метою захисту цих джерел від будь-яких видів забруднення. Їхня основна мета полягає у гарантуванні безпеки води для питних та господарсько-побутових потреб, а також у збереженні екологічної рівноваги водних об'єктів. Належним чином спроєктовані ЗСО сприяють:

- забезпеченню якості води шляхом запобігання хімічному, біологічному та радіологічному забрудненню;
- збереженню біорізноманіття та надійному захисту вразливих водних екосистем;
- виконанню міжнародних стандартів, що допомагає Україні відповідати суворим нормам ЄС у сфері управління водними ресурсами.

Нормативно-правова база та структура ЗСО. В Україні порядок організації ЗСО регламентується Водним кодексом України, Законом України «Про питну воду, питне водопостачання та водовідведення» , постановою Кабінету Міністрів України № 2024, ДБН В.2.5-74:2013 та ДСанПіН 2.2.4-171-10. Відповідно до чинного законодавства виділяють три пояси санітарної охорони: пояс суворого режиму, пояс обмежень та пояс спостереження, для яких встановлюються різні режими господарської діяльності.

Комплексний процес створення ЗСО включає декілька етапів: польові еколого-гідрогеологічні дослідження (гідрогеологічна та екологічна характеристика водного об'єкта); проєктування (визначення меж поясів, режимів господарювання та необхідних заходів захисту); погодження та затвердження проєкту органами влади і санітарними службами; встановлення меж на місцевості.

Зони санітарної охорони є вкрай важливим механізмом захисту водних ресурсів України. Чітке законодавче регулювання створює необхідну основу для їхнього функціонування, але для успішного подолання сучасних екологічних викликів потрібні додаткові зусилля, включаючи належне фінансування, суворий контроль та підвищення загальної екологічної свідомості. Тільки такий комплексний підхід зможе гарантовано забезпечити населення якісною питною водою та зберегти водні екосистеми.

У Європейському Союзі нормативно-правове регулювання визначається Водною рамковою директивою (Directive 2000/60/EC) та оновленою Директивою про питну воду (Directive (EU) 2020/2184), які впроваджують ризик-орієнтований підхід до управління водозбірними басейнами. На практиці це реалізовано через трирівневу систему зон санітарного захисту. Перша зона (Zone I) забезпечує фізичний захист споруд водозабору; друга (Zone II) обмежується відрізком часу добігання води тривалістю 50 діб, що розраховано на природне відмирання патогенних мікроорганізмів; третя (Zone III) охоплює весь гідродинамічний басейн водозабору для відстеження стійких хімічних забруднювачів.

Сучасний світовий досвід також акцентує увагу на інтеграції даних про ЗСО у геоінформаційні системи (ГІС) та нормативні акти землекористування (zoning ordinances). Замість створення виключно формальних просторових обмежень, міжнародні стандарти вимагають проведення суцільної інвентаризації потенційних джерел забруднення (POTS - Potential Sources of Contamination), моніторингу якості підземних вод у режимі реального часу та розробки планів локалізації аварійних розливів токсичних речовин.

Мета досліджень. Метою даної роботи є обґрунтування необхідності модернізації підходів до розрахунку меж зон санітарної охорони підземних вод в Україні шляхом переходу від традиційних аналітичних методів до чисельного гідрогеологічного 3D-моделювання, а також ініціація розробки відповідних оновлень у нормативно-правовій базі ДКЗ та Держгеонадр.

Проблематика існуючих методів розрахунку. На сьогодні в Україні межі зон санітарної охорони здебільшого визначаються за аналітичними методиками (Орадовської, Лапшина та ін.), які ґрунтуються на спрощених припущеннях про однорідний ізотропний водоносний горизонт нескінченного поширення зі сталими фільтраційними властивостями та лінійним напрямком руху підземних вод.

Такі припущення істотно відрізняються від реальних гідрогеологічних умов. Просторова неоднорідність геологічної будови, анізотропія фільтраційних властивостей, взаємодія з поверхневими водами, робота груп водозабірних свердловин, вплив інших

водозаборів, кар'єрів або дренажних систем призводять до складної конфігурації потоків підземних вод, яка не може бути адекватно описана аналітичними рішеннями.

Еволюція методів визначення зон санітарної охорони. Слід зазначити, що між традиційними аналітичними методами та сучасним чисельним гідрогеологічним моделюванням існує проміжний клас моделей, побудованих на методі аналітичних елементів (Analytic Element Method, AEM). Найбільш відомою реалізацією цього підходу є програмний комплекс WhAEM (Wellhead Analytic Element Model), розроблений Агентством з охорони навколишнього середовища США (U.S. EPA) для визначення зон захоплення підземних вод (Wellhead Protection Areas). Аналогічною, але трохи розширену функціональність має програма GFLOW (Groundwater Flow Analytic Element Model).

На відміну від класичних аналітичних формул, WhAEM не обмежується розрахунком радіуса або еліпса впливу водозабору. Модель описує фільтраційний потік за допомогою методу аналітичних елементів, який ґрунтується на принципі суперпозиції аналітичних розв'язків. Окремі елементи моделі представляють експлуатаційні свердловини, річки, області інфільтраційного живлення, гідрогеологічні межі та інші природні або техногенні об'єкти, що формують структуру потоку підземних вод.

Разом з тим WhAEM залишається двовимірною моделлю, побудованою на припущенні Дюпюї, відповідно до якого вертикальні складові руху підземних вод вважаються незначними порівняно з горизонтальними. Такий підхід забезпечує достатню точність для відносно однорідних безнапірних водоносних горизонтів, коли ширина зони захоплення значно перевищує насичену потужність пласта. Однак у складних багатошарових гідрогеологічних умовах, при наявності суттєвих вертикальних перетікань між водоносними горизонтами або при експлуатації напірних систем можливості цього підходу є обмеженими.

Саме тому сучасною тенденцією є використання повноцінних тривимірних моделей MODFLOW у поєднанні з модулем трасування MODPATH.

На відміну від моделей аналітичних елементів, вони дозволяють моделювати багатошарову геологічну будову, просторову неоднорідність та анізотропію фільтраційних властивостей, вертикальний водообмін між горизонтами, взаємодію з поверхневими водами, роботу груп водозаборів та змінний у часі режим експлуатації. Завдяки цьому межі зон санітарної охорони визначаються на основі фізично обґрунтованої тривимірної моделі руху підземних вод, що значно підвищує достовірність прогнозів.

Таблиця 1. Переваги та обмеження різних методик щодо обчислення ЗСО

Характеристика	Спрощені методи	WhAEM, GFLOW	Повнофункціональні моделі (наприклад, MODFLOW)
Реалістичність відображення гідрогеологічних умов	Низька (фіксовані радіуси, однорідний потік)	Середня / Висока (враховує довільні форми річок, геологічні межі та регіональне інфільтраційне живлення)	Дуже висока
Складність та вхідні дані	Мінімальні	Помірні (легше вчитися та керувати, ніж 3D-моделями)	Високі
Вартість та час	Найдешевші / найшвидші	Оптимальний баланс (дешевше і швидше за MODFLOW)	Найдорожчі та найтриваліші
Обмеження	Надмірне спрощення	Відсутність** 3D-елементів, мінливої позначки підошви пласта, декількох горизонтів та нестаціонарного режиму	Практично відсутні (підтримує складні 3D/нестаціонарні умови)

Перевагою цих програм також; є те, що вони безкоштовні та стали своєрідним стандартом у гідрогеологічних дослідженнях, що пов’язані із математичним

моделюванням. В таблиці 1 наведені порівняльні характеристики різних підходів щодо обчислення ЗСО.

Сучасний підхід: моделювання в MODFLOW та MODPATH. Використання інструментів чисельного 3D-моделювання в програмі MODFLOW у безпосередньому поєднанні з модулем трасування частинок MODPATH дозволяє ефективно вирішити ці неточності, даючи змогу побудувати повністю фізично обґрунтовані межі зон санітарної охорони та точні ізохрони просування підземних вод.

Сутність запропонованого підходу полягає у використанні тривимірної чисельної гідрогеологічної моделі MODFLOW у поєднанні з модулем трасування частинок MODPATH. Після калібрування моделі на фільтрах експлуатаційних свердловин розміщується система умовних частинок, для яких виконується зворотне трасування (backward particle tracking) у напрямку, протилежному руху підземних вод. У процесі розрахунків визначаються положення частинок через нормативні проміжки часу: $T_2 = 200$ діб для другого поясу ЗСО (бактеріологічне забруднення) та $T_3 = 9125$ діб (25 років) для третього поясу (хімічне забруднення).

Отримані множини точок формують області живлення експлуатаційних свердловин, зовнішня огинаюча яких визначає межі відповідних поясів зон санітарної охорони. На відміну від традиційних аналітичних методів, такий підхід враховує реальну геологічну будову, неоднорідність і анізотропію водоносних горизонтів, взаємодію з поверхневими водами та вплив сусідніх водозаборів. Результати моделювання легко експортуються до QGIS або ArcGIS, де виконуються побудова полігонів ЗСО, їх просторовий аналіз та прив'язка до кадастрових карт і потенційних джерел забруднення.

Особливо важливою перевагою такого підходу є можливість оцінки часу міграції потенційних забруднювачів до експлуатаційних свердловин. Саме час транспортування, а не лише геометрична відстань, визначає конфігурацію зон санітарної охорони. У результаті межі ЗСО набувають складної просторової форми, яка відповідає реальній структурі потоку підземних вод, а не спрощеним геометричним фігурам, що отримуються аналітичними методами.

Використання чисельного моделювання також дозволяє виконувати багатоваріантні прогнозні розрахунки для різних сценаріїв експлуатації водозабору, зміни кліматичних умов, скорочення або збільшення інфільтраційного живлення, введення нових свердловин, ліквідації існуючих водозаборів чи появи нових потенційних джерел забруднення. Таким чином, моделі стають не лише інструментом одноразового визначення меж ЗСО, а й ефективною системою підтримки управлінських рішень у сфері охорони підземних вод.

Запровадження аналогічного підходу в Україні дозволить гармонізувати національні методики із сучасними європейськими вимогами, підвищити наукову обґрунтованість проєктів зон санітарної охорони, забезпечити більш надійний захист джерел питного водопостачання та створити єдину сучасну нормативно-методичну базу, що відповідатиме міжнародним стандартам управління водними ресурсами.

Висновки. Наведене порівняння свідчить, що аналітичні методи залишаються придатними лише для попередніх оцінок або територій із простими гідрогеологічними умовами. Натомість чисельне гідрогеологічне моделювання забезпечує комплексний облік природних і техногенних чинників, дозволяє визначати реальні зони захоплення водозаборів, оцінювати час міграції потенційних забруднювачів та виконувати прогнозні сценарії зміни умов експлуатації. Саме тому використання комплексу MODFLOW–MODPATH сьогодні розглядається як найбільш науково обґрунтований підхід до визначення меж зон санітарної охорони підземних вод.

Зважаючи на викладене, пропонується модернізувати державний підхід до визначення меж ЗСО, для сприяння використанню сучасних методів гідрогеологічного моделювання. Відповідні зміни необхідно ініціювати та внести до діючих нормативно-правових актів і методичних вказівок Держгеонадр та ДКЗ, що регламентують порядок розрахунку та затвердження ЗСО. Використання сучасних методів дозволить раз і назавжди уникнути як

небезпечного заниження розрахункових меж ЗСО (що створює прямий ризик забруднення джерела питного водопостачання), так і їх необґрунтованого штучного розширення (що накладає на надрокористувачів і землевласників зайві економічні та земельні обмеження).

Список використаних джерел:

- Верховна Рада України. (2026a). *Водний кодекс України: Кодекс України № 213/95-ВР*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-vr#Text
- Верховна Рада України. (2026b). *Про питну воду, питне водопостачання та водовідведення: Закон України № 2918-III*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2918-14#Text
- Кабінет Міністрів України. (2020). *Про правовий режим зон санітарної охорони водних об'єктів: Постанова № 2024*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2024-98-p#Text
- Міністерство охорони здоров'я України. (2025). *Про затвердження Державних санітарних норм та правил "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10): Наказ № 400*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches. (2006). *DVGW Technical Rule W 101: Drinking water protection zones for groundwater*. DVGW Rulework. https://www.dvgw.de/
- European Parliament and Council of the European Union. (2000). *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj
- European Parliament and Council of the European Union. (2020). *Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast)*. http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj
- Haitjema, H. M. (1995). *Analytic element modeling of groundwater flow*. Academic Press.
- Haitjema, H., & Kelson, V. (n.d.). *GFLOW: Groundwater flow analytic element model*. U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/hydrowq/gflow-groundwater-flow-analytic-element-model
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005: The U.S. Geological Survey modular ground-water model—The ground-water flow process* (Techniques and Methods 6-A16). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/tm6A16
- Kraemer, S. R., & Haitjema, H. M. (2018). *Working with WhAEM demonstration of capture zone delineation for a city wellfield in a valley fill glacial outwash aquifer for wellhead protection* (EPA/600/B-18/089). U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/hydrowq/wellhead-analytic-element-model-whaem
- Oradovskaia, A. E., & Lapshyn, N. N. (1987). *Sanytarnaia okhrana vodozaborov podzemnykh vod* [Sanitary protection of groundwater intakes]. Nedra.
- Pollock, D. W. (2016). *User guide for MODPATH version 7—A particle-tracking model for MODFLOW* (Open-File Report 2016-1086). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/ofr20161086
- Schmoll, O. (2006). *Protecting ground water for health: Managing the quality of drinking-water sources*. World Health Organization.

References:

- Cabinet of Ministers of Ukraine. (2020). *On the legal regime of sanitary protection zones for water bodies: Resolution No. 2024*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2024-98-p#Text [in Ukrainian].
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches. (2006). *DVGW Technical Rule W 101: Drinking water protection zones for groundwater*. DVGW Rulework. https://www.dvgw.de/ [in English].
- European Parliament and Council of the European Union. (2000). *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for*

Community action in the field of water policy. http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj [in English].
- European Parliament and Council of the European Union. (2020). *Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast)*. http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj [in English].
- Haitjema, H. M. (1995). *Analytic element modeling of groundwater flow*. Academic Press. [in English].
- Haitjema, H., & Kelson, V. (n.d.). *GFLOW: Groundwater flow analytic element model*. U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/hydrowq/gflow-groundwater-flow-analytic-element-model [in English].
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005: The U.S. Geological Survey modular ground-water model—The ground-water flow process* (Techniques and Methods 6-A16). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/tm6A16 [in English].
- Kraemer, S. R., & Haitjema, H. M. (2018). *Working with WhAEM demonstration of capture zone delineation for a city wellfield in a valley fill glacial outwash aquifer for wellhead protection* (EPA/600/B-18/089). U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/hydrowq/wellhead-analytic-element-model-whaem [in English].
- Ministry of Health of Ukraine. (2025). *On approval of State sanitary norms and rules "Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption" (DSanPiN 2.2.4-171-10): Order No. 400*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text [in Ukrainian].
- Oradovskaya, A. E., & Lapshin, N. N. (1987). *Sanitarnaia okhrana vodozaborov podzemnykh vod* [Sanitary protection of groundwater intakes]. Nedra. [in Russian].
- Pollock, D. W. (2016). *User guide for MODPATH version 7—A particle-tracking model for MODFLOW* (Open-File Report 2016-1086). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/ofr20161086 [in English].
- Schmoll, O. (2006). *Protecting ground water for health: Managing the quality of drinking-water sources*. World Health Organization. [in English].
- Verkhovna Rada of Ukraine. (2026a). *Water Code of Ukraine: Code of Ukraine No. 213/95-VR*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-vr#Text [in Ukrainian].
- Verkhovna Rada of Ukraine. (2026b). *On drinking water, drinking water supply and wastewater disposal: Law of Ukraine No. 2918-III*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2918-14#Text [in Ukrainian].