



<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2022.1.247970>  
УДК 621.039.75

Ю.О. ШИБЕЦЬКИЙ\*, В.М. ШЕСТОПАЛОВ,  
В.І. ПОЧТАРЕНКО, Т.А. БОРИСОВА, Н.О. ШУРПАЧ

Державна установа «Науково-інженерний центр радіогідрогеоекологічних  
полігонних досліджень НАН України», Київ, Україна

E-mail: shybetsky@hydrosafe.kiev.ua; vmshest@gmail.com; boegor@ukr.net; shurpach@hydrosafe.kiev.ua

\* Автор для кореспонденції

## КОНЦЕПЦІЇ ГЕОЛОГІЧНОГО ЗАХОРОНЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

Наведено визначення і зміст терміну «концепція геологічного захоронення» радіоактивних відходів. Проаналізовано міжнародний і національний досвід розробки концепції геологічного захоронення. Описано особливості внеску в безпеку природних та інженерних бар'єрів геологічних сховищ радіоактивних відходів для різних типів вміщуючих геологічних формацій. Показано, що на даному етапі досліджень для умов України найбільш перспективною концепцією геологічного захоронення є концепція захоронення радіоактивних відходів у докембрійських кристалічних формаціях у межах Чорнобильської зони відчуження.

**Ключові слова:** геологічне сховище; радіоактивні відходи; концепція захоронення.

### Вступ

На поточний момент понад половини електроенергії в Україні генерується атомними електростанціями (АЕС). Виробництво електроенергії на АЕС супроводжується накопиченням відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), продуктів його переробки — осклованих високоактивних радіоактивних відходів (ВАВ), радіоактивних відходів різної активності і нуклідного складу. ВЯП і ВАВ виділяють тепло, містять велику кількість довгоіснуючих радіонуклідів і залишаються потенційно небезпечни-

ми для населення і довкілля протягом десятків і сотень тисяч років.

Відповідно до законодавства України (Закон..., 2019), ВАВ (і ВЯП, якщо паливо визначається відходами) мають захоронюватися виключно в геологічних сховищах (ГС). Геологічному захороненню підлягають також середньоактивні радіоактивні відходи (САВ), наприклад частина аварійних радіоактивних відходів (РАВ), що виникли внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 р.

Етапи життєвого циклу ГС РАВ включають вибір майданчика для розміщення сховища,

Цитування: Шибецький Ю.О., Шестопалов В.М., Почтаренко В.І., Борисова Т.А., Шурпач Н.О. Концепції геологічного захоронення радіоактивних відходів. *Геологічний журнал*. 2022. № 1 (378). С. 03—23. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2022.1.247970>

Citation: Shybetskyi Yu.O., Shestopalov V.M., Pochtarenko V.I., Borisova T.A., Shurpach N.O. 2022. Concepts of geological disposal of radioactive waste. *Geologičnij žurnal*, 1 (378): 03-23. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2022.1.247970>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2022. 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 NAS of Ukraine, 2022. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

його проектування, будівництво, експлуатацію, закриття та етап після закриття сховища. Загалом, процес створення ГС є мультидисциплінарним викликом — він об'єднує такі напрями діяльності, як комплексне геологічне вивчення майданчика, розробка проекту сховища та обґрунтування довготривалої безпеки. Процес створення ГС (до початку експлуатації) триває кілька десятиліть і розпочинається етапом вибору майданчика.

Відповідно до (Про затвердження..., 2008), першою стадією етапу вибору майданчика є розробка концепції проекту сховища, визначення потенційних типів геологічних формацій для подальшого регіонального обстеження і плану вибору майданчика. Загальну концепцію проекту сховища розробляють з урахуванням нуклідного складу та обсягів РАВ. Розробка концепції включає визначення типу сховища, системи інженерних бар'єрів, функцій безпеки бар'єрів (природних та інженерних) та їх відносного внеску у забезпечення безпеки.

В порядку робіт стадії розробки концепції сховища, визначеному національним законодавством (яке, до речі, побудоване на рекомендаціях МАГАТЕ), існують певні методологічні протиріччя і нелогічність. Вихідною точкою вважається концепція конструкції сховища, а потім вже визначається вміщуюча формація. Це утруднює оптимізацію вартості захоронення, оскільки при проектуванні інженерних бар'єрів існує певний ступінь свободи (тобто є можливість впливати на їх перелік і технологічні властивості). Однак ми не в змозі вплинути на властивості геологічного середовища: можна лише вибирати найбільш сприятливе. Іншими словами, більше свободи дав би підхід, заснований на попередньому виборі формації і наступній адаптації системи інженерних бар'єрів до геологічних умов майданчика.

В Україні роботи зі створення ГС розпочалися з початку 90-х років минулого століття. Вони включають, зокрема, як оцінку придатності геологічних формацій країни, її регіонів і певних площ для створення ГС, так і передпроектне дослідження варіантів конструкції ГС (Шестопалов, Шибецький, 2017, 2018; Шестопалов, Шибецький, 2020). Ці дослідження завершилися визначенням найперспективнішої вміщуючої формації (кристалічні породи), найперспективнішого регіону (Чорнобильська

зона відчуження — ЧЗВ і прилеглі території) і кількох перспективних площ (Новосілівська, Жовтнева і Вереснянська). Однак результати геологічних досліджень мають бути доповнені чітким визначенням концепції конструкції сховища. І вибір вміщуючої формації, і концепцію конструкції необхідно узгодити із зацікавленими сторонами (виробники РАВ, регулюючі органи, наукові, експертні і громадські організації тощо). Відсутність такого узгодження унеможлиблює розробку численних критеріїв вибору майданчика і гальмує виконання відповідного етапу життєвого циклу ГС.

Отже, метою статті є уточнення наповнення терміна «концепція геологічного захоронення», узагальнення та аналіз результатів розробки концепцій геологічного захоронення в Україні, а також оцінка перспективності їх використання в Україні.

Для досягнення поставленої мети нами проаналізовано міжнародний і національний досвід створення ГС у частині розробки їх концепцій, описано особливості внеску в безпеку захоронення окремих складових систем природних і інженерних бар'єрів, охарактеризовано процеси міграції й утримання радіонуклідів у різних вміщуючих формаціях. На підставі отриманих результатів визначено ранг розглянутих концепцій та оптимальну черговість їх розгляду для умов України.

## **Визначення терміна «концепція геологічного захоронення»**

Попередньо відмітимо, що споріднені терміни «концепція захоронення» («disposal concept») і «концепція проекту сховища» («conceptual design») широко використовуються в керівництвах МАГАТЕ з безпеки поводження з РАВ (ІАЕА, 2011, 2012) і технічній літературі з обґрунтування безпеки геологічного захоронення РАВ (ІАЕА, 2014, 2020). Однак чітке визначення цих термінів відсутнє і в глосарії МАГАТЕ (ІАЕА, 2018), і в уже згаданих керівництвах МАГАТЕ, а також у національних нормативно-правових актах (Про затвердження..., 2008, 2018). Разом з тим важливо визначити термін «концепція геологічного захоронення» для того, щоб мати узгоджене і чітке уявлення про зміст і обсяг робіт, який необхідно виконати

при розробці власної концепції геологічного захоронення в Україні.

В найбільш загальному випадку в англійській мові слово «concept» використовується з середини XVI ст. у значенні: «1 — чогось сформульованого подумки (ДУМКА, ПОНЯТТЯ); 2 — абстрактної ідеї, узагальненої на конкретних прикладах» (Webster Dictionary, 2021).

В українській філософській літературі (Шинкарук, 2002) термін «концепція» визначається як «система понять про ті чи інші явища, процеси; спосіб розуміння, тлумачення якихось явищ, подій; основна ідея будь-якої теорії».

Виходячи з наведених загальних тлумачень терміна «концепція», а також з урахуванням контексту численних керівництв МАГАТЕ з безпеки поводження з РАВ, можна запропонувати таке визначення терміна «концепція геологічного захоронення», на основі якого буде побудовано подальше викладення матеріалу. Отже, «концепція геологічного захоронення — це основна ідея щодо забезпечення довготривалого радіаційного захисту населення і довкілля при захороненні радіоактивних відходів в конкретному геологічному середовищі».

## **Зміст концепції геологічного захоронення РАВ**

Дотримання норм радіаційного впливу на населення і довкілля при геологічному захороненні (або відповідність критеріям радіаційної безпеки) гарантується сукупною дією компонентів системи геологічного захоронення, що складається з інженерних бар'єрів і природних бар'єрів.

Природа безпеки, створювана РАВ, визначається еволюцією факторів їх впливу, а саме — зниженням у часі активності радіонуклідів (унаслідок їх розпаду і пов'язаного з цим зменшенням тепловиділення), а також змінами радіонуклідного складу відходів у результаті розпаду короткоіснуючих нуклідів. Окрім цього, ступінь впливу РАВ залежить від їх фізико-хімічних характеристик, а також від міграційних характеристик радіонуклідів. Названі характеристики визначають здатність радіонуклідів до вилуговування і до переміщення від місця розташування контейнерів РАВ у сховищі через геологічне середовище до біосфери, де радіонукліди можуть викликати опромінення людини та інших біологічних

об'єктів. Іншими словами, ступінь впливу залежить від хімічних особливостей радіонуклідів, гідрогеохімічних характеристик підземних вод, а також від транспортних особливостей (гідравлічного градієнта, пористості, коефіцієнтів фільтрації, дисперсії, дифузії, сорбції тощо) компонентів системи геологічного захоронення, де відбувається мобілізація і переміщення радіонуклідів.

Отже, природа безпеки РАВ визначає вимоги до внеску в сукупну безпеку з боку окремих бар'єрів системи захоронення протягом певних етапів її еволюції. Так, на початкових етапах основний внесок даватимуть інженерні бар'єри: матриця РАВ і контейнер. У різних концепціях геологічного захоронення цей період може тривати від кількох сотень років до кількох сотень тисяч років. Протягом цього часу природні бар'єри «працюють» на збереження герметичності контейнера, ізолюючи і захищаючи його від несприятливих факторів впливу геологічного середовища — гірничого тиску, надходження агресивних підземних вод, сейсмопроявів, надмірного впливу температури тощо.

Строго кажучи, геологічне середовище починає повноцінно забезпечувати ізоляцію інженерних бар'єрів ще задовго до того, як контейнер втратить цілісність, а саме — після відновлення початкового гідрогеологічного і гідрогеохімічного режиму (вже за кілька десятків-сотень років після закриття сховища). Окрім цього, після витoku радіонуклідів геологічне середовище забезпечує утримання (фіксацію) і сповільнення міграції радіонуклідів до біосфери. Тобто з певного моменту еволюції ГС ключову роль у безпеці починають відігравати природні бар'єри. Вони забезпечують мінімальні потоки підземних вод через зону розміщення РАВ, мінімальну швидкість руху підземних вод, сприятливі для утримання радіонуклідів гідрогеохімічні і геохімічні умови, високу сорбційну здатність геологічного середовища.

Загалом, варто зазначити, що в різних концепціях геологічного захоронення підсистеми інженерних бар'єрів характеризуються практично одним і тим самим набором компонентів і відповідно функцій безпеки або бар'єрних функцій. Як правило, перелік компонентів (функцій безпеки) включає таке:

- матрицю РАВ (утримання радіонуклідів від вилуговування);
- контейнер (ізоляція матриці РАВ від зовнішніх впливів, утримання легких радіонуклідів);
- бентонітовий або інший буфер (геомеханічний і геофільтраційний захист контейнера внаслідок зростання тиску набухання і закриття невеликих тріщин і порожнин у вміщуючих породах, сорбція нуклідів);
- матеріали засипки (фіксація положення контейнера, структурна цілісність гірничих виробок, зменшення потоків підземних вод, сорбція нуклідів);
- структури (компоновку) сховища (зменшення гірничих навантажень, обмеження впливу сторонніх матеріалів, обмеження температурних впливів, ізоляція зони розміщення РАВ).

У той же час системи природних бар'єрів у різних концепціях виявляють суттєві відмінності залежно від геологічної обстановки майданчика сховища і бар'єрних властивостей вміщуючої формації. В загальному випадку сприятлива геологічна обстановка характеризується низькими сейсмічними ризиками, спокійною тектонічною обстановкою, мінімальною щільністю тектонічних порушень, невеликими гідравлічними градієнтами, застійним характером водообміну, відновними гідрохімічними умовами, низькими ризиками прояву небезпечних геологічних процесів (карстоутворення, льодовикова ерозія, катастрофічні повені і т. п.), прогнозованістю геологічних (геодинамічних, гідрогеохімічних) змін у часі тощо.

Вважається, що придатними для геологічного захоронення є формації кристалічних порід (Швеція, Фінляндія, Чехія, Японія, Росія), глинисті (Франція, Швейцарія, Бельгія) або соленосні (Німеччина, США).

Таким чином, концепція геологічного захоронення має включати визначення типу регіональної геологічної і гідрогеологічної обстановки, типу вміщуючої формації, особливостей вміщуючої геологічної формації (з одного боку), а також переліку захоронюваних РАВ, орієнтовного переліку інженерних бар'єрів, адаптованого до властивостей відходів (з іншого).

## Міжнародний досвід

### Концепція захоронення в кристалічних породах

Характерною особливістю безпеки концепції захоронення в кристалічних породах є важлива роль контейнера. Він має гарантувати безпеку геологічного захоронення шляхом повного утримання радіонуклідів протягом сотень тисяч років. Решта інженерних бар'єрів і геологічне середовище мають забезпечувати ізоляцію контейнера та його герметичність впродовж максимально можливого часу. Далі наведено опис концепції на прикладі Швеції.

*Загальна характеристика* (SKB, 2018). Програма створення ГС розпочалася в Швеції наприкінці 70-х років минулого століття. Протягом реалізації цієї програми компанія SKB розробила спеціальну концепцію KBS-3 для захоронення ВЯП у кристалічних породах для геологічних умов Скандинавії. Означена концепція базується на використанні трьох захисних бар'єрів: мідного контейнера; бентонітових глин; кристалічних порід Швеції (рис. 1). Цю ж концепцію реалізує компанія POSIVA в Фінляндії.

SKB планує збудувати ГС (систему геологічного захоронення) орієнтовно в 2027 р. на майданчику Форсмарк у муніципалітеті Остхамар. Передбачено, що в ГС на глибині 500 м буде розміщено до 12 000 т ВЯП (6000 контейнерів). Підземна площа для розташування контейнерів може становити 3—4 км<sup>2</sup>, довжина тунелів для розміщення контейнерів — до 60 км, а обсяг гірничих — 2 300 000 м<sup>3</sup>. При цьому поверхнева інфраструктура сховища займе площу лише 0,25 км<sup>2</sup>.

*Концепція безпеки* (SKB, 2011). Бар'єри в концепції KBS-3 діятимуть таким чином.

Перший бар'єр утворює мідний контейнер, посилений чавунною вставкою. Довжина контейнера сягає 5 м, діаметр — 1 м, товщина мідної стінки — 5 см. Вага становить 25 т. Контейнер спроектовано таким чином, щоб він зберігав цілісність під дією механічних навантажень від рухів вміщуючих порід, а також протистояв корозії від взаємодії з підземними водами. Проектний термін служби контейнера (до втрати герметичності) — не менше 100 000 років.

Другий бар'єр — це буфер з ущільнених бентонітових глин, що оточує контейнер шаром 0,35 м. Буфер захищає контейнер від рухів під

час землетрусів. Набухаючи, бентонітові глини закривають невеликі тріщини в породі і забезпечують гідроізоляцію контейнера. Бентоніт утримує також радіонукліди після їх витoku з порушеного контейнера.

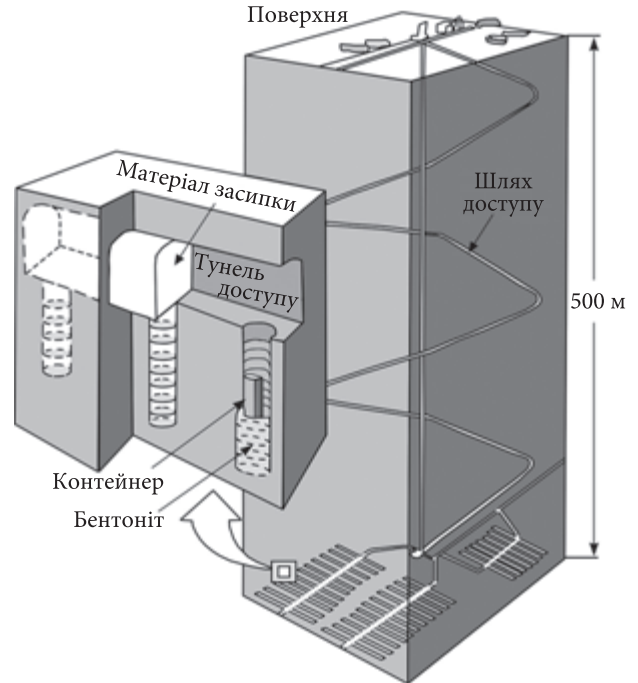
Третій бар'єр — вміщуючі породи. Їх завдання — ізолювати РАВ шляхом забезпечення стабільних сприятливих геохімічних умов і захисту їх від впливу поверхневих подій. Однак у кристалічних породах присутні тріщинні підземні води. Якщо радіонукліди вийдуть з контейнера і потраплять крізь бентонітовий буфер у підземні води, вони будуть затримуватися поверхнею тріщин і тріщинними мінералами, а також у мікропорах вміщуючих порід. Таким чином, вміщуючі породи сповільнюють потрапляння довгоіснуючих радіонуклідів у біосферу, доки вони практично не розпадуться.

*Геологічні умови майданчика Форсмарк (SKB, 2011).* Майданчик розташований у 120 км на північ від Стокгольма на березі Балтійського моря поблизу АЕС Форсмарк. Розміри майданчика — 6 × 2 км. Максимальна висота поверхні майданчика становить 25 м над рівнем моря. Він піднявся над рівнем моря лише 2000 років тому після танення льодовика.

Майданчик складений кристалічними породами Феноскандинавського щита, що утворилися 1,9—1,85 млрд років тому під час Свекарельського орогену. Кристалічні породи перекриті малопотужною (до кількох метрів) товщею сучасних озерно-болотних, переважно торф'яних відкладів.

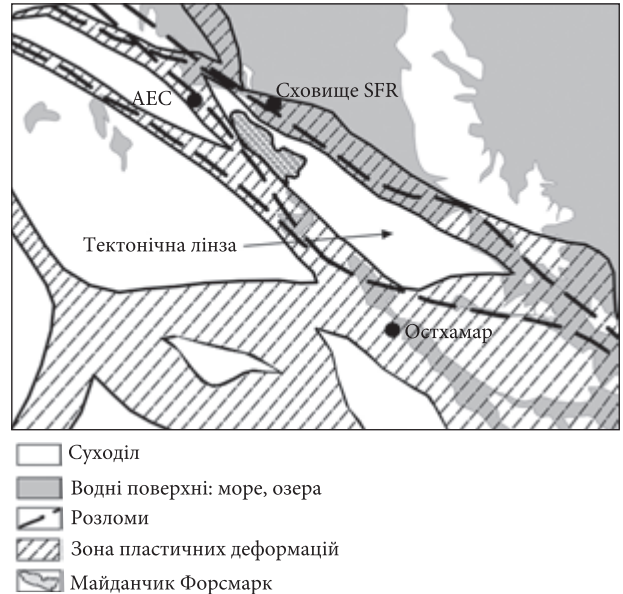
Кристалічні породи представлені середньо- і дрібнозернистими мігматитами (до 75%), пегматоїдними гранітами і пегматитами (до 15%), амфіболітами та іншими менш розповсюдженими породами (до 10%). Кристалічні породи зазнали впливу як пластичних, так і крихких деформацій. Області інтенсивного прояву пластичних деформацій утворюють мережу масштабних поясів і окремі дискретні зони. Пояси оточують так звані тектонічні лінзи, де породи практично не зазнали впливу деформацій. Майданчик Форсмарк розташований в межах однієї з таких тектонічних лінз (рис. 2, 3).

Вважається, що захоронення буде безпечним, якщо зона розміщення контейнерів буде відділена від головних розломних зон (протяжністю кілька кілометрів) товщею нетріщинуватих порід потужністю 100 м. Загалом, для



**Рис. 1.** Концепція KBS-3: шахтне геологічне сховище для захоронення ВЯП у кристалічних породах (SKB, 2011, зі змінами)

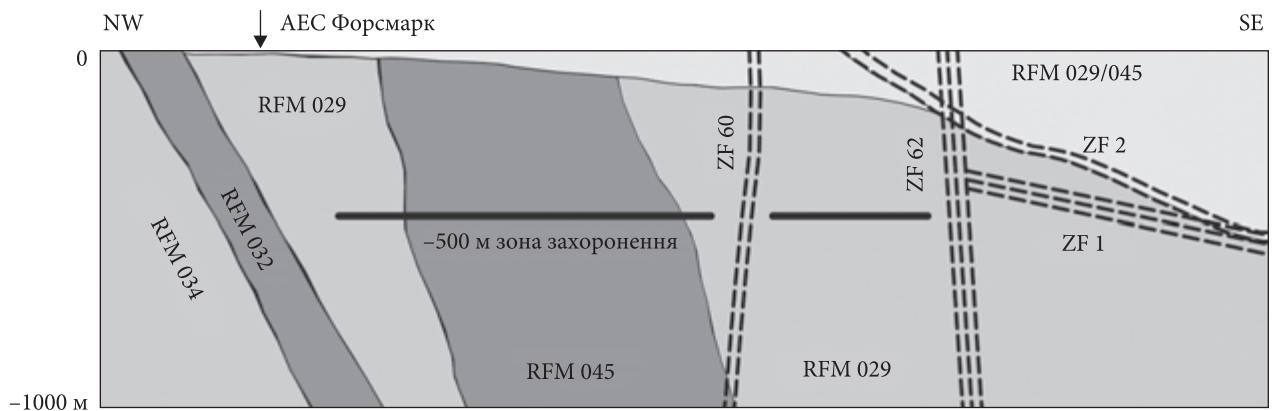
**Fig. 1.** KBS-3 concept: mined geological repository in crystalline rocks for SNF disposal (SKB, 2011, with changes)



**Рис. 2.** Тектонічні умови майданчика Форсмарк, Швеція (SKB, 2011, зі змінами)

**Fig. 2.** Tectonic conditions of the Forsmark site, Sweden (SKB, 2011, with changes)

нетріщинуватих монолітних порід майданчика значення коефіцієнтів фільтрації становить  $10^{-10}$ — $10^{-12}$  м · с<sup>-1</sup>.



**Рис. 3.** Структурно-тектонічний розріз майданчика Форсмарк. RFM — блоки порід, що розрізняються за літологічним складом; ZF — зони деформацій (SKB, 2011, зі змінами)

**Fig. 3.** Tectonic section of the Forsmark site. RFM — rock domains that differ in lithology; ZF — deformation zones (SKB, 2011, with changes)

*Особливості міграції радіонуклідів* (SKB, 2010). Після втрати контейнером герметичності радіонукліди почнуть мігрувати через бентонітовий буфер або матеріали засипки. Радіонукліди можуть потім потрапити: 1) до тріщин, що перетинають стінки свердловини для розміщення контейнера; 2) до зони тріщинуватості, що виникла під час проходки свердловини і тунелів доступу; 3) до мікротріщин і міжзернових порожнин матриці порід.

Очікується, що в кристалічних породах з низькою пористістю міграція на великі відстані відбуватиметься з адвективним потоком підземних вод у системі тріщин, зонах тріщинуватості і розломних зонах. При цьому радіонукліди взаємодіятимуть зі стінками тріщин і тріщинними мінералами. В матриці порід адвективний потік неможливий, однак існує закрита пористість (мікротріщини, мікропори, міжзернові порожнини), яка сприяє затримці радіонуклідів через їх дифузію і сорбцію. Вважається, що води закритої пористості є нерухомими, тому міграцією на великі відстані через матрицю нехтують в масштабі часу, доки зберігається потенційна небезпека РАВ. У міру висхідного руху адвективного потоку радіонуклідів у невеликих тріщинах може відбутися їх перетин з розломними зонами. Такі зони характеризуються більш потужними потоками підземних вод, які можуть розвантажуватися в поверхневі водні системи.

Існує ряд процесів, які істотно зменшують швидкість міграції розчинених речовин порів-

няно зі швидкістю руху підземних вод. Зокрема, це сорбція, котра може відбуватися як на поверхні тріщин, так і на поверхні пор матриці.

### **Концепція захоронення в глинистих формаціях**

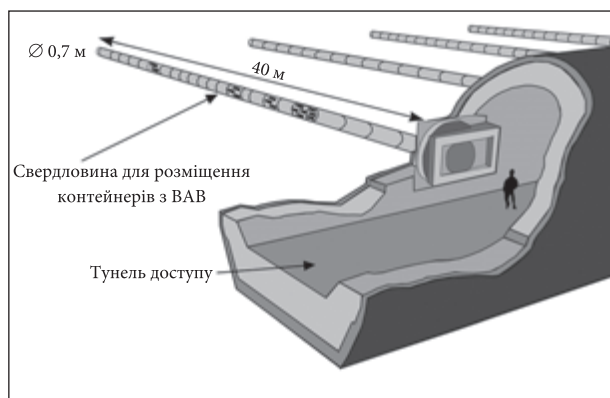
Характерною особливістю концепції захоронення в глинистих породах є домінуюча роль вміщуючої формації в гарантуванні безпеки. Вміщуюча формація забезпечує утримання радіонуклідів унаслідок сорбції, домінування дифузії в транспортних процесах і практичної відсутності адвективного переносу. Інженерні бар'єри забезпечують ізоляцію радіонуклідів на початковому етапі після закриття сховища протягом кількох тисяч років. Далі наведено опис концепції на прикладі проекту CIGEO, який реалізується у Франції.

*Загальна характеристика* (ANDRA, 2005a, c, 2016). Системна робота зі створення ГС у Франції розпочалася в 1991 р. після прийняття Закону щодо визначення національного оператора ГС— компанії ANDRA. В 1998 р. після порівняльного вивчення придатності для геологічного захоронення кристалічних і глинистих формацій було прийнято рішення щодо створення ГС в аргілітах на території департаментів Meuse/Haute Marne. Проект створення ГС має назву CIGEO.

ANDRA планує збудувати ГС орієнтовно в 2030 р. Передбачено, що в ГС на глибині 500 м буде розміщено 6300 м<sup>3</sup> осклованих ВАР і до 80 000 м<sup>3</sup> довгоіснуючих РАВ (САР), а також

**Рис. 4.** Концепція CIGEO (Франція): шахтне ГС для захоронення ВАВ у глинистих формаціях (ANDRA, 2005с, зі змінами)

**Fig. 4.** CIGEO concept (France): mined geological repository in clay formations for HLW disposal (ANDRA, 2005c, with changes)



певна кількість ВЯП дослідницьких реакторів. Загалом, буде використано 15 типів упаковок обсягом від 200 до 1200 л. Матеріал первинних контейнерів: для ВАВ — нержавіюча сталь, для САВ — бетон. Первинні контейнери розмістяться в сталених вторинних контейнерах (ВАВ) або бетонних (САВ). Це будуть упаковки відходів для захоронення. Упаковки з ВАВ і ВЯП будуть розміщуватися в горизонтальних свердловинах, а контейнери з САВ встановлюватимуться штабелями в горизонтальних тунелях. Площа підземної частини сховища становитиме приблизно 15 км<sup>2</sup>. Характерною ознакою концепції CIGEO (рис. 4) є можливість вилучення упаковок з відходами протягом перших кількох сотень років.

*Концепція безпеки* (ANDRA, 2005а, с). Бар'єри в концепції CIGEO діятимуть таким чином.

Перший бар'єр — це упаковка РАВ, утворена матрицею відходів і металевим (ВАВ) чи бетонним контейнером (САВ). Передбачається, що контейнери будуть деградувати дуже повільно і тривалий час будуть повністю утримувати нукліди. Проектний термін служби металевих контейнерів (до втрати герметичності) — не менше ніж 10 000 років.

Другий бар'єр — це відсік сховища, який буде заповнюватися матеріалами засипки. Відсіки закриватимуться потужними бетонними перемичками. Це забезпечить дифузійний процес перенесення речовини, що перешкоджає контакту води з упаковками, затримує нукліди. Лише довгоіснуючі радіонукліди, які не сорбуються, можуть потрапити в геологічне середовище після витоку з упаковок.

Третій бар'єр — вміщуючі аргіліти келовей-оксфордського віку. Завдяки дуже повільному водообміну, високій сорбційній здатності ар-

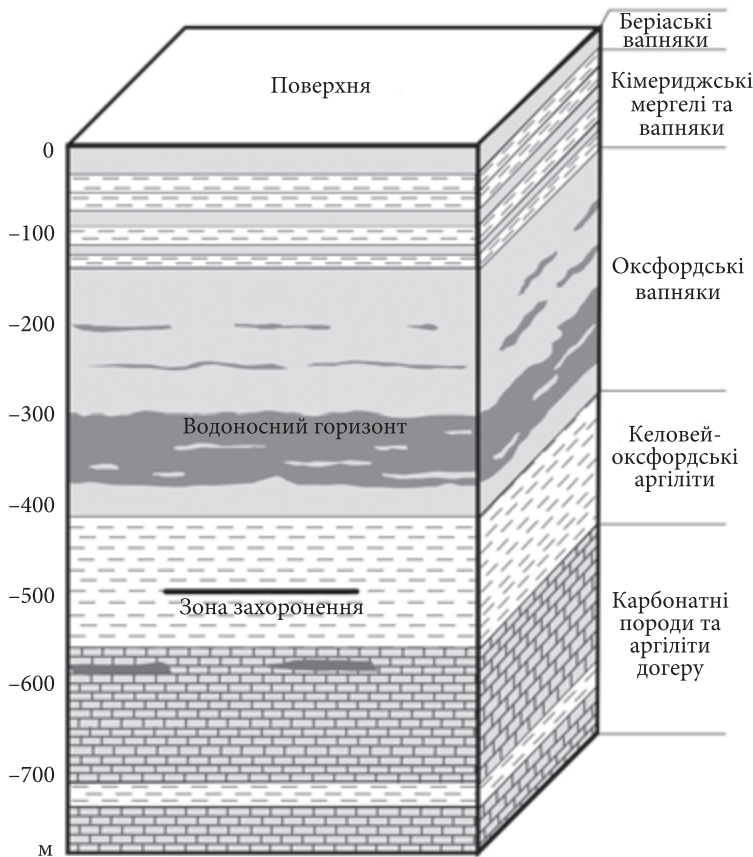
гілітів і відсутності тріщинуватості нукліди дуже повільно дифундують через геологічне середовище. Таким чином, вміщуючі породи будуть утримувати довгоіснуючі радіонукліди (окрім галогенів), доки вони практично не розпадутся.

*Геологічні умови майданчика Meuse/Haute Marne* (ANDRA, 2005а, b, с). Майданчик розташований приблизно в 250 км на схід від Парижа в межах так званої Паризької депресії.

В геологічній будові майданчика задіяні осадові породи крейди, юри і тріасу (рис. 5). Означена товща утворилася в проміжок часу від 250 до 135 млн років тому.

Вміщуючою формацією є аргіліти келовей-оксфордського ярусу з домінуванням глинистих відкладів і підпорядкованими породами вапняків. Ця товща утворилася шляхом осадження глинистих мінералів (60 %), тонкої піщаної фракції і карбонатів у відносно спокійному морі. Вона має широке географічне поширення. У так званій зоні транспозиції аргілітова товща є однорідною і малопроникною (проникність  $10^{-13}$ — $10^{-14}$  м·с<sup>-1</sup>). Площа зони становить приблизно 200 км<sup>2</sup>. Вона розташована навколо лабораторії Бюре; на цю зону можна розповсюдити результати вивчення аргілітової товщі з означеної лабораторії. Кривля аргілітів занурюється в північному напрямку від глибини 420 м (в околицях лабораторії Бюре) до 600 м. В цьому ж напрямку потужність товщі зростає від 130 до 160 м.

Загальна пористість аргілітів досягає 18 %. Майже 90 % пористості класифікуються як мікро- і мезопористість з розміром пор менше ніж 1 мкм. Пори характеризуються великою звивістю. Як правило, половина обсягу води є електрохімічно зв'язаною з глинистими час-



**Рис. 5.** Геологічні умови майданчика Meuse/Haute Marne, Франція (ANDRA, 2005a)  
**Fig. 5.** Geological conditions of Meuse / Haute Marne site, France (ANDRA, 2005a)

точками. Така зв'язана вода не задіяна в адвективному перенесенні радіонуклідів. Вміст «вільної» води в аргілітах не перевищує 9 %.

Хімічний склад порових вод вміщуючої формації було оцінено за результатами моделювання. Їх неможливо відібрати для аналізу. Вважається, що їх склад (переважно карбонатний кальцієво-натрієвий) є однорідним для всієї товщі в зоні транспозиції. Води мають метеорне походження і характеризуються нейтральними значеннями рН і відновлювальним характером (наявність піриту та органічних речовин).

*Особливості міграції радіонуклідів* (ANDRA, 2005a, b). При оцінці бар'єрних властивостей келовей-оксфордських аргілітів (з урахуванням їх літології, коефіцієнтів фільтрації і дифузії, а також гідрогеохімічних показників) було показано, що за мільйон років радіонукліди можуть бути перенесені на відстань близько 80 м (унаслідок дифузії) і на відстань лише 0,3 м (в результаті адвекції).

На початковому етапі еволюції ГС (доки не відновиться природне обводнення секцій сховища) буде можливою міграція радіонуклідів

лише в газовій фазі в ненасиченій ближній зоні. В цей період, який триватиме від кількох десятків до кількох тисяч років, міграційно-здатними є лише тритій і вуглець-14. Однак їх активності будуть дуже низькими.

Після відновлення природного гідрогеологічного режиму, за умови втрати цілісності упаковками РАВ, може розпочатися міграція радіонуклідів у розчиненій формі. Однак унаслідок їх сорбції та осадження в матеріалах засипки сховища, а також через дифузійний характер переносу практично всі радіонукліди не вийдуть за межі інженерних бар'єрів сховища. До ближньої зони вміщуючої формації можуть потрапити лише довгоіснуючі радіонукліди, що практично не сорбуються:  $^{129}\text{I}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{135}\text{Cs}$  та  $^{79}\text{Se}$ .

Вважається, що протягом щонайменше мільйону років у межах келовей-оксфордських аргілітів домінуватиме дифузійний механізм транспортування радіонуклідів. Вони досягнуть покрівлі і підшви товщі через кілька сотень тисяч років, рухаючись вертикально вгору і вниз. У перекриваючих оксфордських вапняках і підстилаючих вапняках догеру нукліди



будуть переміщуватися горизонтально по переривистих водоносних горизонтах у напрямку зон розвантаження (ANDRA, 2005b).

### Концепція захоронення в соляних формаціях

Характерною особливістю концепції захоронення в соляних формаціях є виключна роль природних бар'єрів (вміщуючої формації) в гарантуванні безпеки. Вміщуюча формація забезпечує утримання радіонуклідів за рахунок непроникуваності для флюїдів і підземних вод, високої теплопровідності і здатності до заліковування тріщин і пустот. Упаковка відходів забезпечує ізоляцію радіонуклідів на початковому етапі після закриття сховища і можливість вилучення упаковок протягом кількох сотень років. Решта інженерних бар'єрів (упродовж кількох десятків тисяч років) забезпечують ізоляцію вміщуючої формації від зовнішніх впливів, доки її бар'єрні властивості не відновляться в повному обсязі. Далі описано досвід Німеччини у використанні соленосних формацій для геологічного захоронення РАВ.

*Загальна характеристика* (Bollingerfehr et al., 2018). У Німеччині концепція геологічного захоронення тепловиділяючих високоактивних відходів у соленосних формаціях розробляється з початку 80-х років минулого століття. Передбачається, що в ГС буде розміщено близько 10 500 т ВЯП і 8000 контейнерів з високоактивними осклованими РАВ від переробки ВЯП німецьких АЕС у Франції. Референтна концепція розробляється для різних геологічних умов (в соляних пластах або в штоках) і різних варіантів розміщення контейнерів з відходами. Зокрема, вивчається кілька варіантів розміщення контейнерів: варіант горизонтального розміщення в тунелях, пройдених у пластових солях (у первинних контейнерах або безпосередньо в захисних упаковках); варіант вертикального розміщення первинних контейнерів у свердловинах глибиною до 300 м, які буритимуться з тунелів доступу, пройдених у соляному штоці. Площа підземної частини сховища така: для варіанту горизонтального розміщення — від 1,4 до 1,6 км<sup>2</sup>, а для варіанту вертикального розміщення вона скоротиться до 1,0 км<sup>2</sup>.

Концепція захоронення базується на використанні кількох бар'єрів: матриці відходів,

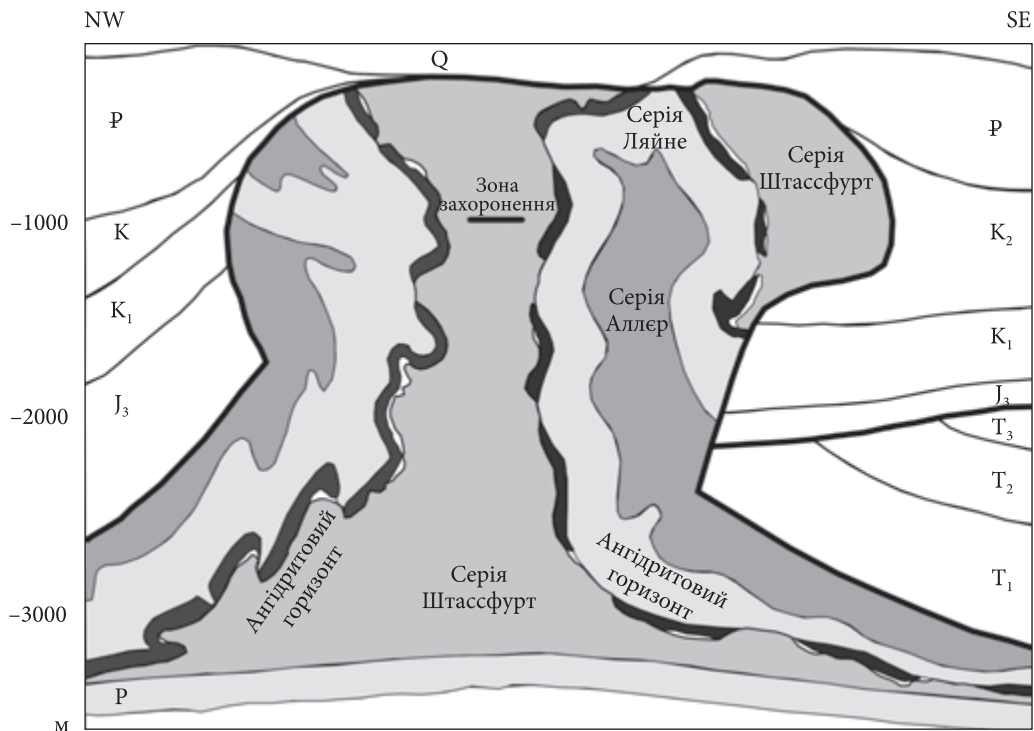
контейнера, засипки (подрібнена кам'яна сіль) виробок для розміщення РАВ, геотехнічних бар'єрів (бетон на основі солі, подрібнена сіль і матеріали тампонажу шахти і транспортних шляхів), геологічного бар'єру (непроникувані вміщуючі солі). Концепція передбачає можливість вилучення контейнерів протягом 500 років.

*Концепція безпеки* (Bollingerfehr et al., 2018). Бар'єрні властивості вміщуючих солей (природного бар'єру) визначаються їх практичною непроникуваністю для руху флюїдів і розчинів, а також високою теплопровідністю. Найбільш вірогідними шляхами доступу води до зони розміщення упаковок є транспортні виробки: шахта, підземні галереї, а також зони розвитку мікротріщинуватості навколо виробок. Дуже важливою для безпеки сховища є здатність солей до пластичних деформацій, тобто до заліковування тріщин і пустот. Отже, передусім варто попередити можливість надходження води зазначеними шляхами на початкових етапах після закриття сховища, доки не відновляться ізолюючі властивості солей. Зважаючи на це, передбачається, що бар'єри в референтній концепції захоронення РАВ у солях діятимуть таким чином.

На початковій стадії після закриття сховища матриця відходів і контейнер забезпечуватимуть повне утримання нуклідів (протягом щонайменше 500 років). Упродовж цього часу ще зберігатиметься можливість вилучення контейнерів.

Передбачається, що зона розміщення РАВ знаходитиметься від шахти на певній відстані. Транспортні тунелі будуть закриті бетоном заглишкою (100 м) і подрібненою та зволоженою сіллю (300 м). Бетонний бар'єр працюватиме практично відразу ж після створення, а ефективність роботи соляного бар'єру зростатиме з часом унаслідок ущільнення заповнення під дією гірничого тиску. Проектний термін дії геотехнічних бар'єрів — як мінімум 50 000 років. За цей час відновиться цілісність і бар'єрні властивості вміщуючого масиву соляних відкладів.

Природний бар'єр утримуватиме радіонукліди в зоні розміщення РАВ протягом мільйонів років. Про це свідчать численні природні аналоги, такі як природні пустоти в солях, де з часу їх формування зберігаються флюїди в газоподібному, рідкому і надкритичному стані.



**Рис. 6.** Геологічні умови майданчика Горлебен, Німеччина (Bollingerfehr et al., 2013)

**Fig. 6.** Geological conditions of the Gorleben site, Germany (Bollingerfehr et al., 2013)

*Геологічні умови потенційного майданчика.* В якості прикладу далі наведено опис соляного куполу Горлебен (рис. 6), де до 2012 р. планувалося створити ГС. Купол розташований в Нижній Саксонії в 160 км на північний захід від Берліна. Відповідно до (Bollingerfehr et al., 2013), купол Горлебен у плані має витягнуту форму і займає площу 15 × 4 км. Підшва соляних відкладів залягає на глибині 3200—3500 м, а покрівля — на глибині 250 м. Купол складений соляними відкладами Цехштейну. Центральне ядро куполу представлене солями серії Штассфурт (Staßfurt), а периферійні частини — соляними відкладами серій Ляйне (Leine) та Аллер (Aller). Солі серії Штассфурт відділені від солей Ляйне Головним ангідритовим горизонтом. Цей горизонт був розбитий на окремі блоки в процесі галокінезу. Соляні відклади різних серій відрізняються за своїми деформаційними властивостями. Повзучість солей серії Штассфурт, особливо їх складової — товщі Головна сіль (Hauptsalz) більша, ніж така відкладів решти серій. Тому саме в товщі Головна сіль була створена підземна дослідна лабораторія і до прийняття Закону щодо вибору майданчика (Gesetz, 2017) там планували розміщувати РАВ.

Покрівля солі перекрита породами кепроку потужністю від 10 до 50 м. Кепрок складений важкорозчинними залишками порід соляних серій. Вище залягають осадові породи крейди, міоцену і четвертинні відклади. В деяких частинах куполу четвертинні відклади безпосередньо залягають на солях, заповнюючи так звані «канали», що виникли внаслідок льодовикової ерозії приблизно 400 000 років тому.

*Особливості міграції радіонуклідів.* У загальному випадку непорушені солі на проектній глибині розміщення РАВ не мають відкритої пористості і є непроникними для флюїдів і підземних вод. Це виключає можливість міграції нуклідів як у газовій, так і у рідкій фазах.

На мікрорівні полікристали солі утворюють агрегати, де окремі кристали галіту тісно прилягають один до одного своїми гранями. Тому природна їх пористість утворена роз'єднаними міжгранулярними пустотами. Для того, щоб газу і рідини могли рухатися крізь сіль, необхідно об'єднання таких пустот. Гіпотетично це може відбутися за комбінованого впливу температури і гірничого тиску, тобто коли температура порід (наприклад, від дії тепловиділяючих РАВ) досягне 200 °С на глибині понад

1000 м. При цьому проникність солей буде співставною з проникністю пісковиків. Однак ця гіпотеза не була підтвердженою ні вимірами проникності солей в підземній лабораторії, ні експериментальними даними (Bollingerfehr et al., 2018).

## Українські концепції захоронення РАВ

В Україні протягом 90-х років минулого століття розглядалися кілька концепцій геологічного захоронення РАВ. Обґрунтування концепцій виконано головним чином шляхом аналізу та систематизації матеріалів досліджень геологічних формацій та структур. Тобто, головна увага приділялася аналізу особливостей *природних бар'єрів* системи геологічного захоронення. Меншою мірою аналізувалися особливості майбутніх *інженерних бар'єрів*. Це було пов'язано, на наш погляд, з певними невизначеностями щодо переліку і властивостей потоків РАВ, що підлягатимуть геологічному захороненню, а також з відсутністю хоча б попередніх проектних рішень щодо технологій кондиціонування та упаковки різних потоків РАВ для геологічного захоронення.

Головні концепції геологічного захоронення РАВ, що розглядалися на той час, включають захоронення в кристалічних породах, у глинистих формаціях, у соленосних формаціях. Розглядалися також певні варіанти конструкції ГС у новостворених та існуючих шахтах (для видобування корисних копалин з родовищ різних формацій), а також у глибоких свердловинах.

Ситуація дещо змінилася в останнє десятиліття. Міжнародний консорціум у складі BGE (лідер консорціуму, Німеччина), ANDRA (Франція), COVRA (Нідерланди), ENRESA (Іспанія), SKB (Швеція) за участі експертів держустанови НІЦ РПД НАН України виконав низку проектів, спрямованих на удосконалення програми поводження з РАВ в Україні. Ці проекти фінансувалися Євросоюзом у рамках програми підвищення безпеки ядерних установок в Україні — INSC. Зокрема, в проекті U4.01/09-B «Концепції захоронення радіоактивних відходів в Україні» (2016 р.) розглядалося кілька варіантів систем інженерних бар'єрів уже з урахуванням специфіки україн-

ських відходів для захоронення ВЯП, основаних високоактивних відходів — продуктів переробки ВЯП українських АЕС, а також довгоіснуючих РАВ АЕС України і чорнобильського походження (зараз це САВ за критерієм можливості захоронення).

В рамках означеного проекту було виконано загальний аналіз безпеки запропонованих варіантів і показано їх високу перспективність в плані безпеки захоронення. Однак технічне завдання проекту не включало детальний аналіз геологічних умов потенційних майданчиків для реалізації розроблених систем інженерних бар'єрів. Тому в майбутньому буде необхідно адаптувати згадані розробки до українських геологічних умов.

## Захоронення в кристалічних породах

Концепція розроблялась в Україні протягом останніх 25—30 років В.М. Шестоपालовим, Е.В. Соботовичем, Д.П. Хрущовим та іншими вченими (Соботович, 1996, 2006; Хрущов, Громок, 2003; Шестоपालов та ін., 2003, 2006; Шестоपालов, Шибецький, 2006, 2008). Роботи спирались на міжнародний досвід Швеції і Фінляндії (див. KBS-3) з обґрунтування безпеки геологічного захоронення РАВ у підземних спорудах у кристалічних породах докембрійських фундаментів.

Вважається, що *магматичні та метаморфічні комплекси* Українського щита (УЩ) є придатними для безпечного захоронення РАВ з огляду на таке. Їх склад достатньо однорідний в крупних тектонічних блоках, а самі блоки геодинамічно стабільні, їх структурно-геологічні умови відносно прості. Порооди таких комплексів характеризуються високою теплопровідністю, дещо гіршою (порівняно із соленосними формаціями) термічною стійкістю, стійкістю до фізичних і механічних навантажень, мінімальною пористістю.

В якості потенційно придатних для розміщення ГС розглядаються комплекси кристалічних порід (переважно рапаківіподібних гранітів) Коростенського плутону (північно-східна частина УЩ) (Шестоपालов та ін., 2003; Соботович, 2006). На території ЧЗВ (північно-східна частина Коростенського плутону) формація (комплекс) рапаківіподібних гранітів переважає в західній частині зони, перекрита

порівняно малопотужною частиною осадового комплексу, та достатньо вивчена геологічними дослідженнями.

При визначенні перспективності гранітоїдних формацій північно-східної частини Коростенського плутону, в тому числі і на території ЧЗВ, було враховано таке: відносно високий рівень вивченості гранітоїдних формацій геологічними, геофізичними та іншими методами; значна площа (до 1000 км<sup>2</sup>) поширення рапаківіподібних формацій, що характеризуються стабільним складом та стабільними геодинамічними умовами (протягом останніх 1,5 млрд років); низька сейсмічна активність території розповсюдження формацій.

Таким чином, територія західної частини ЧЗВ сьогодні розглядається як найбільш перспективний район для першочергових робіт з вибору майданчика для ГС у кристалічних породах докембрійського фундаменту (Шестопапов, Шибецький, 2018).

Окрім захоронення в магматичних і метаморфічних комплексах УЩ, вченими ІГНС НАН України розглядалась ідея створення ГС РАВ у *вулканогенно-осадових формаціях* Овруцького палеорифту (Овруцького грабену), який розташований на північний захід від ЧЗВ. Це єдине місце в Україні, де розвинута потужна товща кварцито-пісковиків товчаківської світи. Кварцити, пісковики з прошарками пірофілітових сланців складають товщу близько 1400 м.

Відповідно до (Шабалін та ін., 2001; Соботович, 2006), геологічне середовище Овруцького рифту є придатним для створення ГС РАВ з огляду на те, що комплекс порід характеризується стабільним речовинним і хімічним складом, однорідними фізико-механічними, теплофізичними, інженерно-геологічними властивостями, показниками та умовами. Мономінеральний склад порід визначає їх унікальну стійкість до хімічного вивітрювання.

Проте в оцінках авторів не враховувались геотектонічна активність Овруцької структури, деякі несприятливі гідрогеологічні особливості розрізу. Цілком можливі трансграничні заперечення (майже поруч кордон з Білоруссю).

### **Захоронення в глинистих формаціях**

Можливість захоронення РАВ у глинистих формаціях розглядалась Д.П. Хрущовим (Хрущов, Громов, 2003), В.П. Бухаревим, Е.В. Собо-

товичем (Соботович, 2006). При обґрунтуванні вибору глинистих формацій враховувались такі очікувані позитивні їх особливості: низькі фільтраційні характеристики, високий сорбційний потенціал, пластичність, хімічна інертність. Недоліком глинистих формацій є їх низька теплопровідність.

Глинисті формації розвинуті на території України в основному у межах Прикарпатського регіону, Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), Причорномор'я. При розгляді перспективності були виключені Прикарпаття, Причорномор'я, північно-західні окраїни Донбасу як регіони значно віддалені від основних місць локалізації РАВ та такі, що характеризуються сейсмічною активністю і геотермальним потенціалом. Глинисті формації ДДЗ є малоперспективними для геологічного захоронення, так як вони характеризуються високою вертикальною проникністю, розміщені в активній тектонічній провінції, розділяють гідравлічно зв'язані водоносні горизонти, які широко використовуються для водопостачання.

На території ЧЗВ глинисті формації розвинені в її східній частині, де відбувається зчленування УЩ і ДДЗ. В.П. Бухарев вважав, що потенційно придатними для розміщення ГС є юрські відклади. Але глинисті відклади ЧЗВ відрізняються частими змінами літологічного складу, а товща однорідних власне глин не перевищує 20 м (за досвідом Франції, Швейцарії, Бельгії така товща повинна бути не менше ніж 80 м (див. SIGEO)); високою швидкістю водообміну між вище- і нижчезалегаючими шарами. Тому розміщення ГС у глинистих формаціях ЧЗВ не може бути рекомендовано. В той же час товща юрських глин ЧЗВ може слугувати додатковим захисним сорбційним бар'єром на шляху міграції радіонуклідів від ГС у кристалічних породах до поверхневих екосистем (Шестопапов, Шибецький, 2018; Шестопапов, Шибецький, 2020).

### **Захоронення в соленосних формаціях**

Можливість захоронення РАВ у соленосних формаціях розглядалась Д.П. Хрущовим (Хрущов, Шехунова, 2000). На території України ці формації розвинуті в Прикарпатському і Закарпатському прогинах, ДДВ та Північно-Західному Донбасі. Найбільш сприятливими для захоронення РАВ вважаються соляноку-

польні структури двох останніх регіонів, а також стратиформні соленосні пласти в Північно-Західному Донбасі. Різні структурні форми кам'яної солі характеризуються відмінностями у фізичних властивостях: пористості, проникності, міцності та ін. З позицій гірничо-механічної стійкості та геофільтраційних властивостей більш перспективною вважається пластова форма соленосних відкладів. Незалежно від структурної форми кам'яної солі характеризуються високою теплопровідністю і високою термічною стабільністю, що сприяє збереженню їх бар'єрних властивостей при захороненні тепловиділяючих РАВ.

Несприятливими факторами розміщення ГС у соленосних формаціях є такі: порушення суцільності за рахунок пухких шарів; проникність солей, що розчиняються; розвиток соляного карсту, тріщинуватості. Отже, залишається ще багато питань щодо обґрунтування безпеки захоронення РАВ у соленосних формаціях, вирішення яких потребує тривалих та кропітких досліджень.

### Захоронення в колишніх шахтах

Можливість захоронення довгоіснуючих РАВ в українських шахтах розглядалась в ІГНС НАН України (Скворцов, 2003). Автори прийшли до висновку, що перспективи використання шахт гірничодобувних підприємств для безпечного захоронення РАВ дуже обмежені або навіть повністю виключені. Це стосується перш за все шахт з видобування калійної солі, кам'яновугільних шахт Донбасу, підземного простору шахтних полів Кривбасу, шахт з видобування уранових руд. Це зумовлено такими негативними факторами: більшість родовищ твердих корисних копалин розташовані в тектонічних зонах зі складною геологічною будовою; при розробці будь-якого родовища порушується суцільність гірського масиву, з погіршенням інженерно-геологічних умов, порушенням гідрогеологічного режиму; виникає проблема надходження шахтних вод в оточуюче сховище.

Відношення населення гірничодобувних регіонів України до можливого розміщення ГС РАВ дуже негативне і протестне. Крім того, шахтні поля розташовані далеко від місць накопичення основних обсягів РАВ.

Захоронення РАВ у залізрудних формаціях є різновидом шахтного варіанту захоронення РАВ. Варіант розроблявся в кінці 90-х років минулого століття для САВ (за можливістю захоронення) (Bogorinski et al., 1999).

Для попередньої оцінки була вибрана відпрацьована шахта «Саксагань» у Кривому Розі. Аналіз геологічних та інженерно-геологічних умов, а також попередній аналіз безпеки дали підстави зробити висновок, що захоронення РАВ у цій шахті може бути потенційно безпечним. У той же час проведені дослідження не надали чітких доказів і фактів, що шахта «Саксагань» може розглядатись як кращий об'єкт для захоронення РАВ. Зокрема, не були враховані можливі зміни в режимі і складі підземних вод, порушення суцільності гранітних масивів при спорудженні ГС тощо. Оцінка безпечності захоронення РАВ у таких умовах потребує спеціальних досліджень.

### Варіанти конструкції ГС для умов України

В Україні розглядалися два варіанти конструкції ГС РАВ: шахтний і свердловинний.

*Шахтний варіант* конструкції ГС був деталізований в рамках виконання проекту U4.01/09-B (DBE, 2017). Варіант було розроблено з урахуванням переліку РАВ України (необхідність геологічного захоронення великих обсягів САВ чорнобильського походження, осклованих ВАВ від переробки ВЯП вододіючих енергетичних реакторів в Російській Федерації, ВЯП реакторів РБМК-1000), а також з урахуванням того, що ГС буде розміщено в кристалічних формаціях ЧЗВ. Було показано, що спільне захоронення САВ і ВАВ на одному майданчику в ЧЗВ може дати значні економічні переваги.

Передбачалося, що частини сховища для захоронення САВ і ВАВ матимуть єдину шахту. Тунелі для захоронення САВ (рис. 7) розміщуватимуться на глибинах 250—300 м. Довжина тунелів для захоронення сягне до 250 м, а їх переріз — 17 × 10 м. Стіни виробок будуть укріплені шаром торкрет-бетону. Контейнери з САВ розміщуватимуться штабелями в окремих бетонних відсіках з товщиною стінок і підлоги 0,5 м. Розміри окремого відсіку становитимуть 17 × 17 м, де буде розміщено 320 контейнерів. Для захоронення всього наявного

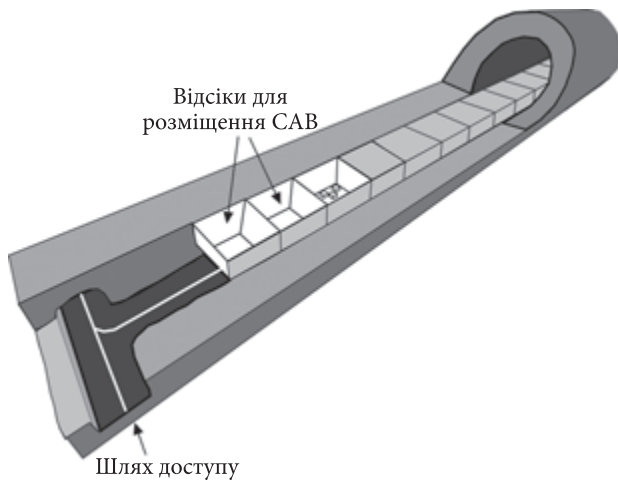


Рис. 7. Концепція шахтного ГС для захоронення САВ (DBE, 2017)

Fig. 7. The concept of mined geological repository for LLW disposal (DBE, 2017)

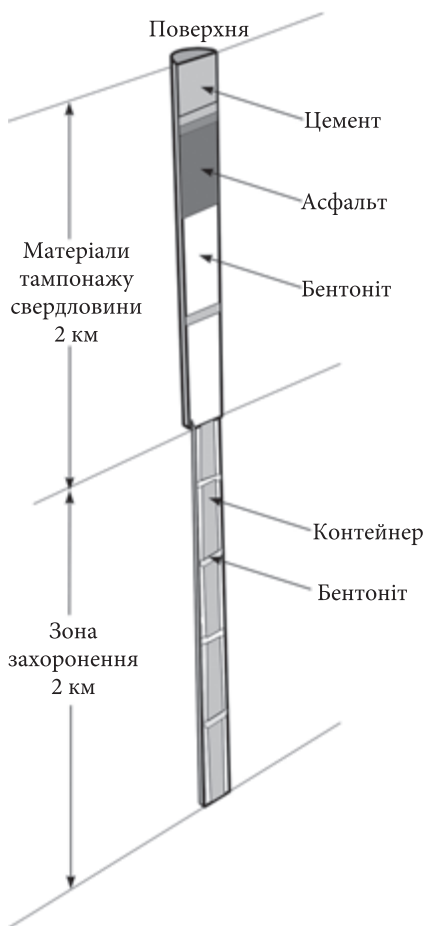


Рис. 8. Концепція свердловинного ГС для захоронення ВЯП і ВАВ (SKB, 2000, зі змінами)

Fig. 8. The concept of borehole geological repository for SNF and HLW disposal (SKB, 2000, with changes)

обсягу САВ України може знадобитися 17—20 відсіків.

Після розміщення РАВ відсіки заповнююватимуться бетоном. Розмір відсіків вибрано з урахуванням механічних характеристик і особливостей процесів розширення-усадки бетону при його твердінні. Вважається, що заповнений контейнерами і забетонований відсік зберігатиме монолітність в гірничих умовах глибин розміщення РАВ. Це забезпечить дифузійний механізм руху радіонуклідів. Загалом, використання цементних матеріалів підвищить лужність підземних вод, що сприятиме сповільненню мобілізації радіонуклідів. Передбачається, що система інженерних бар'єрів частини ГС для захоронення САВ зберігатиме свої бар'єрні функції щонайменше 20 000 років.

Відповідно до (DBE, 2017), конструкція частини ГС, призначеної для захоронення ВАВ і ВЯП, відповідає шведській концепції KBS-3 (див. рис. 1). Передбачається, що відходи будуть захоронюватися на глибині не менше ніж 500 м у металевих контейнерах (з міді, нержавіючої сталі або титану) в індивідуальних свердловинах із застосуванням бентонітового буферу. Розміри циліндричного контейнеру такі: діаметр — 1,0 м, висота — від 3,5 (ВАВ) до 5,0 м (ВЯП). Відстань між свердловинами сягне від 6 до 7 м, а відстань між паралельними тунелями, де буритимуть ці свердловини, — не менше ніж 40 м. Для захоронення всього обсягу ВАВ і ВЯП необхідно буде використати приблизно 10 000 контейнерів. Таким чином, загальна довжина тунелів становитиме 60—70 км, а площа підземної частини сховища — 2,4—2,8 км<sup>2</sup>.

Свердловинний варіант конструкції ГС передбачає розміщення ВАВ і ВЯП у свердловинах великого діаметра (близько 1 м) у кристалічних породах в інтервалі глибин 2—4 км (рис. 8). В цьому випадку основний внесок у безпеку дають бар'єрні властивості геологічного середовища. На таких глибинах розташована зона дуже сповільненого водообміну, де основним процесом міграції радіонуклідів виступає дифузія. Тому у випадку свердловинного захоронення немає потреби у використанні потужних контейнерів і повної системи інженерних бар'єрів. Перелік інженерних бар'єрів включає таке: матрицю РАВ, контейнер, систему тампонування свердловини з шарів цементу.

ту, асфальту і бентоніту. Система інженерних бар'єрів має зберігати свої захисні властивості лише протягом етапу експлуатації сховища і перші десятиліття після його закриття.

Було показано, що свердловинний спосіб захоронення має ряд важливих переваг стосовно економії часу на вибір майданчика і загальних видатків, а також зниження ризиків ненавмисного втручання. Результати загального порівняння варіантів шахтного і свердловинного сховища для умов України наведено в роботах (Шестопапов, Шибецький, 2006; Шестопапов, Шибецький, 2017).

## Порівняння концепцій та їх ранжування для умов України

### Порівняльна характеристика типів формацій

Аналіз матеріалів, наведених в попередніх розділах, дозволяє узагальнити переваги і недоліки перспективних типів формацій. Результати узагальнення наведено в табл. 1. При складанні таблиці використано також дані (BGE, 2020).

### Ранжування концепцій геологічного захоронення РАВ

Основні результати порівняльного аналізу концепцій геологічного захоронення РАВ в Україні наведено в (Шестопапов, Шибецький, 2018; Шестопапов, Шибецький, 2020). На даному етапі дослідження для порівняння і попереднього ранжування придатності різних формацій і притаманних їм концепцій геологічного захоронення було використано набір лише загальних якісних критеріїв. Ці критерії дозволили визначити базову концепцію геологічного захоронення РАВ, яка (з урахуванням досягнутого рівня знань) може забезпечити безпеку і характеризується найменшим ризиком її реалізації, а також дозволяє визначити просторові критерії для вибору майданчика розміщення сховища.

Зіставлення концепцій виконувалося на основі: аналізу переваг концепції, комплексної оцінки концепції, аналізу несприятливих факторів, врахування ризику ненавмисного людського втручання в майбутньому, пов'язаного з видобуванням корисних копалин у районі розміщення ГС. Результатами застосування

Таблиця 1. Переваги і недоліки вміщуючих формацій для геологічного захоронення РАВ

Table 1. Advantages and disadvantages of host formations for radwaste geological disposal

Тип формації та її особливості	Переваги	Недоліки
<b>Кристалічні породи</b> Для захоронення РАВ можуть використовуватися породи магматичного і метаморфічного походження, рідше ефузивного	Висока міцність, низька розчинність, висока термічна стабільність. Непорушені, нетріщинуваті породи мають високу утримуючу здатність	Мікротріщинуватість або мережа тріщин знижують утримуючу здатність порід
<b>Глинисті формації</b> Використовуються як пластичні глини, так і щільні, діагенетично змінені глини	Бар'єрні властивості пов'язані з мінеральним складом і дуже невеликими розмірами глинистих частинок. Глини малопроникні для підземних вод, а також характеризуються високою сорбційною здатністю по відношенню до більшості радіонуклідів	Погано проводять тепло, втрачають сорбційну здатність при нагріванні до високої температури
<b>Соленосні формації</b> Використовуються два типи структур: соляні пласти і соляні куполи	Висока теплопровідність сприяє ефективному розсіюванню тепла. Висока термічна стабільність. Пластичність під дією пластового тиску призводить до заліковування тріщин і пустот. Здатні протистояти вертикальним і горизонтальним рухам без тріщиноутворення. Солі непроникні для флюїдів і розчинів	Висока розчинність у підземних водах. Низька здатність сорбувати радіонукліди

Таблиця 2. Ранжування концепцій геологічного захоронення РАВ для умов України

Table 2. Ranking of geological disposal concepts for Ukrainian conditions

Концепція	Переваги	Несприятливі чинники	Ризик втручання	Ранг
<b>Захоронення в кристалічних породах</b>				
В межах Коростенського плутону	Геодинамічна і фізико-механічна стабільність; близькість основних джерел накопичення РАВ	Наявність широкого спектру корисних копалин, тектонічні порушення окремих зон	Середній	2
В межах ЧЗВ	Геодинамічна і механічна стабільність; близькість основних джерел РАВ; рівень вивченості, наявність потужного осадового чохла як додаткового сорбційного бар'єру	Складність вивчення кристалічних порід, перекритих товщею осадових порід	Низький	1
Вулканогенно-осадові формації	Механічна стабільність; сорбційні властивості	Геодинамічна нестабільність; гідрогеологічні особливості	Середній	3
Шахти з видобування залізних руд	Механічна стабільність; безводність. Високий рівень вивченості	Техногенна порушеність гірничого масиву; можлива зміна рівнів та складу підземних вод	Високий	3
<b>Захоронення в глинистих формаціях</b>				
ДДЗ, Прикарпаття і Причорномор'я	Сорбційні властивості; фільтраційні властивості	Віддаленість від основних джерел РАВ; гідрогеологічні особливості	Середній	2
В межах ЧЗВ	Сорбційні властивості	Геологічні (геометричні обмеження, неоднорідність); гідрогеологічні (активний вертикальний взаємозв'язок водоносних горизонтів)	Низький	3
<b>Захоронення в соленосних формаціях</b>				
Купольні структури ДДЗ і пластові солі Донбасу	Фізико-хімічна і механічна стабільність, теплофізичні властивості; відсутність води	Віддаленість від основних джерел РАВ; наявність корисних копалин; геодинамічна нестабільність	Високий	3

вказаних критеріїв є визначення умовного рангу концепції (табл. 2).

Виходячи з результатів порівняння потенційних вміщуючих формацій і ранжування розглянутих в Україні концепцій, можна зробити висновок, що на даному етапі досліджень для умов України найбільш перспективною концепцією геологічного захоронення РАВ слід вважати концепцію захоронення РАВ у докембрійських кристалічних формаціях ЧЗВ.

Нагадаємо також, що за результатами скринінгу ЧЗВ і прилеглих територій було визначено три перспективні площі для першочергового вивчення з метою вибору майданчиків для розміщення ГС РАВ (Шестопапов, Шибецький, 2020). В 2021 р. результати скринінгу були

схвалені Інженерно-технічною радою державного спеціалізованого підприємства «Центральне підприємство з поводження з радіоактивними відходами», яке визначено майбутнім Національним оператором ГС в Україні.

## Висновки

Аналіз особливостей гарантування безпеки в різних концепціях геологічного захоронення, розроблених для різних вміщуючих формацій, демонструє суттєво відмінний внесок природних бар'єрів у сукупну безпеку систем геологічного захоронення. Найбільшим відносним внеском характеризуються соленосні формації, проміжним — глинисті, найменшим —



кристалічні. Це визначається головним чином домінуючими механізмами міграції та утримання радіонуклідів, гідрогеологічними і гідрогеохімічними умовами, теплопровідністю вміщуючих порід, геодинамічними і сейсмічними характеристиками майданчика.

Системи інженерних бар'єрів для різних формацій мають практично однаковий набір складових. Проте відносна роль інженерних бар'єрів суттєво відрізняється. Особливо це стосується проектного часу утримання радіонуклідів. У кристалічних формаціях інженерні бар'єри відіграють в цьому сенсі головну роль. Проектний термін їх дії становить сотні тисяч років. Природні бар'єри забезпечують умови для максимально можливого збереження герметичності контейнерів, тобто вони виконують головним чином ізолюючі функції.

В соленосних породах ситуація зворотна — інженерні бар'єри проектується з метою сприяння максимально швидкому відновленню і збереженню бар'єрних властивостей вміщуючого середовища. Тут проектний термін збереження герметичності контейнера становить сотні років. Природні ж бар'єри дуже ефективно виконують як утримувальні, так і ізолюючі функції.

Проміжне положення характерне для глинистих формацій: термін збереження цілісності контейнера оцінюється у кілька десятків тисяч років, а природні бар'єри однаковим чином забезпечують і утримувальні, і ізолюючі функції безпеки.

Розробка концепції геологічного захоронення є обов'язковим початковим кроком при виборі майданчика, оскільки концепції забезпечення безпеки суттєво відрізняються для різних вміщуючих формацій і визначають різні критерії вибору майданчика перш за все сто-

совно глибини залягання, потужності і геометричних розмірів придатної формації.

Розробка концепції полягає у виборі вміщуючої формації, визначенні бажаної геологічної обстановки і переліку інженерних бар'єрів з обов'язковим урахуванням переліку і ключових характеристик захоронюваних РАВ (активність, нуклідний склад, властивості матриці).

Перспективність наявних в Україні формацій (концепцій захоронення) оцінювалась за внеском у забезпечення безпеки захоронення природних бар'єрів. У той же час у виборі тієї чи іншої концепції вирішальну роль можуть відігравати «негеологічні» фактори: політичні, соціальні, демографічні, інженерні та ін.

Найбільш перспективними для розміщення ГС РАВ в Україні є формації кристалічних порід УЩ. Поточний рівень їх вивченості ще недостатній. Однак міжнародний досвід обґрунтування безпеки ГС у кристалічних породах (Швеція, Фінляндія) дозволяє позитивно оцінити перспективи кристалічних формацій УЩ і рекомендувати подальше їх вивчення перш за все у межах ЧЗВ, особливо з огляду на те, що тут кристалічні формації перекриті товщею осадових порід з розвинутою системою водоносних горизонтів. У межах ЧЗВ товща осадових порід може розглядатися як додатковий сорбційний і фільтраційний бар'єр над захороненням РАВ у кристалічному фундаменті, що надає додаткові гарантії безпеки захоронення. Тобто, для майданчиків ЧЗВ наявна унікальна синергія і взаємодоповнення бар'єрних властивостей двох типів формацій: кристалічних і осадових.

Лише у випадку, коли будуть отримані негативні результати обґрунтування безпеки захоронення РАВ у кристалічних формаціях ЧЗВ, варто переходити до детального вивчення інших регіонів і типів формацій.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо вдосконалення законодавства у сфері поводження з радіоактивними відходами». *Відомості Верховної Ради України*. 2019. № 50. Ст. 359. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/208-20#Text>
- Про затвердження «Вимог до вибору майданчика для розміщення сховища для захоронення радіоактивних відходів». Державний комітет ядерного регулювання України. Наказ від 14.11.2008 № 188. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1166-08#Text>
- Про затвердження «Загальних положень безпеки при захороненні радіоактивних відходів». Державний комітет ядерного регулювання України. Наказ від 13.08.2018 № 331. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1008-18#Text>
- Скворцов Д.В. Возможно ли захоронение долгоживущих радиоактивных отходов в шахтах Украины? Киев: ИГНС НАН и МЧС Украины, 2003. 93 с.

- Соботович Э.В., Шестопалов В.М., Белевцев Р.Я., Яковлев Б.Г. Состояние проблемы захоронения радиоактивных отходов в Украине и геологические аспекты их изоляции. *Проблеми Чорнобильської зони відчуження*. 1996. Вип. 3. С. 5—15.
- Хрущов Д.П., Громов Л.І. Видалення радіоактивних відходів у сховищах геологічного типу. *Бюл. екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення*. 2003. № 2 (22). С. 44—51.
- Хрущов Д.П., Шехунова С.Б. Вибір площ і структур, сприятливих для ізоляції радіоактивних відходів в соленосних формаціях України. *Екологічні проблеми захоронення радіоактивних відходів: матеріали симпоз.* Київ, 2000. С. 9—10.
- Чорнобильська катастрофа — 20 років: участь Інституту геохімії навколишнього середовища в подоланні наслідків: Соботович Е.В. (ред.). Київ: Салютіс, 2006. 408 с. ISBN 978-966-96903-0-2
- Шабалін Б.Г., Бухарев В.П., Скаржинський О.В. Пошук найоптимальніших форм захоронення високоактивних відходів у кварцитах Словечансько-Овруцької височини. *Мінеральні ресурси України*. 2001. № 3. С. 30.
- Шестопалов В.М. (ред.). *Ізоляція радіоактивних відходів в недрах України (проблеми і можливі рішення)*: Київ: Вус, 2006. 398 с. ISBN 966-7264-13-0
- Шестопалов В.М., Руденко Ю.Ф., Шимків Л.М. Обґрунтування можливості ізоляції радіоактивних відходів в кристалічних породах Чорнобильської зони відчуження. *Екологія і природокористування*. 2003. Вип. 5. С. 185—197.
- Шестопалов В.М., Шибецький Ю.А. Геологічне захоронення радіоактивних відходів в Україні: історія, сучасне становище, перспективи. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2017. Вип. 2. С. 38—45.
- Шестопалов В.М., Шибецький Ю.А. (ред.). Геологічна складова безпеки глибокого захоронення радіоактивних відходів. Київ: Новий друк, 2018. 240 с.
- Шестопалов В.М., Шибецький Ю.О. Методологія дослідження ізолюючих властивостей гранітоїдів Українського щита при захороненні радіоактивних відходів. *Еволюція докембрійських гранітоїдів і пов'язаних з ними корисних копалин у зв'язку з енергетикою землі і етапами її тектоно-магматичної активізації: матеріали конф.* Київ, 2008. С. 201—207.
- Шестопалов В.М., Шибецький Ю.О. Щодо можливості використання в Україні свердловинного типу конструкції геологічного сховища радіоактивних відходів. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2006. № 5. С. 39—50.
- Шестопалов В.М., Шибецький Ю.О. (ред.). Скринінг України щодо перспективи геологічного захоронення радіоактивних відходів: Київ: Новий друк, 2020. 136 с. ISBN 978-617-635-162-7
- Шинкарук В.І. Філософський енциклопедичний словник. Київ: Абрис, 2002. 742 с. ISBN 966-531-128-X
- ANDRA. 2005a. Dossier 2005 Argile / Safety evaluation of a geological repository. [https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/6-%20Dossier%202005%20Argile%20Tome%20-%20Safety%20evaluation%20of%20a%20geological%20repository\\_0.pdf](https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/6-%20Dossier%202005%20Argile%20Tome%20-%20Safety%20evaluation%20of%20a%20geological%20repository_0.pdf) (accessed 14 December 2021).
- ANDRA. 2005b. Dossier 2005 Argile / Synthesis - Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation. [https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/3-%20Dossier%202005%20Argile%20Synthesis%20-%20Evaluation%20of%20the%20feasibility%20of%20a%20geological%20repository%20in%20an%20argillaceous%20formation\\_0.pdf](https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/3-%20Dossier%202005%20Argile%20Synthesis%20-%20Evaluation%20of%20the%20feasibility%20of%20a%20geological%20repository%20in%20an%20argillaceous%20formation_0.pdf) (accessed 14 December 2021).
- ANDRA. 2005c. Dossier 2005 / Andra research on the geological disposal of high-level long-lived radioactive waste. Results and perspectives. <https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/Dossier%202005%20Andra%20research%20on%20the%20geological%20disposal%20of%20high-level%20long-lived%20radioactive%20waste%20-%20Results%20and%20perspectives.pdf> (accessed 14 December 2021).
- ANDRA. 2016. Cigeo - Proposed Operations Master Plan. <https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-07/CGTEDNTEAMOASDR0000150063-PDE-EN1.pdf> (accessed 14 December 2021).
- BGE. 2020. Sub-areas Interim Report pursuant to Section 13 StandAG. [https://www.bge.de/fileadmin/user\\_upload/Standortsuche/Wesentliche\\_Unterlagen/Zwischenbericht\\_Teilgebiete/Zwischenbericht\\_Teilgebiete\\_-\\_Englische\\_Fassung\\_barrierefrei.pdf](https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_-_Englische_Fassung_barrierefrei.pdf) (accessed 14 December 2021).
- Bogorinski P., Larue P.-J., Pörtl B., Röhlig K.-J., Thetford R., Cox I., Crookshanks C., Holden P., Locke J., Sobotovich E., Golovko N., Koval V., Skvortsov V., Bogdan L., Korchagin P., Yakovlev Y., Kuhar P. 1999. Feasibility Study for an Underground Repository for Long-Lived Non-heat-generating Radioactive Waste in Ukraine. CEC-Contract B7-6340/95/001028/MAR7C3. CEC. Luxembourg, EUR 17631 EN. ISBN 92-828-7171-1
- Bollingerfehr W., Bertrams N., Buhmann D., Minkley W., Mönig J., Eickemeier R., Popp T., Fahland S., Prignitz S., Filbert W., Reinhold K., Hammer J., Simo E., Kindlein J., Thiemeyer T., Knauth M., Völkner E., Liu W., Wolf J. 2018. BGE TEC 2018-13: Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany (KOSINA). BGE TECHNOLOGY, Peine, 2018. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Charakterisierung\\_Wirtsgesteine\\_geotech\\_Barrieren/2\\_Steinsalz/2018-10-30\\_kosina\\_concept\\_developments\\_bge\\_tec.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Charakterisierung_Wirtsgesteine_geotech_Barrieren/2_Steinsalz/2018-10-30_kosina_concept_developments_bge_tec.pdf?__blob=publicationFile&v=6) (accessed 14 December 2021).
- Bollingerfehr W., Buhmann D., Filbert W., Keller S., Krone J., Lommerzheim A., Mönig J., Mrugalla S., Müller-Hoeppe N., Weber J.R., Wolf J. 2013. Status of the safety concept and safety demonstration for an HLW repository in salt. Summary report. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, DBE Technology GmbH (DBE Tec), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), TEC-15-2013-AB, BMWi-FKZ 02E10719 und

- 02E10729, Technischer Bericht, Peine, 2013. [https://www.bge-technology.de/fileadmin/user\\_upload/MEDIATHEK/f\\_e\\_berichte/KOMTESSA-Projekt\\_Status-of-the-safety-concept-and-safety-demonstration-for-a-SNF-HLW-repository-in-salt-\\_ISIBEL\\_Status\\_.pdf](https://www.bge-technology.de/fileadmin/user_upload/MEDIATHEK/f_e_berichte/KOMTESSA-Projekt_Status-of-the-safety-concept-and-safety-demonstration-for-a-SNF-HLW-repository-in-salt-_ISIBEL_Status_.pdf) (accessed 14 December 2021).
- DBE. 2017. Концепції захоронення радіоактивних відходів в Україні: проект INSC U.04.01/09-В. Пайнэ. DBE Technology. 2017. Электронно-оптический диск (CD-ROM).
- Gesetz. 2017. Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle, [https://www.gesetze-im-internet.de/standag\\_2017/index.html#BJNR107410017BJNE000100000](https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/index.html#BJNR107410017BJNE000100000) (accessed 14 December 2021).
- IAEA. 2011. Geological disposal facilities for radioactive waste: specific safety guide. — Vienna: International Atomic Energy Agency. (IAEA safety standards series, no. SSG-14). [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1483\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1483_web.pdf) (accessed 14 December 2021).
- IAEA. 2012. The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste: specific safety guide. — Vienna: International Atomic Energy Agency. — (IAEA safety standards series, no. SSG-23). [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1553\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1553_web.pdf) (accessed 14 December 2021).
- IAEA. 2014. Planning and design considerations for geological repository programmes of radioactive waste. — Vienna: International Atomic Energy Agency. (IAEA-TECDOC series, no. 1755). ISBN 978-92-0-109914-3. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1755\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1755_web.pdf) (accessed 14 December 2021).
- IAEA. 2018. IAEA safety glossary: 2018 edition / Vienna: International Atomic Energy Agency. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1830\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1830_web.pdf) (accessed 14 December 2021).
- IAEA. 2020. Underground disposal concepts for small inventories of intermediate and high level radioactive waste / Vienna: International Atomic Energy Agency. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1934\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1934_web.pdf) (accessed 14 December 2021).
- SKB. 2000. Very deep borehole. Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability. [https://www.mkg.se/uploads/DB/SKB\\_R-00-35\\_Very\\_deep\\_borehole\\_Deutags\\_opinion.pdf](https://www.mkg.se/uploads/DB/SKB_R-00-35_Very_deep_borehole_Deutags_opinion.pdf) (accessed 30 January 2022).
- SKB. 2008. Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. <https://skb.se/upload/publications/pdf/TR-08-05.pdf> (accessed 14 December 2021).
- SKB. 2010. Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site. SKB, Stockholm. <https://www.skb.se/publikation/2166831/TR-10-50.pdf> (accessed 14 December 2021).
- SKB. 2011. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark / Main report of the SR-Site project, Volume I. SKB, Stockholm. [https://www.skb.se/publikation/2345580/TR-11-01\\_vol1.pdf](https://www.skb.se/publikation/2345580/TR-11-01_vol1.pdf) (accessed 14 December 2021).
- SKB. 2018. Spent Fuel Repository. [https://www.skb.com/publication/2681684/Fact-sheet\\_Spent\\_Feul\\_Repository.pdf](https://www.skb.com/publication/2681684/Fact-sheet_Spent_Feul_Repository.pdf) (accessed 14 December 2021).
- Webster Dictionary. 2021. "Concept." *Merriam-Webster.com Dictionary*, Merriam-Webster. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/concept> (accessed 17 November 2021).

Надійшла до редакції 20.12.2021  
 Надійшла у ревізованій формі 10.02.2022  
 Прийнята 10.02.2022

## REFERENCES

- ANDRA. 2005a. Dossier 2005 Argile / Safety evaluation of a geological repository. [https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/6-%20Dossier%202005%20Argile%20Tome%20-%20Safety%20evaluation%20of%20a%20geological%20repository\\_0.pdf](https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/6-%20Dossier%202005%20Argile%20Tome%20-%20Safety%20evaluation%20of%20a%20geological%20repository_0.pdf) (accessed 14 December 2021).
- ANDRA. 2005b. Dossier 2005 Argile / Synthesis - Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation. [https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/3-%20Dossier%202005%20Argile%20Synthesis%20-%20Evaluation%20of%20the%20feasibility%20of%20a%20geological%20repository%20in%20an%20argillaceous%20formation\\_0.pdf](https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/3-%20Dossier%202005%20Argile%20Synthesis%20-%20Evaluation%20of%20the%20feasibility%20of%20a%20geological%20repository%20in%20an%20argillaceous%20formation_0.pdf) (accessed 14 December 2021).
- ANDRA. 2005c. Dossier 2005 / Andra research on the geological disposal of high-level long-lived radioactive waste. Results and perspectives. <https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/Dossier%202005%20Andra%20research%20on%20the%20geological%20disposal%20of%20high-level%20long-lived%20radioactive%20waste%20-%20Results%20and%20perspectives.pdf> (accessed 14 December 2021).
- ANDRA. 2016. Cigeo - Proposed Operations Master Plan. <https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-07/CGTEDNTEAMOASDR0000150063-PDE-EN1.pdf> (accessed 14 December 2021).
- BGE. 2020. Sub-areas Interim Report pursuant to Section 13 StandAG. [https://www.bge.de/fileadmin/user\\_upload/Standortsuche/Wesentliche\\_Unterlagen/Zwischenbericht\\_Teilgebiete/Zwischenbericht\\_Teilgebiete\\_-\\_Englische\\_Fassung\\_barrierefrei.pdf](https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_-_Englische_Fassung_barrierefrei.pdf) (accessed 14 December 2021).
- Bogorinski P., Larue P.-J., Pörtl B., Röhlig K.-J., Thetford R., Cox I., Crookshanks C., Holden P., Locke J., Sobotovich E., Golovko N., Koval V., Skvortsov V., Bogdan L., Korchagin P., Yakovlev Y., Kuhar P. 1999. Feasibility Study for an Underground Repository for Long-Lived Non-heat-generating Radioactive Waste in Ukraine. CEC-Contract B7-6340/95/001028/MAR7C3. CEC. Luxembourg, EUR 17631 EN. ISBN 92-828-7171-1

- Bollingerfehr W., Bertrams, N., Buhmann, D., Minkley W., Mönig J., Eickemeier R., Popp T., Fahland S., Prignitz S., Filbert W., Reinhold K., Hammer J., Simo E., Kindlein J., Thiemeyer T., Knauth M., Völkner E., Liu W., Wolf J. 2018. BGE TEC 2018-13: Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany (KOSINA). BGE TECHNOLOGY, Peine, 2018. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Charakterisierung\\_Wirtsgesteine\\_geotech\\_Barrieren/2\\_Steinsalz/2018-10-30\\_kosina\\_concept\\_developments\\_bge\\_tec.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Charakterisierung_Wirtsgesteine_geotech_Barrieren/2_Steinsalz/2018-10-30_kosina_concept_developments_bge_tec.pdf?__blob=publicationFile&v=6) (accessed 14 December 2021).
- Bollingerfehr W., Buhmann D., Filbert W., Keller S., Krone J., Lommerzheim A., Mönig J., Mrugalla S., Müller-Hoeppe N., Weber J. R., Wolf J. 2013. Status of the safety concept and safety demonstration for an HLW repository in salt. Summary report. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, DBE Technology GmbH (DBE Tec), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), TEC-15-2013-AB, BMWi-FKZ 02E10719 und 02E10729, Technischer Bericht, Peine, 2013. [https://www.bge-technology.de/fileadmin/user\\_upload/MEDIATHEK/f\\_e\\_berichte/KOMTESSA-Projekt\\_Status-of-the-safety-concept-and-safety-demonstration-for-a-SNF-HLW-repository-in-salt-\\_ISIBEL\\_Status\\_.pdf](https://www.bge-technology.de/fileadmin/user_upload/MEDIATHEK/f_e_berichte/KOMTESSA-Projekt_Status-of-the-safety-concept-and-safety-demonstration-for-a-SNF-HLW-repository-in-salt-_ISIBEL_Status_.pdf) (accessed 14 December 2021).
- DBE. 2017. Concepts of radioactive waste disposal in Ukraine: INSC project U.04.01/09-B. Peine: DBE Technology, CD-ROM (in Russian).
- Gesetz. 2017. Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. [https://www.gesetze-im-internet.de/standag\\_2017/index.html#BJNR107410017BJNE000100000](https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/index.html#BJNR107410017BJNE000100000) (accessed 14 December 2021).
- IAEA. 2011. Geological disposal facilities for radioactive waste: specific safety guide. — Vienna: International Atomic Energy Agency. (IAEA safety standards series, no. SSG-14). [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1483\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1483_web.pdf) (accessed 14 December 2021).
- IAEA. 2012. The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste: specific safety guide. — Vienna: International Atomic Energy Agency. — (IAEA safety standards series, no. SSG-23). [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1553\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1553_web.pdf) (accessed 14 December 2021).
- IAEA. 2014. Planning and design considerations for geological repository programmes of radioactive waste. — Vienna: International Atomic Energy Agency. (IAEA-TECDOC series, no. 1755). ISBN 978-92-0-109914-3. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1755\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1755_web.pdf) (accessed 14 December 2021).
- IAEA. 2018. IAEA safety glossary: 2018 edition / Vienna: International Atomic Energy Agency. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1830\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1830_web.pdf) (accessed 14 December 2021).
- IAEA. 2020. Underground disposal concepts for small inventories of intermediate and high level radioactive waste / Vienna: International Atomic Energy Agency. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1934\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1934_web.pdf) (accessed 14 December 2021).
- Khrushchov D.P., Gromok L.I. 2003. Disposal of radioactive waste in geological repositories. *Bulleten ekologichnogo stanu zony vidchuzhennia ta zony bezumovnoho (oboviazkovogo) vidseleennia*, 2 (22), 44-51 (in Ukrainian).
- Khrushchov D.P., Shekhunova S.B. 2000. Selection of areas and structures favorable for the isolation of radioactive waste in saline formations of Ukraine. *Ecologicheskie problemy zahoroneniya radioaktivnykh othodov: materialy simposiumy*. Kyiv, 9-10 (in Ukrainian).
- Law on Radioactive Waste Management. 2019. Law of Ukraine “On Amendments to Certain Laws of Ukraine on Improving Legislation in the Sphere of Radioactive Waste Management”. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*, 50, 359 (in Ukrainian). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/208-20#Text>
- Provisions. 2018. On approval of the General provisions on safety in the disposal of radioactive waste. State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine. Order from 13.08.2018 № 331 (in Ukrainian). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1008-18#Text>
- Requirements. 2008. On approval of the Requirements for the selection of a site for the radioactive waste repository. State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine. Order from 14.11.2008 № 188 (in Ukrainian). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1166-08#Text>
- Shabalín B.G., Bukharev V.P., Skarzhinsky O.V. 2001. Search for the best forms of high-level waste disposal in the quartzites of the Slovenian-Ovruch Upland. *Mineralni resursy Ukrainy*, 3, 30 (in Ukrainian).
- Shestopalov V.M. (Ed.) (2006). Geological disposal of radioactive waste in Ukraine (problems and solutions): Kyiv: Vus (in Russian).
- Shestopalov V.M., Rudenko, Yu.F., Shymkiv L.M. 2003. Substantiation of the possibility of disposal of radioactive waste in crystalline rocks of the Chernobyl Exclusion Zone. *Ecologiy i pryrodokorystuvanniya*, 5, 185-197 (in Ukrainian).
- Shestopalov V.M., Shybetskiy Iu.O. 2006. Regarding the possibility of using a borehole-type of geological disposal of radioactive waste in Ukraine. *Ecologiya dovkilliya ta bezpeka zhyttiyediyalnosti*, 5, 39-50 (in Ukrainian).
- Shestopalov V.M., Shybetskiy Iu.O. 2008. Methodology for studying the isolating properties of granitoids of the Ukrainian Shield for radioactive waste disposal. *Evolucija dokembrijskyh granitoidiv i poviazanyh z nymy korysnyh kopalyn u zviazku z energetykoyu Zemli i etapamy ii tektono-magmatychnoi aktyvizacii: materialy konferencii*. Kyiv, 201-207 (in Ukrainian).
- Shestopalov V.M., Shybetskiy Iu.O. 2017. Geological Disposal of Radioactive Waste in Ukraine: History, Current State, Prospects. *Yaderna ta radiacyyna bezpeka*, 2 (74), 38-45 (in Russian).

- Shestopalov V.M., Shybetskiy Y.O.* (Eds.). 2018. Geological evidences of safety of radioactive waste deep disposal. Kyiv: Noviy Druk (in Russian).
- Shestopalov V.M., Shybetskiy Y.O.* (Eds.). 2020. Screening of Ukraine for geological disposal of radioactive waste: Kyiv: Noviy Druk (in Ukrainian).
- Shynkaruk V.I.* 2002. Philosophical encyclopedic dictionary. Kyiv : Abrys (in Ukrainian).
- SKB. 2000. Very deep borehole. Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability. [https://www.mkg.se/uploads/DB/SKB\\_R-00-35\\_Very\\_deep\\_borehole\\_Deutags\\_opinion.pdf](https://www.mkg.se/uploads/DB/SKB_R-00-35_Very_deep_borehole_Deutags_opinion.pdf) (accessed 30 January 2022).
- SKB. 2008. Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. <https://skb.se/upload/publications/pdf/TR-08-05.pdf> (accessed 14 December 2021).
- SKB. 2010. Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site. SKB, Stockholm. <https://www.skb.se/publikation/2166831/TR-10-50.pdf> (accessed 14 December 2021).
- SKB. 2011. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark / Main report of the SR-Site project, Volume I. SKB, Stockholm. [https://www.skb.se/publikation/2345580/TR-11-01\\_vol1.pdf](https://www.skb.se/publikation/2345580/TR-11-01_vol1.pdf) (accessed 14 December 2021).
- SKB. 2018. Spent Fuel Repository. [https://www.skb.com/publication/2681684/Fact-sheet\\_Spent\\_Feul\\_Repository.pdf](https://www.skb.com/publication/2681684/Fact-sheet_Spent_Feul_Repository.pdf) (accessed 14 December 2021).
- Skvortsov D.V.* 2003. Is it possible to dispose of long-lived radioactive waste in mines of Ukraine? Kyiv: IEG NAS and Ministry of Emergency of Ukraine (in Russian).
- Sobotovich E.V.* (Ed.). 2006. Chernobyl Catastrophe — 20 years: Involvement of the Institute of the Environmental Geochemistry in overcoming consequences. Kyiv: Salutis (in Ukrainian).
- Sobotovich E.V., Shestopalov V.M., Belevtsev R.Ya., Yakovlev B.G.* 1996. State of the problem of radioactive waste disposal in Ukraine and geological aspects of their isolation. *Problemy Chernobylskoy Zony Otchuzhdeniya*, (3), 5-15 (in Russian).
- Webster Dictionary. 2021. "Concept." *Merriam-Webster.com Dictionary*, Merriam-Webster. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/concept> (accessed 17 November 2021).

Received 20.12.2021

Received in revised form 10.02.2022

Accepted 10.02.2022

*Iu.O. Shybetskiy, V.M. Shestopalov, V.I. Pochtarenko, T.A. Borysova, N.O. Shurpach*  
 State Enterprise «Radioenvironmental centre of NAS of Ukraine», Kyiv, Ukraine  
 E-mail: shybetskiy@hydrosafe.kiev.ua; vmshest@gmail.com;  
 boegor@ukr.net; shurpach@hydrosafe.kiev.ua

#### CONCEPTS OF GEOLOGICAL DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE

The paper defines the term "concept of geological disposal" of radioactive waste. The international and national experience of the geological disposal concept development is analyzed. The peculiarities of the safety contribution from the natural and engineered barriers of repository for different types of geological formations are described.

It is shown that development of the disposal concept includes the selection of the host formation, determination of the desired geological situation, as well as the list of engineered barriers, taking into account the radwaste inventory.

The development of a geological disposal concept is a mandatory initial step in site selection, as safety concepts differ significantly for different host formations and define different site selection criteria, primarily in terms of depth, thickness and geometric dimensions of the suitable formation.

Engineered barrier systems for different host rocks have almost the same set of components. However, the relative role of engineered barriers differs significantly. This is especially true for the design time of radionuclide containment. In crystalline formations, engineered barriers play a major role in this sense. Their design life is hundreds of thousands of years. Natural barriers provide the conditions for maintaining the tightness of containers as much as possible. In rock salts, the situation is reversed - engineered barriers are designed to facilitate the fastest recovery and preservation of the barrier properties of the host environment. Here, the design life time of the container is hundreds of years. The clay formations has intermediate position: the design life time of the container is tens of thousands of years.

It is shown also that at this stage of research for the Ukrainian conditions the most promising concept of radioactive waste geological disposal is the disposal in Precambrian crystalline formations within the Chornobyl Exclusion Zone. Here the crystalline formations are covered by sedimentary rocks with a developed system of aquifers. These sedimentary rocks can be considered as an additional sorption and filtration barriers.

Only in the case when negative results of safety case development for crystalline formations of Chornobyl Exclusion Zone will be obtained, it is necessary to proceed to a detailed study of other regions and host rocks types.

**Keywords:** *geological repository; radioactive waste; disposal concept.*