

DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.338812>

УДК 550.4:502.55

E-mail:

dogchemist@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-3312-3178>

dmitri.bugay@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2404-5639>

REVIEW OF INTERNATIONAL EXPERIENCE IN GROUNDWATER MONITORING AT NUCLEAR LEGACY SITES

ОГЛЯД МІЖНАРОДНОГО ДОСВІДУ МОНІТОРИНГУ ПІДЗЕМНИХ ВОД НА ОБ'ЄКТАХ ЯДЕРНОЇ СПАДЩИНИ

Dmytro O. Hryhorenko, Dmitri O. Bugai

Д. О. Григоренко, Д. О. Бугай

Інститут геологічних наук НАН України, вул. О. Гончара, 55-б,
Київ, Україна, 01601

Моніторинг підземних вод на об'єктах ядерної спадщини України є важливою складовою забезпечення радіаційної безпеки населення та навколишнього середовища. Актуальною проблемою є запровадження в практику гідрогеологічного моніторингу сучасних методичних підходів і інструментальних методів з використанням найкращого міжнародного досвіду. Виконаний нами огляд реалізації моніторингу підземних вод на таких об'єктах ядерної спадщини, як Селлафілд (Sellafield) у Великій Британії, ядерні лабораторії Чок-Рівер у Канаді (Chalk River Nuclear Laboratories), майданчики виробництва матеріалів для ядерної зброї в США, пов'язані з «Мангеттенським проектом» Хенфорд (Hanford) та іншими подібними об'єктами, засвідчує необхідність системного підходу, який поєднує чітке визначення цілей, планування і реалізацію моніторингу, розробку концептуальних моделей забруднених ділянок, оптимізацію мереж пунктів спостережень, використання сучасних конструкцій свердловин, методів відбору та аналізу проб, впровадження сучасних інформаційних технологій аналізу даних і адаптивного управління, а також інтеграцію моніторингу з моделями гідрогеологічних процесів. Значну увагу приділяють заходам щодо забезпечення і контролю якості даних, а також відкритості звітності та інформуванню громадськості. Гармонізація українських нормативів і стандартів у галузі моніторингу із міжнародними підходами (МАГАТЕ, ISO, ASTM) та впровадження найкращих світових практик є безальтернативним напрямком підвищення ефективності моніторингу та забезпечення екологічної безпеки на об'єктах ядерної спадщини України.

Ключові слова: моніторинг підземних вод, об'єкти ядерної спадщини, радіаційна безпека, спостережні свердловини, міжнародні стандарти.

Keywords: groundwater monitoring, nuclear legacy sites, radiation safety, monitoring well network optimization, international standards.

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2025. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

© Publisher Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Groundwater monitoring at nuclear legacy sites in Ukraine is an important component of ensuring radiation safety of the population and the environment. A current challenge is the implementation of modern methodological approaches and instrumental methods in hydrogeological monitoring practice, using the best international experience. Our review of groundwater monitoring implementation at such nuclear legacy sites as Sellafield in the United Kingdom, Chalk River Nuclear Laboratories in Canada, and nuclear weapons material production sites in the United States associated with the Manhattan Project (Hanford, Savannah River) demonstrates the need for a systematic approach that combines clear definition of objectives, planning and implementation of monitoring, development of conceptual models of contaminated sites, optimization of monitoring networks, use of modern well designs, sampling and analytical methods, introduction of modern information technologies for data analysis and adaptive management, as well as integration of monitoring with hydrogeological process models. Significant attention

Цитування: Григоренко Д. О., Бугай Д. О. Огляд міжнародного досвіду моніторингу підземних вод на об'єктах ядерної спадщини. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2025. Том 18. Вип. 2. С. 3–18. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.338812>.

Citation: Hryhorenko D. O., Bugai D. O., 2025. Review of International Experience in Groundwater Monitoring at Nuclear Legacy Sites. Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine. Vol. 18. Iss. 2. P. 3–18. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.338812>.

is paid to measures of quality assurance and quality control of data, as well as openness of reporting and public information. Harmonization of Ukrainian regulations and standards in the field of monitoring with international approaches (IAEA, ISO, ASTM) and implementation of the best international practices is an indispensable direction for increasing the effectiveness of monitoring and ensuring environmental safety at nuclear legacy sites in Ukraine.

ВСТУП

Моніторинг підземних вод на об'єктах ядерної спадщини є важливим інструментом забезпечення екологічної і радіаційної безпеки, що дає змогу контролювати можливе поширення радіоактивного забруднення з метою запобігання ризикам щодо навколишнього середовища і здоров'я населення. Це питання є особливо важливим для України, де проблема радіоактивного забруднення підземних вод є актуальними зокрема для численних об'єктів Чорнобильської зони відчуження (Bugai et al., 2022; Панасюк та ін., 2019), Придніпровського хімічного заводу у м. Кам'янське (Лаврова та ін., 2022) і майданчиків зберігання радіоактивних відходів (РАВ) Державного об'єднання «Радон» (Мельниченко та ін., 2015).

Мережі спостережних свердловин і програми моніторингу підземних вод на цих об'єктах у багатьох випадках були запроєктовані і реалізовані у 1970–1990-х роках, є технічно та морально застарілими, потребують удосконалення і модернізації (Джепо та ін., 1996; Бугай та ін., 2021). Міжнародні стандарти, розроблені Міжнародним агентством з атомної енергії (МАГАТЕ) (IAEA, 2001, 2004a/b, 2012, 2014), Міжнародною організацією зі стандартизації (International Organization for Standardization, ISO) (ISO, 2009, 2014, 2021, 2023, 2024) та Американського товариства випробувань та матеріалів (American Society for Testing and Materials, ASTM) (ASTM, 2019a/b, 2023, 2024, 2025), підкреслюють необхідність системного підходу до оцінювання стану підземних вод з використанням сучасних методик моніторингу, інструментальних засобів та інформаційних технологій. Впровадження цих стандартів в Україні і їх адаптація до місцевих умов є важливим кроком до гармонізації національних нормативів з міжнародними рекомендаціями. Особливо актуальним є досвід, отриманий на «складних» об'єктах ядерної спадщини, таких як Селлафілд (Sellafield Ltd, 2016; Heneghan, 2025) та Дунрей (Sneddon, 2023) у Сполученому Королівстві Великої Британії та Північної Ірландії, ядерні лабораторії Чок-Рівер (CNL, 2024; CNSC, 2022) у Канаді, а також на об'єктах у США, пов'язаних із Мангеттенським проєктом, об'єкт Хенфорд (PNNL, 2000, 2007), і на інших подібних об'єктах. Виконаний у статті огляд

засвідчує, що найкращі міжнародні практики в галузі моніторингу підземних вод на радіаційно забруднених ділянках наголошують на такому:

- необхідність системного підходу з чітким визначенням цілей і завдань системи моніторингу, процедур інтерпретації отриманих даних і прийняття на їх підставі управлінських рішень;
- використання сучасних конструкцій спостережних свердловин і адаптованих до умов забрудненої ділянки конфігурації мережі пунктів моніторингу;
- застосування надійних методів відбору і аналізу зразків підземних вод;
- залучення сучасних електронних датчиків і автоматизованих систем вимірювань гідрогеологічних параметрів;
- використання сучасних інформаційних систем і методів збору і аналізу даних моніторингу з метою розробки ефективних і технічно обґрунтованих стратегій управління радіаційно забрудненими об'єктами;
- запровадження чітких і надійних програм аналізу і контролю якості даних (QA/QC) на всіх етапах моніторингових досліджень;

Мета даної роботи — огляд і обговорення перелічених вище ключових елементів реалізації сучасних систем ефективного моніторингу підземних вод на радіаційно небезпечних об'єктах.

МІЖНАРОДНІ СТАНДАРТИ ТА КЕРІВНИЦТВА

Міжнародні організації, зокрема МАГАТЕ, ISO та ASTM, надають інструкції та керівництва щодо моніторингу забруднення підземних вод, які можуть бути застосовані до радіоактивного забруднення гідрогеологічного середовища. Це сприяє уніфікації процедур, забезпеченню якості даних, а також сприяють міжнародному обміну досвідом.

До основних документів належать:

- стандарти безпеки та інші документи МАГАТЕ, які містять загальні вимоги та керівні принципи щодо моніторингу підземних вод у місцях можливого радіоактивного забруднення, зокрема поблизу сховищ радіоактивних відходів (звіти МАГАТЕ SSG-31, SRS-35, TRS-391, TECDOC-1199 (IAEA, 1999, 2001, 2004a, 2014)) та об'єктів ядерної спадщини (звіти МАГАТЕ SRS-72; TRS-424 (IAEA, 2004b, 2012));

- стандарти ISO, які включають серію документів щодо проектування програм відбору проб води, включаючи підземні води, зберігання та обробку проб, забезпечення якості тощо (ISO, 2009, 2014, 2021, 2023, 2024);
- стандарти ASTM надають сучасні рекомендації щодо проектування та облаштування свердловин для моніторингу підземних вод, відбору зразків, документування відбору зразків, забезпечення та контролю якості, тощо (ASTM, 2019a/b, 2023, 2024, 2025).

СИСТЕМНИЙ СТРУКТУРОВАННИЙ ПІДХІД ДО МОНІТОРИНГУ ПІДЗЕМНИХ ВОД

Аналіз міжнародного досвіду показує, що важливо використовувати структурований і системний підхід до моніторингу забруднених підземних вод. Як приклад, у США при розробці планів моніторингу сховищ небезпечних відходів або забруднених ділянок застосовується процес визначення цілей якості даних (Data Quality Objectives – DQO), що описаний у Директиві US EPA OSWER № 9355.4–28 (US EPA, 2004, 2006). Відповідний процес розробки плану моніторингу складається з шести кроків (рис. 1).

Крок 1. Потрібно оцінити необхідну діяльність на об'єкті, визначити її основні цілі, кінцеві результати та механізм дії. Далі формулюються конкретні завдання моніторингу, які мають забезпечити контроль за перебігом процесів та їх відповідністю встановленим критеріям. Важливим етапом є врахування думки зацікавлених сторін, що сприяє узгодженню підходів і пріоритетів.

Крок 2. Створюються концептуальні моделі ділянки, які описують очікувані процеси та взаємозв'язки у досліджуваній системі. Визначаються основні гіпотези та питання, на які має відповісти моніторинг.

Крок 3. Визначаються критерії та правила, за якими прийматимуться управлінські рішення на підставі результатів моніторингу. Це включає «референтні» (контрольні) значення для виявлення змін або відхилень гідрогеологічних, радіаційних і геохімічних параметрів, а також алгоритми реагування на отримані результати.

Крок 4. Розробляється детальна структура моніторингової програми. Визначаються потреби у даних, просторові та часові межі моніторингу, методи збору та аналізу даних. Формулюються та фіналізуються правила ухвалення рішень. Також

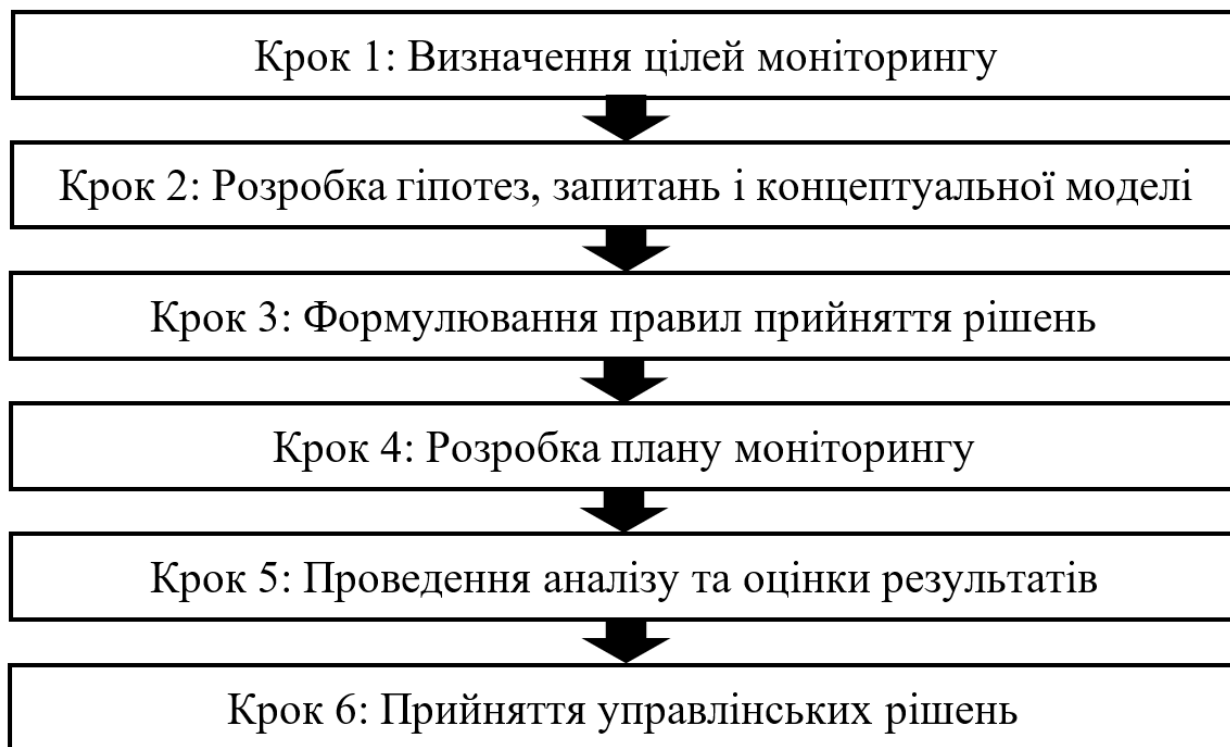


Рис. 1. Покроковий процес розробки та впровадження плану моніторингу (US EPA, 2004).

Fig. 1. Step-by-step process for developing and implementing a monitoring plan (US EPA, 2004).

готується план забезпечення якості моніторингу (Monitoring Quality Assurance Project Plan), який гарантує надійність та відтворюваність результатів. План моніторингу підземних вод має надавати інформацію, необхідну для оцінювання того чи досягаються відповідні екологічні цілі, зокрема, оцінку кількісного стану підземних вод, хімічного стану та довгострокових тенденцій у природних умовах і тенденцій у масиві підземних вод, спричинених людською діяльністю (ЕС, 2007).

Крок 5. Здійснюються збір та аналіз даних відповідно до визначених критеріїв якості даних, розроблених на попередніх етапах. Оцінюються отримані результати, проводиться їх порівняння з установленими правилами ухвалення рішень. У разі потреби можуть бути внесені коригування у процес збору та аналізу даних. Досліджуються аналітичні результати, оцінюється їх відповідність критеріям прийняття рішень (US EPA, 2004).

Крок 6. Ухвалюється рішення щодо подальших дій на підставі результатів моніторингу. Якщо результати підтверджують відповідність діяльності встановленим критеріям і цілі досягнуті, то діяльність на об'єкті завершується разом із моніторингом. Якщо результати ще не повністю відповідають критеріям, але спостерігається позитивна тенденція, діяльність і моніторинг продовжуються. Якщо результати не підтверджують відповідність критеріям і не демонструють позитивної динаміки, проводиться аналіз причин і невизначеностей, переглядається план діяльності або план моніторингу, після чого впроваджуються необхідні коригувальні заходи.

Планування моніторингу підземних вод потребує періодичного перегляду і оновлення, щоб відображати актуальні цілі щодо якості даних (DQOs) для майданчика (US DOE, 2012; US EPA, 2016). DQOs часто змінюються протягом життєвого циклу проєкту. Так, мережа спостережних свердловин спочатку може створюватися для визначення просторового розподілу та масштабу забруднення підземних вод («початкова характеристика ділянки»), включаючи встановлення фонових характеристик якості підземних вод. Під час досліджень на стадії техніко-економічного обґрунтування методу ремедіації часто бурять нові свердловини для уточнення ситуації та/або проведення пілотних випробувань технологій. В міру того, як майданчик переходить до етапу ремедіації, програма моніторингу зосереджується на оцінюванні показників ефективності застосованої технології.

РОЗРОБКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ДІЛЯНКИ Початковим етапом при плануванні і проєктуванні системи моніторингу підземних вод є створення концептуальної моделі ділянки, (КМД; Conceptual Site Model – CSM) (Environment Agency, 2001; USACE, 2012; US EPA, 2006, 2012; ASTM, 2020). Зазвичай КМД містить візуальний (наприклад, у вигляді блок-схеми) та/або текстовий опис гідрогеологічних умов ділянки, джерел забруднення гідрогеологічного середовища і їх характеристик, а також механізмів і шляхів міграції забруднювачів у геосфері в напрямку потенціальних рецепторів (наприклад, водозабірні свердловини, поверхневі водойми), які можуть зазнати негативного впливу від забруднень.

КМД зазвичай включає:

- схему ділянки із зазначенням джерел (потенційного) забруднення, напрямків фільтрації підземних вод, розташування свердловин та інших пунктів моніторингу, а також рецепторів забруднення;
- геологічні та гідрологічні характеристики ділянки (геологічна будова, основні водоносні горизонти, шляхи фільтрації);
- опис джерел (потенційного) радіоактивного і хімічного забруднення підземних вод (інженерні характеристики, запаси забруднювачів, механізми витоків забруднювачів у навколишнє середовище);
- можливі шляхи міграції забруднювачів у геологічному середовищі (зона аерації, фільтрація підземних вод у водоносному горизонті, зв'язок з поверхневими водами тощо);
- базові (фонові) дані про якість підземних вод, якщо такі доступні.

На важливості КМД як методичної засади моніторингу підземних вод наголошує і керівництво з моніторингу підземних вод Європейської комісії (ЕС, 2007). Слід підкреслити, що КМД є динамічним інструментом, який постійно оновлюється в міру надходження нових даних, і може слугувати основою не тільки для моніторингу, а і для моделювання та оцінювання ризиків від забруднених підземних вод для людини і довкілля, а також планування ремедіаційних заходів.

КОНСТРУКЦІЯ СПОСТЕРЕЖНОЇ СВЕРДЛОВИНИ Дуже важливим аспектом моніторингу підземних вод, що напряму впливає на якість відбору і репрезентативність зразків підземних вод, є конструкція спостережних свердловин. Моніторингові свердловини є інженерними об'єктами з висо-

ким рівнем стандартизації та автоматизації, що забезпечують надійні дані для довготривалого спостереження за станом підземних вод (рис. 2). В табл. 1 підсумовано вимоги до конструкції і методів спорудження спостережних свердловин, які описано в стандартах ISO (ISO 5667-11:2009), ASTM (ASTM D5092/D5092M-16), і керівництвах US EPA (US EPA, 1992; Brown et al., 2014).

Якщо історично (на ранніх стадіях досліджень) на майданчиках ядерного спадку часто використовували свердловини з довгими фільтрами (10 м

і більше), то нині перевагу надають свердловинам із довжиною фільтра не більш як 3 м, що забезпечує відбір зразків з певної визначеної зони водоносного горизонту (US EPA, 1992).

Згідно з виконаним оглядом найбільш поширеною практикою є використання обсадних труб діаметром 50–100 мм. Більш діаметр (100–125 мм) у поєднанні з трубами з нержавіючої сталі застосовується для ділянок з глибоким заляганням підземних вод (наприклад, у Хенфорді (McDonald,

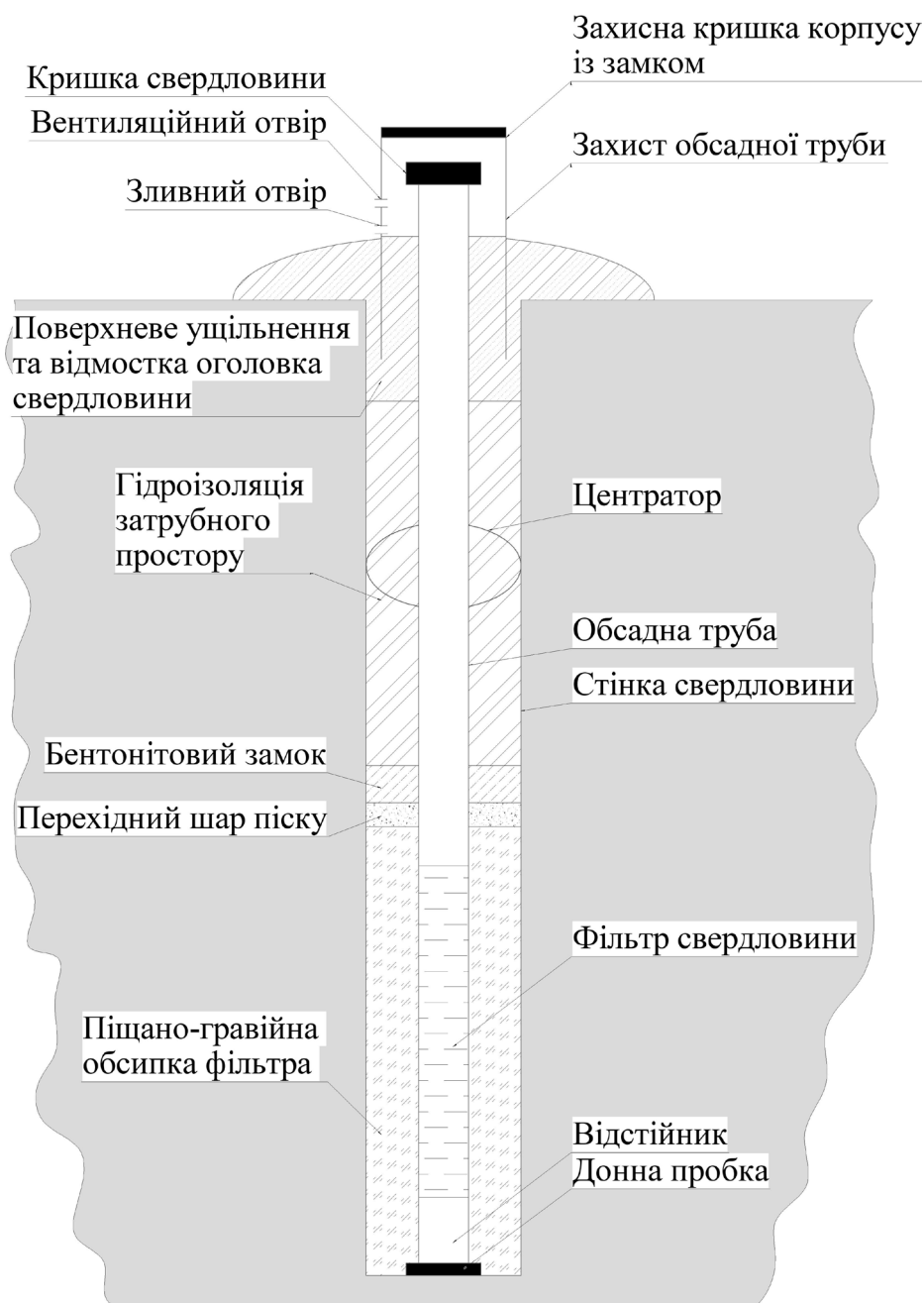


Рис. 2. Конструкція типової моніторингової свердловини.

Fig. 2. Design of a typical monitoring well.

Таблиця 1. Вимоги до конструкції моніторингових свердловин

Table 1. Requirements for the design of monitoring wells

Елемент конструкції/ вимога	Рекомендації/типові параметри	Відповідні стандарти
Матеріал обсадних труб і фільтрів	Нержавіюча сталь (SS 304/316) – довговічна, інертна. Полівінілхлорид (ПВХ), поліетилен високої щільності (ПЕВЩ) – хімічно інертний, бюджетні варіанти. Тефлон (PTFE) – для попередження забруднення полімерними мікрокомпонентами	ASTM D5092/D5092M-16; ISO 5667-11:2009
Діаметр свердловини	50–100 мм (стандарт для більшості пробовідбірників і насосів)	ASTM D5521
Фільтр свердловини	Щілини 0,25–1,0 мм (підбір за гранулометриєю порід водоносного горизонту). Довжина фільтра – зазвичай до 3 м. Обсипка (гравій/пісок) – фракція у 4–5 разів більша за d_{50} ґрунту	ASTM D5092, ASTM D5521; Brown et al., 2014
Гідроізоляція обсадної колони	Бентонітові або цемент-бентонітові «замки» між водоносними горизонтами, а також 0,5–0,7 м вище фільтра. Верхня гідроізоляція ($\geq 1,5$ м від поверхні)	ASTM D5092; US EPA (1992)
Герметизація гирла	Захисна металева труба – оголовок із замковою кришкою. Бетонна відмостка 1 м \times 1 м	ASTM D5092

2025)). Також більший діаметр є зручним для проведення геофізичних досліджень. Перевагою свердловин меншого діаметра є менший об'єм води при прокачуванні перед відбором зразків. Такі ПВХ-свердловини діаметром 50 мм застосовують на майданчиках з відносно невеликою глибиною рівня ґрунтових вод (РГВ) (наприклад, Чок-Рівер Nuclear laboratories в Канаді (IAEA, 2004, 2025); Little Forrest Legacy Site в Австралії (IAEA, 2025)).

Сучасні тенденції полягають у поступовому запровадженні «багаторівневих систем відбору зразків», на основі однієї свердловини з багатьма герметично ізольованими портами для вимірювання рівня та відбору проб води із різних глибин водоносного горизонту з високою роздільною здатністю за висотою (Twining et al., 2021; Smith et al., 2025). Такі системи пропонують виробники моніторингового обладнання Solinst (<https://www.solinst.com/instruments/multilevel-systems>),

Westbay (<https://www.westbay.com/>), Morwick G360 Groundwater Research Institute (<https://g360group.org/home/highlights/technologies/multilevel-monitoring-systems/>). Проте обмеженням є відносно висока ціна таких систем.

РОЗМІЩЕННЯ МЕРЕЖІ СПОСТЕРЕЖНИХ СВЕРДЛОВИН

Мережа моніторингу підземних вод має проектуватися і розбудовуватися з урахуванням гідрогеологічних умов ділянки, особливостей джерела забруднення і розміщення потенційних рецепторів забруднених підземних вод (US EPA, 1992; IAEA, 2004a; ASTM D5092/D5092M-16; ISO 5667–11:2009).

Базові принципи розміщення спостережних свердловин передбачають таке:

- конфігурація мережі спостережень має охоплювати «цільові зони» потенційного впливу джерела забруднення на водоносний горизонт

нижче за течією від джерела (для моніторингу впливу джерела), а також свердловини вище за потоком від джерела (для фіксації фонових умов);

- глибина фільтрів свердловин залежить від очікуваної просторової геометрії ореола забруднення та може визначатися методами математичного моделювання на основі побудови ліній току (гідродинамічної сітки) фільтрації підземних вод (Singhal et al., 2009).

Крім того, можна обладнувати свердловини на флангах ореола забруднення для оцінювання його латерального поширення, а також нижче за потоком від джерела біля потенціальних рецепторів забруднення («об'єктів захисту»).

Для «площинних джерел» можна застосовувати оконтурювання відповідної «джерельної ділянки» рядом свердловин уздовж границі ділянки, що розташована в напрямку нижче за потоком від джерела (щоби контролювати виток забруднювачів за межі джерела). Такий підхід застосований, наприклад, для поля траншей на ділянці WMA B (Waste Management Area B) в ядерних лабораторіях Чок-Рівер.

Для розвитку мережі свердловин зазвичай використовують адаптивний підхід, коли мережа реалізується поетапно. При цьому на кожному наступному етапі моніторингової мережі використовуються дані, отримані на попередньому етапі. Адаптивний підхід також передбачає, що в системі моніторингу мають бути враховані можливі зміни гідрогеологічних умов, зокрема кліматичні зміни або антропогенні впливи.

На вибір місць спорудження спостережних свердловин можуть також впливати доступність місця розташування (особливо на об'єктах із щільною забудовою і складними інфраструктурними мережами; наприклад, зазначений фактор є критично важливим у Селлафілді, і на майданчику Дунрей) та наявність захисту від стороннього доступу і від пошкодження свердловин.

Доцільно інтегрувати систему гідрогеологічного моніторингу з іншими моніторинговими системами, зокрема із системою моніторингу поверхневих вод, що створює можливості інтерпретації комплексного набору даних моніторингу, включаючи оцінки впливу розвантаження підземних вод на поверхневі водойми.

Для оптимізації мереж моніторингових свердловин і програм моніторингу розроблене спеціалізоване програмне забезпечення, таке як GWSDAT (<https://gwsdat.net/home/>; Jones et al.,

2022) і MAROS (The Monitoring and Remediation Optimization System (<https://www.gsienv.com/software/data-management-and-stats-tool/maros/>; Aziz et al., 2005). GWSDAT використовує функцію «аналіз надлишкових свердловин» («well redundancy analysis»), яка створює упорядкований список свердловин за їх впливом на якість просторово-часової моделі поля концентрацій. Свердловини з найменшим впливом на модель можуть бути виключені без істотної втрати точності інтерполяції даних. Після кожного вилучення виконується повторне моделювання з розрахунком ключових характеристик ореола забруднення (маса, площа, середня концентрація) та їх порівнянням із результатами за повного набору свердловин для оцінювання втрат інформації. Незважаючи на подібність окремих процедур (ітеративне вилучення та перерахунок ключових параметрів ореола забруднення), MAROS використовує інший підхід: він комбінує статистичний аналіз трендів (тест Манна-Кендалла) з просторовою геометрією мережі (триангуляція Делоне) для визначення оптимальної кількості точок моніторингу. Якщо вилучення конкретної свердловини не приводить до статистично значущого погіршення оцінки трендів концентрацій або порушення просторової структури ореола забруднення, така свердловина може бути безпечно виключена з мережі моніторингу для оптимізації витрат (Aziz et al., 2005; Erdman et al., 2011). Це програмне забезпечення, також може бути використане для оптимізації частоти відбору проб. Приклади використання GWSDAT і MAROS описані в публікаціях (Jones et al., 2022; Erdman et al., 2011).

Незважаючи на наявність зазначених вище кількісних підходів до оптимізації мереж моніторингу виконаний огляд і спілкування з колегами-гідрогеологами з інших майданчиків ядерного спадку засвідчують, що планування мереж гідрогеологічного моніторингу, як правило, спирається насамперед на експертні оцінки фахівців, які задіяні в практичній реалізації і інтерпретації даних моніторингу зазначених об'єктів.

Об'єкти ядерного спадку зазвичай мають історію досліджень, яка налічує багато десятиріч, і складаються із свердловин, споруджених у різні періоди. Так, програма гідрогеологічного моніторингу в Хенфорді реалізується починаючи з 1947 р., а в Селлафілді і Дунрей — з кінця 1970-х років. При цьому на ранніх етапах використовували свердловини недосконалої (за сучасними

стандартами) конструкції із обсадними трубами із кородуючого матеріалу (вуглецева сталь), з довгими фільтрами, і без належної гідроізоляції затрубного простору. Недосконалі свердловини поступово замінюють на більш сучасні, особливо на найважливіших об'єктах моніторингу. Проте доволі частою є ситуація, коли одночасно використовують різні свердловини більш або менш досконалої конструкції. Наприклад, у Хенфорді на периферійних ділянках майданчику в системі моніторингу досі функціонують свердловини, споруджені в 1947 р. (McDonald, персональне повідомлення).

МЕТОДИ ВІДБОРУ ТА АНАЛІЗУ ЗРАЗКІВ ПІДЗЕМНИХ ВОД

Поряд з конструкцією спостережних свердловин критично важливим аспектом забезпечення відбору репрезентативних зразків підземних вод є використання надійних польових методик для відбору зразків. Ключовою вимогою є заміщення перед відбором «застійної» води в свердловині, яка перебуває в контакті з атмосферою, «свіжою» водою із водоносного горизонту. Традиційний підхід полягає у прокачуванні свердловини, що забезпечує заміщення мінімум 3–5 об'ємів води в обсадній колоні (EPA, 1992; ASTM D4448–01; D6452–18). При цьому для контролю оновлення води під час прокачування із застосуванням проточних комірок періодично вимірюються «індикаторні» гідрохімічні параметри (рН, ЕС, ОРР, DO, t, °C, каламутність). Більш сучасні підходи рекомендують метод «прокачування за низької

витрати» (low flow sampling) (Puls & Barcelona, 1996), який мінімізує об'єм прокачування і каламутність відібраного зразка води. За такого методу занурюваний насос опускається на рівень фільтра спостережної свердловини. Порівняльний аналіз описаних вище методів наведений в табл. 2.

Поширеною практикою є фільтрування зразків підземної води через фільтри 0,45 мкм, що запобігає надходженню до зразка завислих часточок із свердловини, які можуть спотворювати якісний склад води. Для відокремлення «істинно розчинних» компонент можна використовувати фільтри 0,1 мкм (Puls & Barcelona, 1996). Важливими є вимоги мінімізації контакту з повітрям і дотримання термінів зберігання відібраних зразків (ISO 5667–3).

Для уникнення перехресного забруднення зразків на деяких радіаційно-забруднених майданчиках, наприклад на Савана Рівер у Південній Кароліні, у Хенфорді, спостережні свердловини обладнують індивідуальними постійно встановленими до обсадної колони насосами (Mamatey et al., 2009). Також можуть використовуватися різні насоси для умовно «чистих» і «забруднених» свердловин, очищення обладнання перед кожним новим відбором та / або послідовність відбору «від найменш до найбільш забруднених» свердловин.

Процес відбору зразків у польових умовах має документуватися згідно із встановленими протоколами, що є важливим елементом забезпечення і контролю якості робіт (QA/QC) (Puls & Barcelona, 1996; ASTM D6089–19). Для QA/QC перевірок

Таблиця 2. Порівняння методів традиційного прокачування свердловин і відбору зразка «за малих витрат».

Table 2. Comparison of traditional well pumping and “low-flow” sampling methods

Критерій	Традиційне прокачування свердловини (3–5 об'ємів)	Відбір за низької витрати (Low-flow sampling)
Обсяг відкачки	3–5 об'ємів води з обсадної труби	Доволі малий об'єм прокачування, лише для стабілізації «індикаторних» параметрів
Витрата насоса	Висока (1–10 л/хв і вище)	Низька (0,1–0,5 л/хв)
Рівень води у свердловині	Зазвичай суттєво знижується	Майже без змін або мінімальна
Каламутність зразка	Висока	Мінімальна
Обладнання/логістика	Потужний насос, тара для утилізації води при прокачуванні	Менша кількість води на утилізацію, але метод потребує спеціального обладнання

аналітичних методів можуть відбиратися дублікатні, «мічені» і бланкові проби.

ЧАСТОТА ВІДБОРУ ПРОБ, АВТОМАТИЗАЦІЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Частота відбору зразків із спостережних свердловин має відповідати цілям моніторингу, гідрогеологічним умовам ділянки і очікуваній динаміці зміни параметрів якісного складу підземної води (наприклад, β -, γ -активність, вміст радіонуклідів, хімічних токсикантів та ін.). На частоту моніторингу також можуть впливати регуляторні вимоги.

Керівництво US EPA (1992) як базовий підхід для об'єктів поводження з відходами рекомендує щоквартальний відбір зразків. На стадії довготривалого моніторингу частоту можна знижувати (наприклад, двічі на рік), якщо ряди спостережень стабільні в часі.

Керівництво ISO 5667–11:2009 рекомендує для нових пунктів спостережень починати з більш частого відбору зразків для встановлення трендів після чого моніторинг може бути оптимізований на підставі встановлених закономірностей.

Слід зазначити, що підземні води у багатьох випадках являють собою доволі консервативне середовище, де зміни гідрохімічних умов відбуваються достатньо повільно (крім вибраних випадків/умов, таких як дзеркало підземних вод на неглибоких ділянках або водоносні горизонти в зоні впливу поверхневих водойм за різних змін рівня води в останніх). Крім того, радіонукліди внаслідок сорбції матрицею ґрунтів характеризуються дуже повільними швидкостями міграції в геологічному середовищі. Висока частота відбору зразків також може бути технічно нездійсненною внаслідок значних трудовитрат і високої вартості лабораторних досліджень. Крім того, часте прокачування свердловин під час відбору може спотворювати природні гідрогеологічні умови.

Аналіз міжнародного досвіду моніторингу підземних вод на майданчиках пунктів захоронення

РАВ і майданчиків ядерного спадку показав, що частота відбору зразків із свердловин для визначення їх якісного складу зазвичай варіює від кварталної до річної (Селлафілд, Хенфорд, Дунрей). Така частота загалом збігається з рекомендаціям керівництва ЄС з моніторингу підземних вод, які підсумовані в табл. 3.

Частота ручних замірів РГВ у мережі пунктів моніторингу зазвичай, як мінімум, відповідає частоті відбору зразків на якісний склад. Нові можливості для моніторингу РГВ виникли завдяки поширенню в останні десятиріччя автоматизованих датчиків тиску води. Такі електронні датчики з реєстраторами-логерами для накопичення даних дають змогу отримувати ряди даних з високою роздільною здатністю в часі з можливістю їх передавати в режимі онлайн бездротовими методами на центральний сервер моніторингової бази даних (БД).

Крім моніторингу рівня за допомогою автоматизованих датчиків можна контролювати температуру й інші індикаторні параметри підземних вод, зокрема провідність, рН і редокс-умови. Такі підходи, зокрема, почали запроваджувати в Селлафілді (J. Heneghan, персональне повідомлення). Використання зазначених вище датчиків поки є обмеженим і може диктуватися спеціальними цілями гідрогеологічних досліджень.

АНАЛІЗ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ ТА ЇХ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ

Після отримання моніторингових даних важливим етапом є їх обробка та аналіз. Дані моніторингу надходять до БД (або інформаційної системи – ІС) моніторингу, яка забезпечує збереження і аналіз даних, а також може бути використана для підготовки звітів і надання інформації зацікавленим сторонам і громадськості.

Вивчення міжнародного досвіду показало, що ІС моніторингу зазвичай складається з двох основних компонентів: реляційної бази даних

Таблиця 3. Пропонована частота моніторингу для «спостережного» моніторингу (surveillance monitoring) (ЄС, 2007)

Table 3. Suggested monitoring frequency for “surveillance monitoring” (EC, 2007)

Період моніторингу	Безнапірні горизонти	Глибокі напірні горизонти
Початковий	Щоквартально	2 рази на рік
Довгостроковий	Неглибокі свердловини – 2 рази на рік.	1 раз на 2–6 років
	Глибокі свердловини – 1 раз на рік	

первинної інформації, що містить характеристики пунктів спостережень, і ряди даних спостережень; програмної системи для візуалізації та аналізу рядів спостережень і спеціалізованих гідрогеологічних даних.

Стандартні завдання аналізу даних спеціалізованої БД-ІС гідрогеологічного моніторингу зазвичай включають:

- аналіз спеціальної геологічної інформації — побудова розрізів свердловин і геологічних розрізів;
- побудова графіків і часових рядів параметрів моніторингу, статистичний аналіз, аналіз трендів;
- геохімічний аналіз даних;
- побудова просторових/ картографічних даних (інтеграція з ГІС).

До важливих завдань інтерпретації даних моніторингу належить визначення трендів якості підземних вод, зокрема внаслідок впливу антропогенних джерел забруднення (ЕС, 2007). Для цього розроблено відповідний аналітичний інструментарій (Aziz et al., 2003; ЕС, 2009). Зокрема, галузевим стандартом нині є використання методу Манна-Кендалла (Aziz et al., 2003).

Для побудови просторових карт розподілу параметрів (карти РГВ, розподіл забруднювачів у підземних водах) широко застосовують геостатистичні методи і ГІС-технології (Jones et al., 2022). До новітніх підходів належить використання методів штучного інтелекту й машинного навчання (Meray et al., 2022; Murphy et al., 2023).

На майданчиках зарубіжних ядерних об'єктів для підтримки БД моніторингу застосовують рішен-

ня різного ступеня складності щодо програмної реалізації (рис 3.):

- комерційні системи (наприклад, Hydro GeoAnalyst (<https://www.waterloohydrogeologic.com/hydro-geoanalyst/>), MonitorPro (<https://www.monitorpro.com/>), Esdat (<https://www.esdat.com/>));
- внутрішні розробки на замовлення операторів майданчиків (як правило, інтегровані системи);
- «гібридні» варіанти (комбінування спеціалізованих розробок на замовлення — реляційна БД і зовнішнє «стандартне» програмне забезпечення типу ГІС);
- «стандартні табличні БД» (наприклад, на основі Excel) із зовнішніми застосунками для аналізу даних (ГІС, статистичний пакет R, бібліотеки Python).

Важливими аспектами реалізації програм моніторингу є прозорість і звітність, та публічне висвітлення результатів моніторингу та інформування зацікавлених сторін. Наприклад, оператор майданчика Хенфорд регулярно публікує доступні для громадськості через мережу Інтернет звіти (<https://www.hanford.gov/page.cfm/SoilGroundwaterAnnualReports>) з підсумковими результатами моніторингу, також дані моніторингу доступні через веб-портал Hanford Environmental Information System (HEIS) (<https://ehs.hanford.gov/eda/>).

ВИСНОВКИ

Огляд міжнародного досвіду і доступних літературних джерел засвідчує, що моніторинг підземних вод на радіаційно небезпечних об'єктах — це

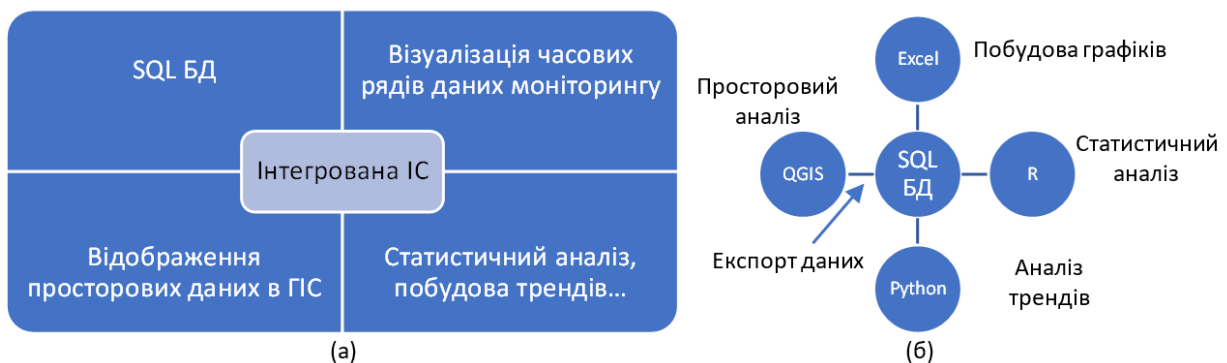


Рис. 3. Типи ІС для підтримки моніторингу (а) — повністю інтегровані; (б) — комбіновані програмні системи — поєднання реляційної бази даних із зовнішніми застосунками для візуалізації і аналізу даних.

Fig. 3. Types of Information Systems supporting monitoring: (a) fully integrated systems; (б) combined software systems — a combination of a relational database with external applications for data visualization and analysis.

складний процес. Він потребує дотримання міжнародних стандартів, ретельного планування, використання сучасних технологій і матеріалів для спорудження спостережних свердловин, обґрунтування мережі пунктів моніторингу; для відбору зразків води, польових і лабораторних аналітичних досліджень, збору та обробки даних з використанням сучасних БД і ГІС, з великою увагою до забезпечення моніторингових даних і контролю їх якості на всіх етапах досліджень.

В Україні методичні аспекти моніторингу підземних вод регламентуються нормативними документами ДСТУ ISO 5667-18:2007 та СОУ-Н МВБ 40.1-00013741-79:2012. Ці нормативні документи є частково застарілими (наприклад стосовно вимог до конструкції спостережних свердловин та ін.), не враховують сучасні технології і мають суттєві недоліки щодо важливих аспектів моніторингу підземних вод, наведених вище.

Відповідно, актуальною є розробка національного методичного керівництва (настанови) – стандарту з ключових аспектів моніторингу

радіоактивного забруднення підземних вод для найбільш важливих об'єктів ядерного спадку, зокрема для Чорнобильської зони відчуження. Такий нормативний документ буде корисним для розбудови систем моніторингу підземних вод на інших радіаційно небезпечних об'єктах України (Придніпровський хімічний завод, майданчики АЕС, регіональні спецкомбінати зберігання РАВ Державного об'єднання «Радон»).

ПОДЯКИ

Робота виконана в рамках бюджетної теми Інституту геологічних наук НАН України III-11-24 «Комбіновані підходи на основі методів машинного навчання і фізично обґрунтованих моделей для аналізу даних моніторингу і прогнозування геоміграційних процесів». У статті використано інформацію, отриману під час вебінарів за темою дослідження в рамках мережі MAGATE ENVIRONET і проекту ЄС INSC U4.01/20B «Розробка комплексної системи моніторингу водних ресурсів у Чорнобильській зоні відчуження».

REFERENCES

- Bugai, D. O., Zanoz, B. Yu., Lavrova, T. V., Korychenskyi, K. O., Kubko, Yu. I., Avila, R., Rets, Yu. M., 2021. Development of a groundwater monitoring system in the zone of influence of the uranium production heritage sites of the Pridniprovsk chemical plant. *Geologičnij žurnal*, 4 (377). Pp. 56-70. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.4.240111>.
- Dzhepo, S. P., Skal'skij, A. S., & Bugaj, D. A., 1996. Problems of ground-water monitoring in the Chernobyl NPP exclusion zone. *Geologičnij žurnal*, No.1-2, Pp. 107-112. (In Russian).
- DSTU ISO 5667-18:2007., 2007. Water quality. Sampling. Part 18. Guidance on groundwater sampling. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine. (In Ukrainian).
- Lavrova, T. V., Korychensky, K. O., Voitsekhovych, O. V., 2022. Assessment of temporal and space-time changes of groundwater chemical composition at the "Pridniprovsky Chemical Plant" uranium production legacy site. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*. No. 4 (66). Pp. 81-95. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.4.9>.
- Melnichenko, V. P., Stary, V. P., Furman, L. A., Khodorivskyi, M. S., 2015. Peculiarities of migration of tritium and other radionuclides in the territory of the radioactive waste storage facility of the State Specialized Enterprise «Kyiv State Interregional Special Combine». *Problems of the Chernobyl Exclusion Zone*. No. 13-14. Pp. 45-61. (In Ukrainian).
- Panasjuk, M. I., Stoyanov, O. I., Lyushyna, P. A., Levin, G. V., Palamar, L. A., Onyshchenko, I. P., 2019. Results of radiation monitoring in the area of the NSC-OU complex and measures to reduce groundwater contamination. *Safety problems of*
- Бугай Д. О., Заноз Б. Ю., Лаврова Т. В., Кориченський К. О., Кубко Ю. І., Авіла Р., Рець Ю. М. Розвиток системи моніторингу підземних вод у зоні впливу об'єктів спадщини уранового виробництва Придніпровського хімічного заводу. *Геологічний журнал*. 2021. № 4 (377). С. 56-70. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.4.240111>.
- Джепо С. П., Скальський А. С., Бугай Д. А. Проблемы мониторинга подземных вод в Зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. *Геологічний журнал*. 1996. № 1-2. С. 107-112.
- ДСТУ ISO 5667-18:2007. 2007. Якість води. Відбір проб. Частина 18. Керівництво з відбору ґрунтових вод. Київ: Держспоживстандарт України.
- Лаврова Т. В., Кориченський К. О., Войцехович О. В. Оцінка багаторічних просторово-часових змін хімічного складу підземних вод у зоні впливу колишнього уранпереробного підприємства ВО «Придніпровський хімічний завод». *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2022. № 4 (66). С. 81-95. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.4.9>.
- Мельниченко В. П., Старий В. П., Фурман Л. А., Ходорівський М. С. Особливості міграції тритію та інших радіонуклідів на території пункту зберігання радіоактивних відходів Державного спеціалізованого підприємства «Київський державний міжобласний спеціальний комбінат». *Проблеми Чорнобильської зони відчуження*. 2015. № 13-14. С. 45-61.
- Панасюк М. І., Стоянов О. І., Люшина П. А., Левін Г. В., Паламар Л. А., Онищенко І. П. Результати радіаційного моніторингу в районі комплексу НБК-ОУ та заходи щодо зменшення забруднення підземних вод. *Проблеми безпеки атомних*

- nuclear power plants and Chernobyl*. Issue 32. Pp. 74–79. (In Ukrainian). <http://doi.org/10.31717/1813-3584.19.32.11>.
- SOУ-N MEV 40.1–00013741–79:2012., 2012. Environmental Protection System. Groundwater Monitoring. General Provisions. Kyiv: Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. (In Ukrainian).
- American Society for Testing and Materials International (ASTM)., 2019a. Standard Guide for Documenting a Groundwater Sampling Event. ASTM D6089–19. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials International (ASTM)., 2019b. Standard Guide for Sampling Ground-Water Monitoring Wells. ASTM D4448–01. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials International (ASTM)., 2020. Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites (ASTM E1689–20). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials International (ASTM)., 2023. Standard Guide for Purging Methods for Wells Used for Ground Water Quality Investigations. ASTM D6452–18. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials International.
- American Society for Testing and Materials International (ASTM)., 2024. Standard Practice for Design and Installation of Groundwater Monitoring Wells. ASTM D5092/D5092M-16. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials International (ASTM)., 2025. Standard Guide for Development of Groundwater Monitoring Wells in Granular Aquifers. ASTM D5521/D5521M-18. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Aziz, J. J., Ling, M., Rifai, H. S., Newell, C. J., Gonzales, J. R., 2005. MAROS: A Decision Support System for Optimizing Monitoring Plans. *Groundwater*. Vol. 41, No. 3. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02605.x>.
- Brown, E. G. Jr., Rodriguez, M., Ingenito, M. B., 2014. Well Design and Construction for Monitoring Groundwater at Contaminated Sites. California Department of Toxic Substances Control, California Environmental Protection Agency.
- Bugai, D., Kireev, S., Hoque, M. A., Kubko, Yu., Smith, J., 2022. Natural attenuation processes control groundwater contamination in the Chernobyl exclusion zone: evidence from 35 years of radiological monitoring. *Sci Rep* 12, 18215. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22842-5>.
- Canadian Nuclear Laboratories., 2024. Summary of Chalk River Laboratories Environmental Monitoring Program 2024. PDF Summary Report. <https://www.cnl.ca/environmental-stewardship/performance-reporting/>
- Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), 2022. Independent Environmental Monitoring Program – Chalk River. <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/resources/maps-of-nuclear-facilities/iemp/ch-river/>
- Environment Agency, 2001. Guide to Good Practice for the Development of Conceptual Models and the Selection and Application of Mathematical Models of Contaminant Transport
- електростанцій і Чорнобиля. 2019. Вип. 32. С. 74–79. <http://doi.org/10.31717/1813-3584.19.32.11>.
- СОУ-Н МЕВ 40.1–00013741–79:2012. Система охорони навколишнього природного середовища. Контроль стану підземних вод. Основні положення. 2012. Київ: Мінприроди України.
- American Society for Testing and Materials International (ASTM). Standard Guide for Documenting a Groundwater Sampling Event. ASTM D6089–19. 2019a. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials International (ASTM). Standard Guide for Sampling Ground-Water Monitoring Wells. ASTM D4448–01. 2019b. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials International (ASTM). Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites (ASTM E1689–20). 2020. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials International (ASTM). Standard Guide for Purging Methods for Wells Used for Ground Water Quality Investigations. ASTM D6452–18. 2023. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials International (ASTM). Standard Practice for Design and Installation of Groundwater Monitoring Wells. ASTM D5092/D5092M-16. 2024. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials International (ASTM). Standard Guide for Development of Groundwater Monitoring Wells in Granular Aquifers. ASTM D5521/D5521M-18. 2025. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Aziz J. J., Ling M., Rifai H. S., Newell C. J., Gonzales J. R. MAROS: A Decision Support System for Optimizing Monitoring Plans. *Groundwater*. 2005. Vol. 41, No. 3. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02605.x>.
- Brown E. G. Jr., Rodriguez, M., Ingenito, M. B. Well Design and Construction for Monitoring Groundwater at Contaminated Sites. California Department of Toxic Substances Control, California Environmental Protection Agency.
- Bugai D., Kireev S., Hoque M. A., Kubko Yu, Smith J. Natural attenuation processes control groundwater contamination in the Chernobyl exclusion zone: evidence from 35 years of radiological monitoring. 2022. *Sci Rep* 12, 18215. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22842-5>.
- Canadian Nuclear Laboratories. Summary of Chalk River Laboratories Environmental Monitoring Program 2024. PDF Summary Report. <https://www.cnl.ca/environmental-stewardship/performance-reporting/>
- Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC). Independent Environmental Monitoring Program – Chalk River. 2022. <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/resources/maps-of-nuclear-facilities/iemp/ch-river/>
- Environment Agency. 2001. Guide to Good Practice for the Development of Conceptual Models and the Selection and Application of Mathematical Models of Contaminant Transport

Processes in the Subsurface (NC/99/38/2). Bristol: UK Environment Agency.

Erdman, R., Tyagi, A. K., Wilber, G., 2011. Optimization of Sampling Plan and Sufficiency for Long-term Monitoring Plan at Vance AFB Using MAROS Model. World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability. Pp. 1752–1761. [https://doi.org/10.1061/41173\(414\)182](https://doi.org/10.1061/41173(414)182).

European Commission (EC), 2007. Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC) guidance document no. 15: Guidance on groundwater monitoring (Technical Report-002–007). Office for Official Publications of the European Communities.

European Commission (EC), 2009. WFD CIS Technical Report No. 18. Guidance on groundwater status and trend assessment. Directorate-General for Environment, European Commission. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/77587>.

GWSDAT [Computer software]. An open source, user-friendly, software application for the visualisation and interpretation of groundwater monitoring data. Available at: <https://gwsdat.net/home/> (accessed: 10 September 2025).

Heneghan, J. P., 2025, April 30. Groundwater monitoring at Sellafield. Presentation at International Atomic Energy Agency (IAEA), EVIRONET webinar.

International Atomic Energy Agency (IAEA), 1999. Hydrogeological investigation of sites for the geological disposal of radioactive waste. IAEA Technical Reports Series No. TRS-391. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency (IAEA), 2001. Characterization of Groundwater Flow for Near Surface Disposal Facilities. TECDOC-1199. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency (IAEA), 2004a. Surveillance and Monitoring of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste. IAEA Safety Reports Series No. SRS-35. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency (IAEA), 2004b. Remediation Of Sites with Dispersed Radioactive Contamination. IAEA Technical Reports Series No. TRS-424. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency (IAEA), 2012. Monitoring for Compliance with Remediation Criteria for Sites. IAEA Safety Reports Series No. SRS-72. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency (IAEA), 2014. Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities. IAEA Safety Standards Series No. SSG-31. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency (IAEA), 2025. Environmental remediation and management of trenches containing historic radioactive wastes. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-3.3. Vienna: IAEA.

International Organization for Standardization (ISO), 2009. Water quality – Sampling – Part 11: Guidance on sampling of groundwaters. ISO 5667–11:2009. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization (ISO), 2014. Water quality – Sampling – Part 14: Guidance on quality assurance and quality control of environmental water sampling and handling. ISO 5667–14:2014. Geneva: ISO.

Processes in the Subsurface (NC/99/38/2). Bristol: UK Environment Agency.

Erdman R., Tyagi A. K., Wilber G. Optimization of Sampling Plan and Sufficiency for Long-term Monitoring Plan at Vance AFB Using MAROS Model. 2011. World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability. P. 1752–1761. [https://doi.org/10.1061/41173\(414\)182](https://doi.org/10.1061/41173(414)182).

European Commission (EC). Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC) guidance document no. 15: Guidance on groundwater monitoring (Technical Report-002–007). 2007. Office for Official Publications of the European Communities.

European Commission (EC). WFD CIS Technical Report No. 18. Guidance on groundwater status and trend assessment. Directorate-General for Environment, European Commission. 2009. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/77587>.

GWSDAT [Комп'ютерне програмне забезпечення]. An open source, user-friendly, software application for the visualisation and interpretation of groundwater monitoring data. Режим доступу: <https://gwsdat.net/home/> (дата звернення: 10.09.2025).

Heneghan J. P. Groundwater monitoring at Sellafield. 2025, April 30. Presentation at International Atomic Energy Agency (IAEA), EVIRONET webinar.

International Atomic Energy Agency (IAEA). Hydrogeological investigation of sites for the geological disposal of radioactive waste. 1999. IAEA Technical Reports Series No. TRS-391. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency (IAEA). Characterization of Groundwater Flow for Near Surface Disposal Facilities. TECDOC-1199. 2001. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency (IAEA). Surveillance and Monitoring of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste. IAEA Safety Reports Series No. SRS-35. 2004a. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency (IAEA). . Remediation Of Sites with Dispersed Radioactive Contamination. IAEA Technical Reports Series No. TRS-424. 2004b. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency (IAEA). Monitoring for Compliance with Remediation Criteria for Sites. IAEA Safety Reports Series No. SRS-72. 2012. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency (IAEA). Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities. IAEA Safety Standards Series No. SSG-31. 2014. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency (IAEA). Environmental remediation and management of trenches containing historic radioactive wastes. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-3.3. 2025. Vienna: IAEA.

International Organization for Standardization (ISO). Water quality – Sampling – Part 11: Guidance on sampling of groundwaters. ISO 5667–11:2009. 2009. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization (ISO). Water quality – Sampling – Part 14: Guidance on quality assurance and quality control of environmental water sampling and handling. ISO 5667–14:2014. 2014. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization (ISO), 2021. Geotechnical investigation and testing— Sampling methods and groundwater measurements— Part 1: Technical principles for the sampling of soil, rock and groundwater. ISO 22475–1:2021. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization (ISO), 2023. Water quality— Sampling— Part 1: Guidance on the design of sampling programmes and sampling techniques. ISO 5667–1:2023. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization (ISO), 2024. Water quality— Sampling— Part 3: Preservation and handling of water samples. ISO 5667–3:2024. Geneva: ISO.

Jones, W. R., Rock, L., Wesch, A., Marzusch, E., Low M., 2022. Groundwater Spatiotemporal Data Analysis Tool: Case Studies, New Features and Future Developments. Groundwater Monitoring and Remediation. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12522>.

Mamatey, A., Fanning, R., 2009. For U. S. Department of Energy (US DOE). Savannah River Site Environmental Report for 2009 (SRNS–STI-2010–00175, Chapter 7: Groundwater). Savannah River Nuclear Solutions, LLC, Savannah River Site (S.C.), Aiken, South Carolina.

MAROS [Computer software]. The Monitoring and Remediation Optimization System. GSI Environmental Inc. Available at: <https://www.gsienv.com/software/data-management-and-stats-tool/maros/> (accessed: 10 September 2024).

McDonald, J. P., 2025. An overview of groundwater monitoring at the Hanford Site, USA. Presentation at the International Experience in the Design of a Comprehensive Water Monitoring System for the Chernobyl Exclusion Zone, European Commission, Kyiv, Ukraine (hybrid event). Prepared for the U. S. Department of Energy, Office of Environmental Management.

Meray, A.O., Sturla, S., Siddiquee, M.R., Serata, R., Uhlemann, S., Gonzalez-Raymat, H., Denham, M., Upadhyay, H., Lagos, L.E., Eddy-Dilek, C., Wainwright, H.M., 2022. A Machine Learning Framework for Long-Term Groundwater Contamination Monitoring Strategies. Environ. Sci. Technol., 56, Pp. 5973–5983. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07440>

Murphy, M., Mazumdar, H., Gohel, H. A., Emerson, H. P., Kaplan, D. I., 2023. Artificial Intelligence-based Predictive Modeling for Groundwater Contamination and Physical Property Forecasting at the Hanford Site.

Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), 2000. Hanford Site Groundwater Monitoring: Setting, Sources and Methods (PNNL-13080). https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-13080.pdf.

Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), 2007. Groundwater monitoring at the Hanford Site (PNNL-16346). https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-16346.pdf.

Puls, R. W., Barcelona, M. J., 1996. Low-Flow (Minimal Drawdown) Ground-Water Sampling Procedures. Groundwater Issue. EPA/540/S-95/504. United States Environmental Protection Agency.

International Organization for Standardization (ISO). Geotechnical investigation and testing— Sampling methods and groundwater measurements— Part 1: Technical principles for the sampling of soil, rock and groundwater. ISO 22475–1:2021. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization (ISO). Water quality— Sampling— Part 1: Guidance on the design of sampling programmes and sampling techniques. 2023. ISO 5667–1:2023. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization (ISO). Water quality— Sampling— Part 3: Preservation and handling of water samples. ISO 5667–3:2024. 2024. Geneva: ISO.

Jones W. R., Rock L., Wesch A., Marzusch E., Low M. Groundwater Spatiotemporal Data Analysis Tool: Case Studies, New Features and Future Developments. Groundwater Monitoring and Remediation. 2022. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12522>.

Mamatey A., Fanning R. For U. S. Department of Energy (US DOE). Savannah River Site Environmental Report for 2009 (SRNS–STI-2010–00175, Chapter 7: Groundwater). Savannah River Nuclear Solutions, LLC, Savannah River Site (S.C.). 2009. Aiken, South Carolina.

MAROS [Комп'ютерне програмне забезпечення]. The Monitoring and Remediation Optimization System. GSI Environmental Inc. Режим доступу: <https://www.gsienv.com/software/data-management-and-stats-tool/maros/> (дата звернення: 10.09.2025).

McDonald J. P. An overview of groundwater monitoring at the Hanford Site, USA. Presentation at the International Experience in the Design of a Comprehensive Water Monitoring System for the Chernobyl Exclusion Zone, European Commission. 2025, July. Kyiv, Ukraine (hybrid event). Prepared for the U. S. Department of Energy, Office of Environmental Management.

Meray A. O., Sturla S., Siddiquee M. R., Serata R., Uhlemann S., Gonzalez-Raymat H., Denham M., Upadhyay H., Lagos L. E., Eddy-Dilek C., Wainwright, H.M. 2022. A Machine Learning Framework for Long-Term Groundwater Contamination Monitoring Strategies. Environ. Sci. Technol., 56, P. 5973–5983. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07440>

Murphy M., Mazumdar H., Gohel, H. A., Emerson H. P., Kaplan D. I. Artificial Intelligence-based Predictive Modeling for Groundwater Contamination and Physical Property Forecasting at the Hanford Site. 2023.

Pacific Northwest National Laboratory (PNNL). Hanford Site Groundwater Monitoring: Setting, Sources and Methods (PNNL-13080). 2000. https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-13080.pdf.

Pacific Northwest National Laboratory (PNNL). Groundwater monitoring at the Hanford. 2007. Site (PNNL-16346). https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-16346.pdf.

Puls R. W., & Barcelona M. J. Low-Flow (Minimal Drawdown) Ground-Water Sampling Procedures. Groundwater Issue. EPA/540/S-95/504. 1996. United States Environmental Protection Agency.

Savannah River Nuclear Solutions, 2010. Savannah River Site Environmental Report for 2009 (SRNS-STI-2010-00175, Chapter 7: Groundwater). U. S. Department of Energy.

Sellafield Ltd., 2016. Groundwater Monitoring at Sellafield – Annual Data Review 2016. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5af41d29ed915d0de537b993/Groundwater_Monitoring_at_Sellafield_-_Annual_Data_Review_2016.pdf.

Singhal, N., Samaranayake, R., Gunasekera, H. D., & Islam, J., 2009. Groundwater Monitoring. In H. I. Inyang & J. L. Daniels (Eds.), Environmental Monitoring (Vol. II). EOLSS Publishers. <https://www.eolss.net/sample-chapters/c09/E6-38A-05-03.pdf>.

Smith, K. P., Day-Lewis, F. D., Heneghan, J. P., & Qafoku, N. P., 2025. RemPlex Workshop: Vertical Delineation of Contamination in Aquifers. PNNL-37298. Pacific Northwest National Laboratory.

Sneddon, C., 2023. Environmental Monitoring at Dounreay. Presentation, Dounreay, UK. https://www.dounreaystakeholdergroup.org/wp-content/uploads/2023/05/DSG2023C015_Environmental-Monitoring-Presentation.pdf.

Twining, B. V., Bartholomay, R. C., Fisher, J. C., and Anderson, C., 2021. Multilevel groundwater monitoring of hydraulic head, water temperature, and chemical constituents in the eastern Snake River Plain aquifer, Idaho National Laboratory, Idaho, 2014–18: U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2021–5002, 82 p. <https://doi.org/10.3133/sir20215002>.

U. S. Department of Energy. Hanford Environmental Information System (HEIS). Environmental Data Access (EDA). Hanford Site. <https://ehs.hanford.gov/eda/>

U. S. Department of Energy. Soil & Groundwater Annual Reports. Hanford Site. <https://www.hanford.gov/page.cfm/SoilGroundwaterAnnualReports>.

U. S. Department of Energy (US DOE), 2012. DOE/OR/01–2628: Groundwater Strategy for the U. S. Department of Energy Oak Ridge Reservation, Oak Ridge, Tennessee.

U. S. Department of Energy (US DOE), 2012. Scientific opportunities for monitoring at environmental remediation sites (SOMERS). Integrated System-Based Approaches to Monitoring. U. S. Department of Energy Office of Environmental Management.

United States Environmental Protection Agency (US EPA), 1992. RCRA Ground-Water Monitoring: Draft Technical Guidance. Office for Solid Management. United States Environmental Protection Agency.

United States Environmental Protection Agency (US EPA), 2004. Guidance for Monitoring at Hazardous Waste Sites: Framework for Monitoring Plan Development and Implementation. OSWER Directive No. 9355.4–28; January 2004.

United States Environmental Protection Agency (US EPA), 2006. Guidance on Systematic Planning Using the Data Quality Objectives Process (EPA QA/G-4; EPA/240/B-06/001). U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

United States Environmental Protection Agency (US EPA), 2016. Best Practices for Environmental Site Management: Recommended Contents of a Groundwater Monitoring Report.

Savannah River Nuclear Solutions. Savannah River Site Environmental Report for 2009 (SRNS-STI-2010-00175, Chapter 7: Groundwater). 2010. U. S. Department of Energy.

Sellafield Ltd. Groundwater Monitoring at Sellafield – Annual Data Review 2016. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5af41d29ed915d0de537b993/Groundwater_Monitoring_at_Sellafield_-_Annual_Data_Review_2016.pdf.

Singhal N., Samaranayake R., Gunasekera H. D., Islam J. Groundwater Monitoring. In H. I. Inyang & J. L. Daniels (Eds.), Environmental Monitoring (Vol. II). 2009. EOLSS Publishers. <https://www.eolss.net/sample-chapters/c09/E6-38A-05-03.pdf>.

Smith K. P., Day-Lewis, F. D., Heneghan, J. P., & Qafoku, N. P. RemPlex Workshop: Vertical Delineation of Contamination in Aquifers. PNNL-37298. 2025. Pacific Northwest National Laboratory.

Sneddon C. Environmental Monitoring at Dounreay. Presentation, 2023. Dounreay, UK. https://www.dounreaystakeholdergroup.org/wp-content/uploads/2023/05/DSG2023C015_Environmental-Monitoring-Presentation.pdf.

Twining B. V., Bartholomay R. C., Fisher J. C., Anderson C. Multilevel groundwater monitoring of hydraulic head, water temperature, and chemical constituents in the eastern Snake River Plain aquifer, Idaho National Laboratory, Idaho, 2014–18: U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2021–5002. 2021. 82 p., <https://doi.org/10.3133/sir20215002>.

U. S. Department of Energy. Hanford Environmental Information System (HEIS). Environmental Data Access (EDA). Hanford Site. <https://ehs.hanford.gov/eda/>

U. S. Department of Energy. Soil & Groundwater Annual Reports. Hanford Site. <https://www.hanford.gov/page.cfm/SoilGroundwaterAnnualReports>.

U. S. Department of Energy (US DOE). DOE/OR/01–2628: Groundwater Strategy for the U. S. Department of Energy Oak Ridge Reservation. 2012. Oak Ridge, Tennessee.

U. S. Department of Energy (US DOE). Scientific opportunities for monitoring at environmental remediation sites (SOMERS). Integrated System-Based Approaches to Monitoring. U. S. Department of Energy Office of Environmental Management. 2012.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). RCRA Ground-Water Monitoring: Draft Technical Guidance. Office for Solid Management. 1992. United States Environmental Protection Agency.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). Guidance for Monitoring at Hazardous Waste Sites: Framework for Monitoring Plan Development and Implementation. OSWER Directive No. 9355.4–28; January 2004.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). Guidance on Systematic Planning Using the Data Quality Objectives Process (EPA QA/G-4; EPA/240/B-06/001). U. S. Environmental Protection Agency, 2006. Washington, DC.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). Best Practices for Environmental Site Management: Recommended Contents of a Groundwater Monitoring Report. Groundwater

Groundwater forum Issue paper EPA-542-F-16-005. United States Environmental Protection Agency.

United States Army Corps of Engineers (USACE), 2012. Engineer Manual EM 200-1-12: Conceptual Site Models. Washington, DC: Department of the Army.

forum Issue paper EPA-542-F-16-005. 2016. United States Environmental Protection Agency.

United States Army Corps of Engineers (USACE). Engineer Manual EM 200-1-12: Conceptual Site Models. 2012. Washington, DC: Department of the Army.

Manuscript received September 9, 2025;
revision accepted November 25, 2025.

Інститут геологічних наук НАН України,
Київ, Україна