



ШЕХУНОВА
Стелла Борисівна –
член-кореспондент НАН
України, заступник директора
Інституту геологічних наук
НАН України

ГЕОЛОГО-ГЕОФІЗИЧНІ ПРОБЛЕМИ ГЛИБИННОЇ ІЗОЛЯЦІЇ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

За матеріалами наукової доповіді на засіданні
Президії НАН України 19 квітня 2017 року

Розглянуто сучасний стан та проблемні питання геолого-геофізичного обґрунтування створення геологічного сховища радіоактивних відходів в Україні. Проаналізовано міжнародний і національний досвід, останні результати з вибору та оцінки перспективних ділянок для подальших робіт з визначення майданчика для сховища радіоактивних відходів у кристалічних породах Чорнобильської зони відчуження і на прилеглих територіях. Для зменшення негативних наслідків відтермінування початку геолого-геофізичних робіт з вибору перспективного майданчика для глибинного геологічного сховища радіоактивних відходів запропоновано створити Міжвідомчу науково-методичну раду з геологічних проблем ізоляції радіоактивних та інших небезпечних відходів у надрах, що сприятиме координації робіт, розвитку національних досліджень відповідно до міжнародних зобов'язань України.

Ключові слова: радіоактивні відходи, токсичні відходи, глибинне геологічне сховище, ізоляція відходів.

Вступ

Класичний ланцюг поводження з радіоактивними відходами (РАВ), зокрема в ядерному паливному циклі, розпочинається в геологічному середовищі з видобутку сировини і закінчується в геологічному середовищі, в яке вони видаляються. Радіоактивні відходи в Україні утворюються в процесі видобування та переробки уранових руд, виробництва електричної енергії на атомних електростанціях, у результаті використання радіоіотопів у медицині, промисловості, науці, функціонування дослідницьких ядерних установок тощо, проте найбільші об'єми РАВ сформувалися внаслідок чорнобильської катастрофи. Проблема, пов'язана з останньою ланкою в ланцюзі поводження з радіоактивними відходами, а саме надійній ізоляції їх від біосфери, і присвячено цей матеріал.

Різні типи сховищ призначені для ізоляції різних класів радіоактивних відходів (рис. 1), які поділяються за своєю активністю на такі [1–5]:

- *надзвичайно низькоактивні відходи* (ННАВ), поводження з якими не потребує контролю;

- *дуже низькоактивні відходи* (ДНАВ) з періодом потенційної небезпечності до 100 років, мають зберігатися в поверхневих сховищах, без складних систем ізоляції від біосфери;

- *низькоактивні відходи* (НАВ) з періодом потенційної небезпечності до 300 років, мають зберігатися в приповерхневих та/або наземних сховищах з інженерними бар'єрами;

- *середньоактивні відходи* (САВ) з періодом потенційної небезпечності до 10 тис. років, для ізоляції яких використовують сховища геологічного типу на проміжній глибині та інженерні бар'єри;

- *високоактивні відходи* (ВАВ) з періодом потенційної небезпечності понад 10 тис. років, ізоляція яких повинна здійснюватися у глибинних геологічних сховищах з системою інженерних бар'єрів.

Розподіл РАВ в Україні за можливістю їх захоронення у сховищах різних типів наведено на рис. 2. Середньо- та високоактивні відходи і відпрацьоване ядерне паливо (ВЯП), яке розглядають як відходи, якщо воно не підлягає переробленню (наприклад, відпрацьовані паливні елементи реакторів РБМК) або потребує зберігання до впровадження відповідної технології переробки, необхідно ізолювати від біосфери на інтервали часу від десятків тисяч до мільйонів років, які за своїми масштабами є геологічними. В Україні САВ і ВАВ становлять лише 3% усіх РАВ за об'ємом, але за активністю — це 99,9%. Тому для зберігання таких відходів створюють підземні сховища геологічного типу з метою використання бар'єрного потенціалу геологічних утворень. Масообмін у літосфері на стабільних ділянках земної кори (щити, платформи), не ускладнених розривними порушеннями, а відтак, і зонами підвищеної проникності, в сотні тисяч разів по-

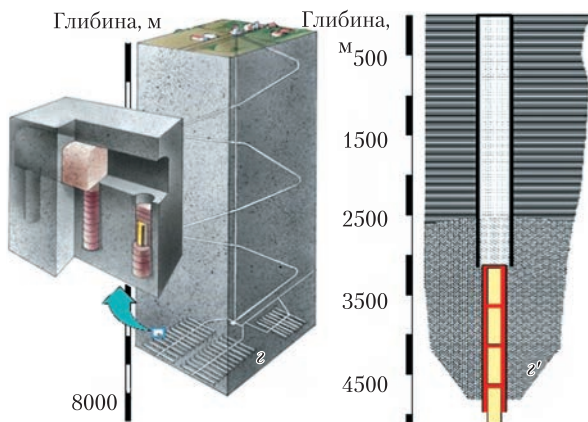
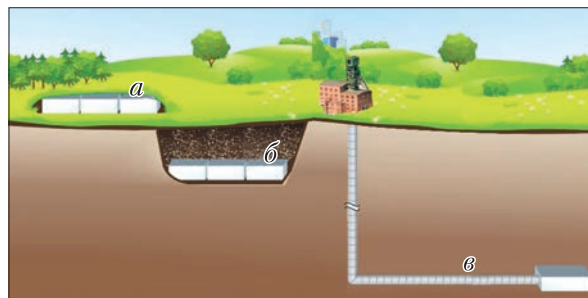


Рис. 1. Приклади концептуальних рішень сховищ для ізоляції різних класів РАВ [4, 5]: *a* — наземне сховище для ДНАВ; *б* — приповерхнє сховище для НАВ; *в* — підземне сховище геологічного типу на глибині до 700 м для САВ; *z* і *z'* — геологічне глибинне сховище для ВАВ — комбіноване шахтно-свердловинне (*z*) та свердловинне (*z'*)

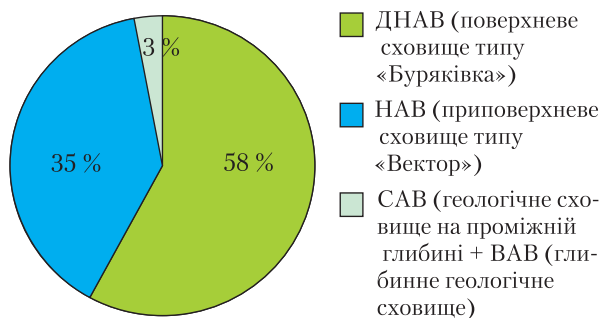


Рис. 2. Розподіл об'ємів РАВ в Україні за можливістю їх захоронення у сховищах різних типів [3, 4]

вільніший за масообмін в атмосфері, гідросфері та педосфері, що має забезпечити ізоляційні властивості сховища в геологічних інтервалах часу.

Типи та конструктивні особливості сховищ геологічного типу

Залежно від геологічних умов, характеристик РАВ і конструктивних особливостей сховища розміщення його основної частини може проектуватися на глибинах від 200–400 м (для шахтних сховищ) до 3–5 км (для сховищ свердловинного типу) (рис. 1).

У світі зараз є лише одне ліцензоване сховище геологічного типу для довгоіснуючих трансуранових відходів¹ — це об'єкт WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) у США. Воно споруджене з нульового циклу як геологічне сховище шахтного типу для відходів військового походження² і ще у квітні 1999 р. прийняло на зберігання першу промислову партію відходів. WIPP знаходиться на південному сході штату Нью-Мексико. Саме сховище розташоване у відкладах кам'яної солі формації Саладо, яка має потужність до 700 м (рис. 3). Робочий простір має вісім тунелів, кожен з сімома камерами для відходів, на глибині 600 м. Повна проектна потужність сховища передбачає ізоляцію 175 тис. м³ відходів [6].

Над обґрунтуванням безпеки сховищ свердловинного типу в 1990-х роках у США працювали на замовлення Департаменту енергетики з метою ізоляції залишків плутонію, потім дослідження продовжили у Шеффільдському університеті (Велика Британія), Массачусетському технологічному інституті (США) та в Сандійських національних лабораторіях Міністерства енергетики США [7].

Ідея свердловинного сховища для ізоляції відпрацьованого ядерного палива та висо-

коактивних відходів реалізується, зокрема, у Швеції (VDH); глибина свердловин становить до 5000 м, РАВ розміщуються в інтервалі глибин від 3 000 до 5 000 м; основу довготривалої безпеки забезпечують геологічні бар'єри. Прикладом реалізації концепції сховища шахтного типу є інший шведський проект (KBS-3V) для зберігання широкого спектра відходів (ВЯП, ВАВ, САВ) на глибині 450–600 м. Основа безпеки — інженерні бар'єри (мідний контейнер та ін.) і геологічне середовище [4, 5].

Міжнародне співробітництво та міжнародні зобов'язання України щодо глибинних сховищ РАВ геологічного типу

Сучасний світовий досвід у вирішенні проблеми безпечної ізоляції РАВ у сховищі геологічного типу має дві складові: розроблення проектів багатонаціонального/інтернаціонального сховища (наприклад, програми Aigis Corporation, ініціативи Австралії, Китаю) та розроблення і виконання національних програм геологічної ізоляції РАВ. Перший підхід розглядають як технократично-раціональний, проте малоімовірний через соціально-політичні чинники (просування ідеї розміщення «чужих» РАВ на фоні радіофобії може коштувати відповідним політичним силам їх «політичного життя»). Тому для унеможливлення реалізації національних сценаріїв «чекати та спостерігати» у сфері поводження з довгоіснуючими РАВ та відпрацьованим ядерним паливом прийнято низку міжнародних документів загального і регіонального рівня. Так, документи МАГАТЕ (наприклад, [8]) вимагають від національних органів постійних звітів, відкритих для контролю міжнародними експертами, про розроблення та впровадження чіткої стратегії поводження з відходами. Для європейських країн такі вимоги формалізовано в Директиві Євратому «Про зобов'язання країни — члена ЄС щодо відпрацьованого ядерного палива і РАВ» [9]. І хоча в Директиві підкреслюється легальність переміщення РАВ між країнами (і не

¹ До трансуранових відходів у США належать відходи, що містять α -випромінювачі трансуранових елементів, з періодом піврозпаду понад 20 років і активністю більш як 100 нКи/г.

² У США передбачено окреме поводження з середньоактивними цивільними і військовими відходами. Для ізоляції низькоактивних військових відходів використовують приповерхневі сховища та шахти на колишніх військових полігонах (Savannah River Plant, South Carolina; Hanford Reservation, Washington; Idaho National Engineering Laboratory, Idaho).

тільки в межах Євросоюзу) з метою розміщення РАВ в існуючому геологічному сховищі, проте на такі сценарії важко очікувати навіть у перспективі.

Згідно зі статтями 4, 5 цієї Директиви, кожна країна повинна мати національну політику поводження з ВЯП і РАВ і програму її реалізації; захоронювати власні РАВ на своїй території; відповідати за безпеку захоронення ВЯП і РАВ; забезпечити науково обґрунтоване прийняття рішень і фінансування поводження з ВЯП і РАВ.

Країни з розвинутою ядерною енергетикою виконують ці зобов'язання. В Європі з 18 країн, що експлуатують АЕС, а відтак, накопичують ВЯП і ВАВ, 16 — розвивають програми геологічного захоронення. Ці програми перебувають на різних стадіях реалізації. Десять країн поки що обирають місце для розташування сховища; сім — виконують натурні експерименти в підземних лабораторіях; три (Фінляндія, Швеція і Франція) — планують збудувати сховище до 2025 р. Україна як асоційований член ЄС також має виконувати зазначену Директиву [3, 4].

Безпека геологічного сховища РАВ ґрунтується на багатобар'єрному принципі [10, 11] і складається з трьох основних елементів (рис. 4):

- інженерні бар'єри (матриця відходів; багат шарові контейнери/каністри; буферні застипки);
- геологічний бар'єр (ближня зона геологічного середовища — вміщуючі та прилеглі низькопроникні породи геологічної формації);
- прилегла частина геосфери (дальня зона геологічного середовища).

У довготривалій безпеці сховища на властивості геологічного середовища ближньої зони покладається основна бар'єрна функція. Два останні елементи входять у сферу відповідальності досліджень і робіт геологічного циклу.

Як свідчить позитивний міжнародний досвід, за умови нормального стабільного фінансування на організацію і проведення науково-розвідувальних і науково-дослідних робіт геологічного циклу витрачається 30—40 років. Початковим етапом є проведення *дрібномасштабних скринінгових* пошуково-розвідувальних

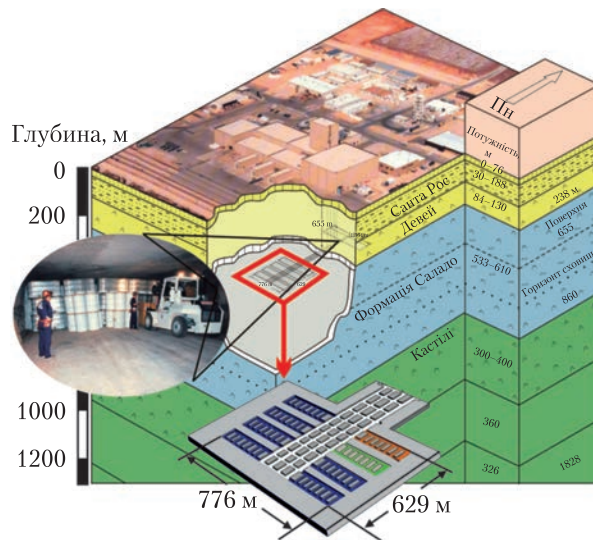


Рис. 3. Схема сховища геологічного типу WIPP у США для трансураних відходів [6, 7]

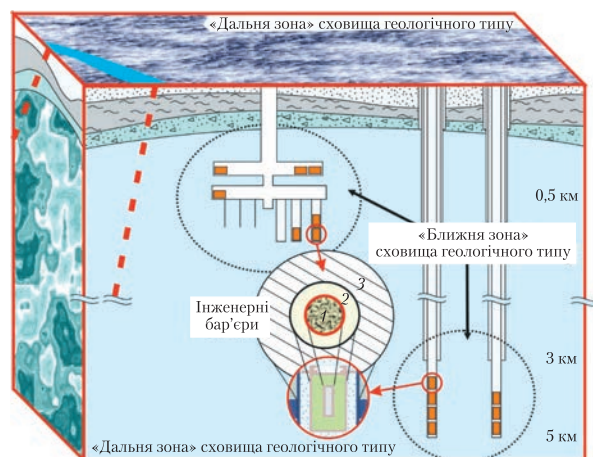


Рис. 4. Схематична візуалізація принципу багатобар'єрності ізоляції РАВ у геологічному сховищі шахтного (ліворуч) та свердловинного (праворуч) типу

геолого-геофізичних робіт для визначення перспективних регіонів, для чого оцінюють усі перспективні типи геологічних формацій на території країни. Потенційно перспективним геологічним середовищем є соляні, кристалічні та глинисті породи. На цьому етапі параметри тіл цих порід, характер залягання тощо аналізують і вивчають за комплексами критеріїв прийнятності та виключення [6, 10,

11]. Дослідження цих властивостей є комплексним, багатоетапним, стадіальним. Як і всі геолого-розвідувальні роботи, їх виконують зі збільшенням масштабу та детальності.

Інструментом прийняття рішення для кожного наступного кроку є оцінка безпеки, яка ґрунтується на параметрах геологічного середовища, визначених за результатами попередніх геологічних досліджень.

Далі за результатами *середньомасштабних геолого-геофізичних робіт* встановлюють перспективні райони поширення геологічних формацій, в яких після оцінок безпеки визначають перспективні ділянки. У межах цих ділянок після численних ітерацій оцінок безпеки виділяють перспективні майданчики. На них виконують уже детальні *крупномасштабні геологічні та геофізичні роботи*.

Оцінку безпеки виконують на всіх стадіях досліджень. Детально вивчено різні типи геологічних утворень: кристалічні породи (Швеція, Фінляндія, Канада), осадові породи (глини різного ступеня літифікації у Франції,

Швейцарії, Бельгії, глинисті вапняки в Канаді для ізоляції НАВ і САВ); соляні породи (Німеччина, WIPP США), вулканічні туфи в зоні аерації (США, проект Yucca Mountain).

Обов'язковим етапом в оцінці безпеки є дослідження і натурні експерименти в підземних експериментальних лабораторіях. Підземні дослідницькі лабораторії для проведення натурних експериментів, зокрема для отримання параметрів елементів геологічного середовища, працюють у різних типах геологічних утворень (див. табл.).

Перші підземні експерименти з ізоляції радіоактивних відходів у геологічному середовищі розпочалися у 1960-х роках в соляних формаціях (США, Німеччина), у 1970-х роках — у кристалічних породах (гранітоїдах) (Швеція), у 1980-х роках — у глинистих (Бельгія) та кристалічних (Швейцарія) формаціях. Потім запрацювали численні лабораторії в різних геологічних формаціях. Мережа підземних експериментальних лабораторій є потужним інструментом реалізації національних програм

Підземні експериментальні лабораторії [5–7, 10]

Тип підземної лабораторії	Тип геологічної формації, глибина розміщення лабораторії				
	Кристалічні	Вулканогенні	Осадові глинисті	Соляні	
				Пластові залягання	Соляні структури
Дослідницько-експериментальна	Mizunami (Японія) 500 м; Åspö (Швеція) 450 м; Grimsel (Швейцарія) 450 м; Whiteshell (Канада) 240–420 м; KURT (Пд. Корея) 90 м; Josef (Чехія) <50 м	Busted Butte (США) 100 м	Mt. Terri (Швейцарія) 400 м; Tournemire (Франція) 350 м; Horonobe (Японія) 350 м; HADES (Boom clay) (Бельгія) 230 м	—	—
Для характеристики та оцінки перспективної ділянки-кандидата для розміщення сховища	ONKALO і Olkiluoto (Фінляндія) 500 м та 100 м	—	Meuse/Haute Marne (Франція) 450–500 м; Konrad (Німеччина) 800–1300 м; Pécs (Mecsek Mountain) (Угорщина) 1000 м	WIPP (США) 660 м	Gorleben (Німеччина) 900 м; Morsleben 386–596 м
Перші дослідницько-експериментальні проекти	Stripa (1976–1992); Climax (1978–1983); Fanay-Augeres (1980–1990); India gold mine; Kamaishi	—	G-tunnel (1979–1990); Tono	Salt Vault; Amelie (1986–1992)	Asse (1977–1995); Avery Island; Hope

і міжнародного співробітництва в цій галузі. Є два основні типи підземних лабораторій: суто експериментальні — на майданчиках, де не планується створення сховища, та пілотні — для детальних досліджень ділянок, потенційно придатних для створення сховища геологічного типу. За більш як півстоліття досліджень у цих лабораторіях отримано важливі результати, які слід адаптувати до наших реалій.

Отже, за роки комплексних досліджень проблеми геологічного сховища РАВ накопичено великий науковий і практичний досвід і досягнуто значного прогресу, розроблено оцінки, сценарії безпеки для всіх типів перспективних геологічних формацій, ґрунтовні концепції глибоких геологічних сховищ, технології вибору перспективних ділянок та майданчиків для геологічних сховищ. Інженерні рішення є значною мірою типовими для різних сховищ. Наявні проектні рішення можуть бути адаптовані для перенесення з одних сховищ на інші, розроблення їх здійснюється після визначення основних геологічних умов і не потребує багато часу.

Основні напрями і завдання геолого-геофізичних досліджень при виборі перспективних ділянок для сховища РАВ геологічного типу

Для обґрунтування вибору перспективних ділянок і майданчиків для геологічного сховища роботи геологічного циклу охоплюють широкий спектр досліджень, зокрема [3, 5, 12–15]:

- *тектонічні* — спрямовані на виявлення та вивчення розломів і тріщинуватості, структури блоків порід, їх відмінностей і особливостей, змін у геологічній історії тощо;
- *геодинамічні* — аналіз минулої і сучасної активності земної кори і мантії, в тому числі сейсмічної, неотектонічної, глибинної магматичної, гідротермальної, дегазаційної та ін.;
- *дистанційні і наземні (завірочні)* — роботи для виявлення геодинамічних зон різного типу, їх активності, зокрема дегазаційної;
- *структурно-петрологічні* — аналіз комплексів кристалічних порід фундаменту;

- *літолого-фаціальні та мінералогічні* — дослідження порід осадового чохла;

- *гідрогеологічні* — вивчення структури водообміну в системі водоносних горизонтів і слабопроникних шарів, швидкості, інтенсивності напрямів руху підземних вод у природних умовах і після створення геологічного сховища РАВ;

- *геохімічні* — вивчення геохімічних параметрів і структури геологічного середовища в природних і порушених умовах, сорбційних властивостей порід щодо різних радіонуклідів тощо;

- *міграційні* — встановлення комплексного впливу структурних, геодинамічних, гідрогеологічних, геохімічних та інших умов і процесів на міграцію радіонуклідів з геологічного сховища РАВ у біосферу.

Оцінка безпеки сховища за комплексними геологічними даними здійснюється після кожного етапу науково-розвідувальних і науково-дослідних робіт.

Стан робіт зі створення сховища геологічного типу в Україні

Починаючи з 1993 р. фахівці НАН України, Державної геологічної служби за підтримки Держкоматому, Держатомрегулювання, Міністерства з надзвичайних ситуацій, Державного агентства України з управління зоною відчуження, УНТЦ, МАГАТЕ, Єврокомісії виконали низку досліджень, зокрема скринінг території України, і оцінили перспективність усіх типів геологічних формацій — соленосних, глинистих та кристалічних, виконано також аналіз відпрацьованого простору залізорудної шахти «Саксагань» (рис. 5).

У результаті доведено, що геологічне сховище РАВ доцільно розташовувати у Чорнобильській зоні відчуження у кристалічних породах, зокрема з огляду на те, що в ній знаходяться основні об'єми РАВ (аварійні чорнобильські відходи, відпрацьоване ядерне паливо реакторів РБМК), тут планується зберігання відпрацьованого палива з АЕС України, а відтак, при транспортуванні очікуються мінімальні ризи-

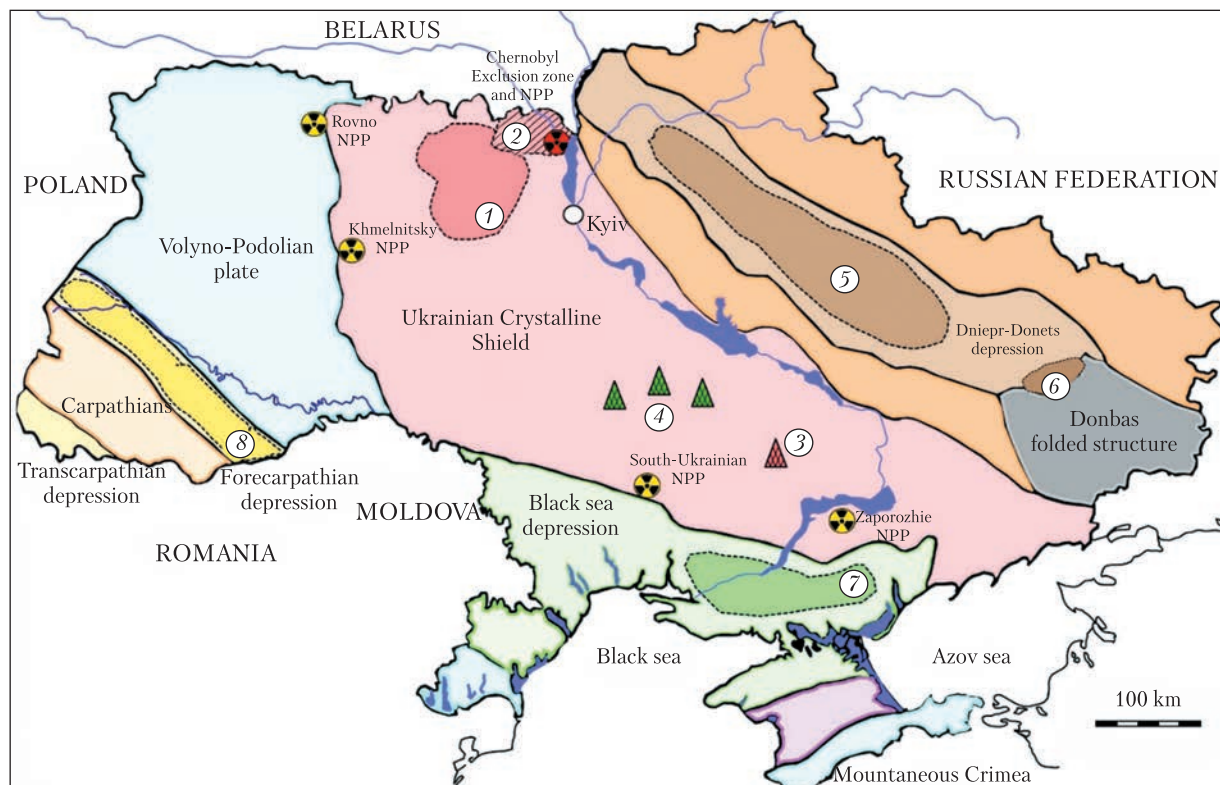


Рис. 5. Узагальнені дані скринінгових досліджень території України з метою вибору перспективних геологічних формацій для сховищ РАВ геологічного типу [12, 15]: 1 – Коростенський плутон, гранітоїди (дослідження 1993–2000 рр., Хрущов, 1991, 2001 [16, 17]); 2 – Чорнобильська зона відчуження, Коростенський плутон, схили Українського щита, гранітоїди, гнейси (з 1997 р. [15]); 3 – залізородна шахта «Саксагань», гранітоїди (1996–1998); 4 – уранові шахти, гранітоїди (1997–2003); 5 – солянокупольні структури Дніпровсько-Донецької западини (1993–2000, Хрущов, 1991, 2001 [16, 17]); 6 – соляні пластові утворення північно-західного Донбасу (1993–2000, Хрущов, 1991, 2001 [16, 17]); 7 – Причорноморська западина, глини (1993–1996, Хрущов, 1991, 2001 [16, 17]); 8 – Передкарпатський прогин, солі, глини (1993–1996)

ки та мінімальна вартість, немає населення, зачисні можливості перекриваючої товщі оптимальні (флювіогляціальні піщано-глинисті відклади створюють додатковий природний бар'єр) тощо. Міжнародний досвід робіт з вибору майданчиків для геологічного сховища свідчить, що за умов оптимального фінансування робіт головною перешкодою у реалізації програм стають не безпекові, технічні, технологічні або методологічні, а соціально-політичні аспекти, тому відсутність населення в зоні є важливим фактором [3, 4].

Переінтерпретація та аналіз значних масивів геофізичної інформації (космо-, аерофото-

знімки, сейсморозвідка, магніторозвідка, гравіметрія, петрофізичні дослідження, гідрогеологічні та інші матеріали масштабів від 1:200 000 до 1:10 000), на основі яких побудовано геологічні моделі, показали, що прийнятні геологічні умови для пошуку майданчика розташування майбутнього сховища РАВ є у південній і південно-західній частинах зони відчуження (рис. 6) [12, 15, 17]. Три перспективні для подальших робіт ділянки – Жовтнева, Вереснянська та Новосілки – визначено за низкою критеріїв [12, 15]. Ділянки розташовані на вододілах за межами заплави основних річкових систем, за межами розломних зон, мають міні-

мальну щільність розвитку тріщинуватості та характеризуються низькими градієнтами геофізичних полів. Попередніми дослідженнями [12–15] виявлено, що гідрогеологічні особливості цих ділянок за умов ретельного вивчення і відбракування окремих геодинамічних зон є сприятливими для глибинної ізоляції РАВ.

З ініціативи та за участю НАН України (академік НАН України В.М. Шестопапов, Ю.О. Шибецький) розроблено нову класифікацію РАВ для України. Згідно з нею ВАВ і САВ, які саме і підлягають ізоляції в підземному сховищі геологічного типу, становлять близько 1–3% за об'ємом усіх РАВ, а за активністю — 99,9%. Впровадження цієї класифікації дасть змогу досягти оптимізації вартості (зменшення у десятки разів) і термінів ізоляції РАВ за умови створення двох сховищ: свердловинного типу глибиною до 4 км для ВАВ і шахтного — для САВ [1, 2, 12].

Зазначеними вище дослідженнями [12–15] створено умови для невідкладного виконання геолого-геофізичних пошуково-розвідувальних і науково-дослідних робіт на обраних ділянках. На сьогодні виконано тільки перший підготовчий етап у визначенні перспективних ділянок за результатами наземних методів. Тепер необхідно виконати детальні геолого-геофізичні польові дослідження, в тому числі буріння та інші підземні роботи.

До проблеми ізоляції токсичних відходів

Із зазначеними проблемами ізоляції від біосфери РАВ та шляхами їх вирішення значною мірою збігаються і проблеми останньої ланки поводження з високотоксичними відходами. В Україні основними джерелами утворення відходів, як токсичних, так і радіоактивних, є

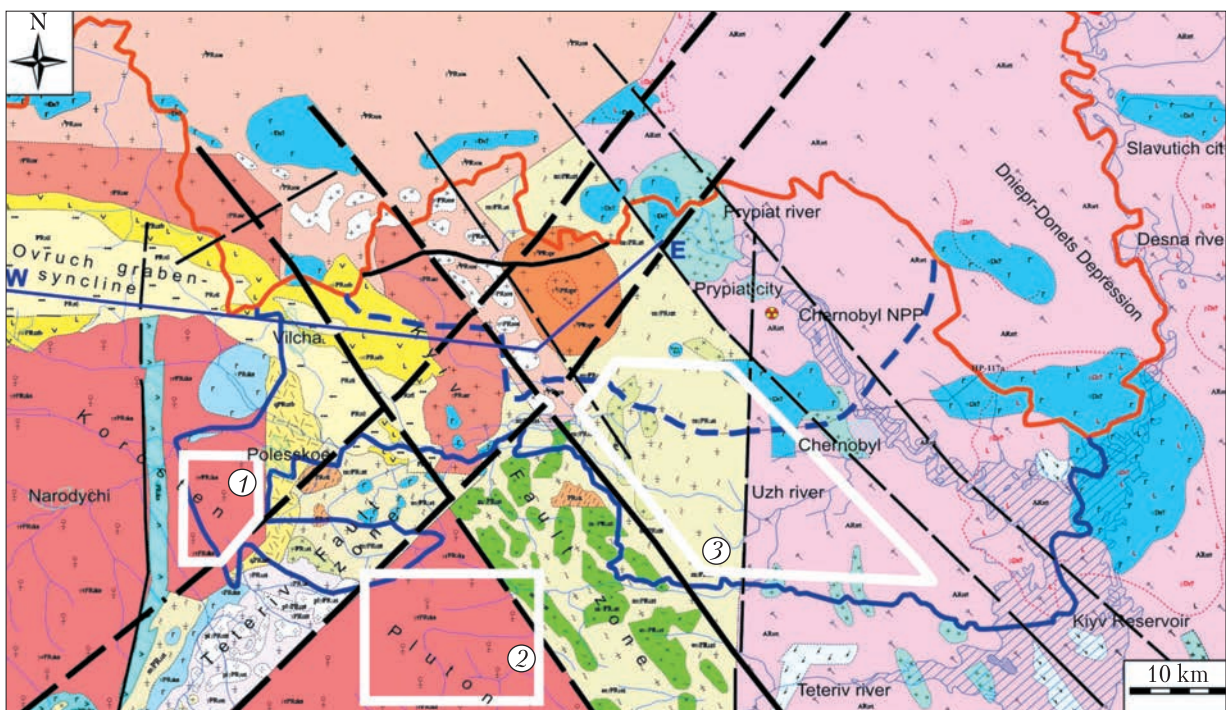


Рис. 6. Схема розташування в Чорнобильській зоні відчуження перспективних ділянок для подальших робіт з визначення майданчиків для глибинного геологічного сховища [12]: 1 — Жовтнева, 2 — Вереснянська, 3 — Новосілки

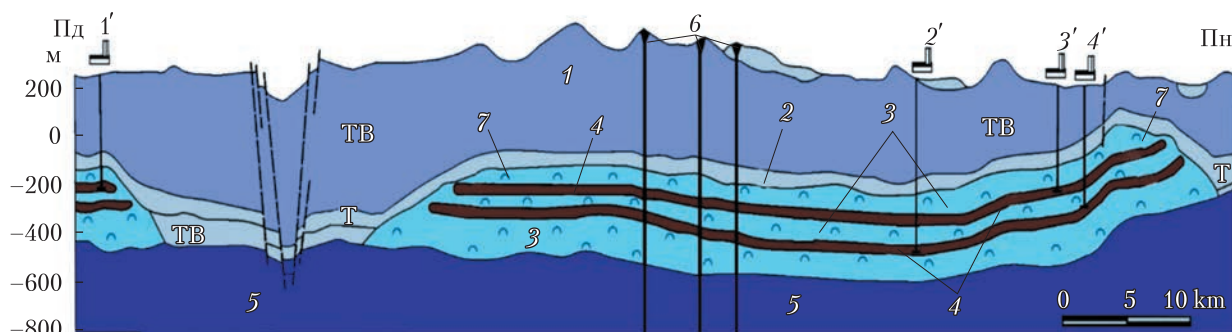
підприємства гірничодобувного, хіміко-металургійного, машинобудівного, паливно-енергетичного, агропромислового та інших комплексів, які тяжіють до регіонів з досить високою густотою населення. Незважаючи на намагання скоротити утворення відходів у промисловості та поглибити ступінь їх знешкодження і переробки, темпи їх накопичення не зменшуються. Відведення нових ділянок для зберігання відходів на поверхні та створення приповерхневих сховищ стає дедалі складнішим. У широкому спектрі небезпечних токсичних відходів є такі, що на нинішньому етапі розвитку технологій не можуть бути перероблені і знешкоджені, а мають бути надійно ізольовані від біосфери у сховищах на період, зіставний за масштабом з геологічним часом. Тому в багатьох країнах науково-технічні заходи спрямовано на підземне зберігання таких відходів (рис. 7, 8), а у деяких (Німеччина та ін.) цього вимагає законодавство.

Першим у Європі підприємством геологічного типу для підземної ізоляції небезпечних не-

радіоактивних токсичних відходів було сховище, розташоване у неробочій частині шахтного поля Герфа-Нойроде калійної шахти Вінтергалл у Герінгені (Німеччина). Відходи розміщують у відпрацьованих виробках на глибині майже 800 м. Загальна потужність соленосної формації сягає 300 м. Вона перекривається 400-метровою товщею нижньотріасових відкладів з глинистими прошарками загальною потужністю 60 м, які відіграють роль екрана між сховищем та біосферою (рис. 7). Сховище функціонує з 1972 р. Його приймальна потужність становить 200 тис. т на рік. Враховуючи щорічний приріст відпрацьованого простору, сховище може приймати відходи ще впродовж 150 років. Переважно у ньому зберігають відходи хімічної та металургійної промисловості, залишки від спалення побутових і токсичних відходів. Вони містять хлорорганічні сполуки, миш'як- та ртутьвмісні речовини, відходи гальваніки, дистиляції та фільтрації, смоли, фарби, хімічні речовини, фармацевтичні препарати, засоби для чищення, пестициди та гербіциди,



Рис. 7. Загальний вигляд сховища Гатторф (фото зверху) та схема геологічної будови соленосного басейну Верра-Фульда і розташування підприємств з ізоляції токсичних відходів [7]: 1 – строкатий пісковик; 2 – шар аргіліту (потужність 100 м) та доломіту (потужність 30 м); 3 – верхня, середня та нижня кам'яна сіль серії Верра; 4 – верхня та нижня калієносна верства; 5 – відклади Ротлігенд; 6 – дайки базальту; 7 – зони підземного карсту. Сховища та шахти: 1' – Нойгоф; 2' – Гатторф; 3' – Герінген; 4' – Вінтергалл



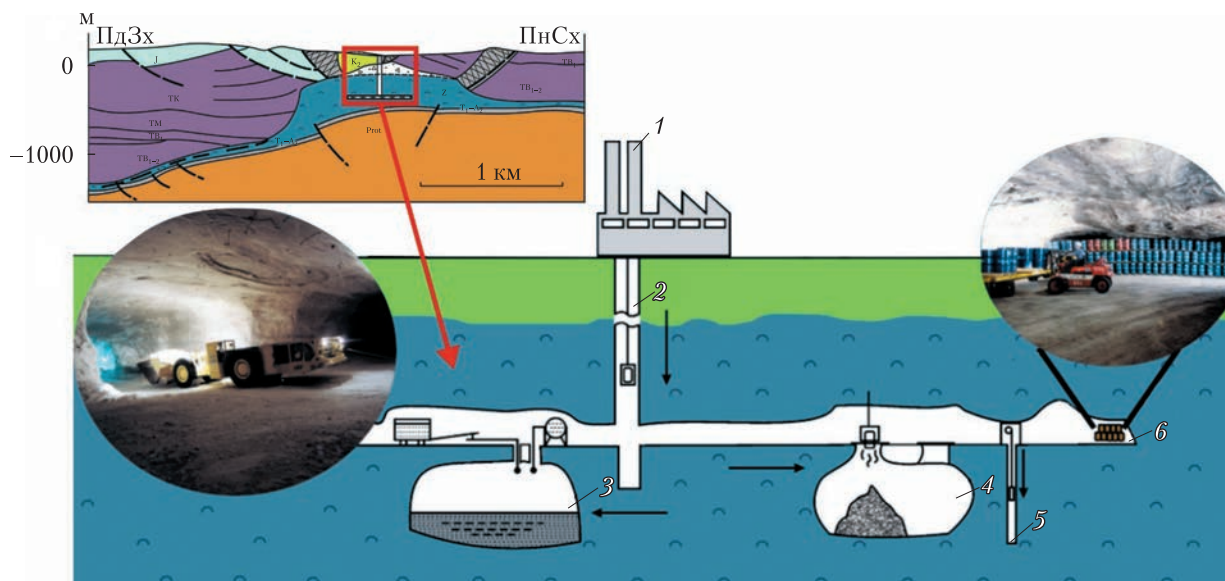


Рис. 8. Схематичний геологічний розріз через соляну антикліналь Аллерталь і схема сховища токсичних і радіоактивних відходів у соленосній формації (Морслебен, Німеччина) [7]: 1 – наземні споруди; 2 – шахта для транспортування відходів; 3 – резервуар для реалізації технології самозатвердіння відходів; 4 – резервуар для зберігання відходів; 5 – обладнована свердловина великого діаметра для зберігання контейнерів (діжок) з відходами; 6 – відпрацьована камера для складування діжок з відходами

залишки фільтрів сміттєспалювальних заводів. Загалом відходи чорної металургії становлять 30 %, хімічної промисловості – 20 %, залишки фільтрів – 40 %, електротехнічне обладнання (трансформатори, конденсатори) – 9 %, інші – 1 %. Сховище заповнюється так, що відходи за потреби можна вилучити для повторної переробки чи використання.

Цилітц – інше підземне підприємство для ізоляції відходів; розміщується у відпрацьованих виробках великої шахти з видобування калійних солей. Приймальна потужність підприємства – 70 тис. т відходів на рік. Зберігають відходи, що містять ціаніди, ртуть, фільтри з алюмінієпереробних підприємств, відпрацьовані трансформатори та акумулятори, забруднені ґрунти та відходи будівництва. Сховища Унтербрайтцбах, Вінтерсгалл, Бернбург, Гатторф та ін., розташовані також у виробках у соляних пластах, використовуються для ізоляції золи від спалення відходів та роботи котельень, фільтрів, що уловлюють пил на спеціальних

газоочисних заводах. У підземні каверни нагнітають або вдувають потоком повітря відходи, перетворені на шлам.

На узбережжі Північного моря у Нижній Саксонії в Німеччині побудовано підприємство для створення методом розмиву каверн у соляних куполах з метою підземного розміщення нерадіоактивних відходів. Соляні структури Бунде, Ємгум та Етцель вивчають як перспективні ділянки. Солянокупольну структуру Ємгум обрано для експериментальних робіт. Тут планується створення 20 резервуарів загальним об'ємом 2,8 млн м³, максимальна глибина залягання – 800–1000 м. Планується зберігання солей токсичних металів та золи. Вміст має бути солідифіковано у монолітні блоки.

Отже, є позитивний досвід складування та зберігання токсичних відходів у підземному просторі в сховищах геологічного типу. Обґрунтування їх безпеки має схожі методологічні підходи зі сховищами РАВ, і ми маємо на працювання з оцінки безпеки таких споруд.

Висновки та пропозиції

У результаті чорнобильської катастрофи та інших чинників Україна опинилася на четвертому місці у світі за накопиченими об'ємами високо- та середньоактивних відходів [3]. Тому проблема захоронення РАВ для нашої країни актуальніша, ніж для більшості країн ЄС. Однак ми значно відстаємо від ряду країн, де небагато АЕС (одна – три) і не було аварій з потраплянням радіонуклідів у біосферу (Фінляндія, Чехія та ін.).

Геолого-геофізичні пошуково-розвідувальні і науково-дослідні роботи з визначення перспективних ділянок планувалися в усіх державних програмах поводження з РАВ в Україні. Для виконання останньої програми (2008–2017 рр.) було створено спеціальний фонд, що формується з внесків АЕС та інших виробників РАВ. Однак кошти цього фонду використовуються не за призначенням [12, 15].

Такий стан суперечить не тільки директивам Євратому, а й етичним нормам, перекладаючи на нащадків тягар поводження з відходами, напрацьованими нашим поколінням, яке отримало блага, а дехто і статки, від використання дешевої атомної енергії.

Для виправлення ситуації Державне агентство з управління зоною відчуження розробляє відповідні заходи, але час спливає, негативні наслідки накопичуються.

Певні обмеження на можливості виконання геолого-геофізичних досліджень для створення сховища геологічного типу може накласти біосферний заповідник, заснування якого у Чорнобильській зоні передбачено Указом Президента України від 26 квітня 2016 р. Тому при визначенні меж заповідника слід враховувати напрацювання з визначення перспективних ділянок для геологічного сховища РАВ.

У НАН України і підприємствах Державної служби геології та надр України (яка значною мірою вже зруйнована) поступово звільняються за віком та у зв'язку зі скороченням штатів фахівці, здатні професійно виконувати необхідний цикл геолого-геофізичних робіт, пов'язаних з геологічним сховищем. Попов-

нення молодими співробітниками майже не відбувається, зокрема через неконкурентність ставок, тому поступово переривається естафета передачі знань та вмій від досвідчених фахівців молодим спеціалістам, що може призвести до унеможливлення виконання робіт з обґрунтування створення глибинного сховища РАВ власними силами.

З часом зростає вартість робіт, застаріває та виходить з ладу устаткування, а це потребуватиме у майбутньому залучення зарубіжного обладнання і фахівців, що спричинить ще більше подорожчання робіт.

Для зменшення негативних наслідків відтермінування початку робіт геологічного циклу вважаємо за доцільне створити *Міжвідомчу науково-методичну раду з геологічних проблем ізоляції радіоактивних та інших небезпечних відходів у надрах*. Метою роботи Ради має стати накопичення знань з геологічних проблем створення сховищ небезпечних відходів, отриманих різними країнами і організаціями, та адаптація цих знань до українських умов; розвиток національних досліджень за окремими напрямками геологічного циклу і в цілому; експертна діяльність у галузі геолого-розвідувальних і науково-дослідних робіт з обґрунтування геологічних проблем створення сховищ РАВ та інших небезпечних відходів; поширення знань геологічного циклу серед науковців і виробничників – потенційних майбутніх виконавців завдань програми щодо сховищ геологічного типу РАВ та інших небезпечних відходів; залучення молоді (молодих спеціалістів і студентів) до цієї проблеми через проведення семінарів, тематичної практики, запрошення на засідання Ради тощо; створення і впровадження у вищих навчальних закладах курсу «Геологічні засади ізоляції небезпечних відходів у надрах».

У роботі Ради планується практикувати наукові та методичні доповіді її членів, запрошених закордонних і вітчизняних фахівців за різними напрямками досліджень і робіт геологічного циклу, з урахуванням їх етапності і вимог щодо багатоступеневої оцінки безпеки майбутніх сховищ чи окремих їх елементів у

системі «сховище РАВ — геологічне середовище — біосфера».

Як показав світовий досвід, роботи з геолого-геофізичного обґрунтування сховищ геологічного типу не вкладаються у тривалість творчого життя одного покоління дослідників. Тому ЄС розпочинає проекти щодо накопичення і передачі знань з цієї проблеми. Створення зазначеної Ради в Україні буде у світовому і європейському тренді, створить умови для на-

копичення цих знань у нас, а також забезпечить ефективну співпрацю зі структурами ЄС і МАГАТЕ у цій галузі.

Автор щиро вдячний за ключовий внесок у підготовку матеріалів доповіді академіку НАН України В.М. Шестопалову і Ю.О. Шибецькому, які вже 25 років плідно працюють над вирішенням проблеми геологічного сховища РАВ в Україні.

REFERENCES

1. Proskura N.I., Shestopalov V.M., Zinkevich L.I., Shybetskyi Yu.A., Alekseieva Z.M., Zhebrovskaia E.I. Radioactive Waste Classification for Long-term Disposal Safety. *Nuclear and Radiation Safety*. 2014. (2): 37.
[Проскура Н.И., Шестопалов В.М., Зинкевич Л.И., Шибецкий Ю.А., Алексеева З.М., Жебровская Е.И. Схема классификации радиоактивных отходов для обеспечения долгосрочной безопасности захоронения. *Ядерная та радіаційна безпека*. 2014. № 2. С. 37–43.]
2. Proskura M.I., Shestopalov V.M., Zinkevich L.I., Shybetskyi Yu.A., Alekseieva Z.M., Zhebrovska K.I. Evaluating the Effectiveness of Implementing New Classification for Radioactive Waste in Ukraine. *Nuclear and Radiation Safety*. 2015. (1): 34.
[Проскура Н.И., Шестопалов В.М., Зинкевич Л.И., Шибецкий Ю.А., Алексеева З.М., Жебровская Е.И. Оценка эффективности внедрения в Украине новой схемы классификации радиоактивных отходов. *Ядерная та радіаційна безпека*. 2015. № 1. С. 34–40.]
3. Shestopalov V., Shybetskyi Iu. Ukraine: Experience of Radioactive Waste (RAW) Management and Contaminated Sites Clean-up. In: Lee W.E., Ojovan M.I., Jantzen Lee C. (eds.). *Radioactive Waste Management and Contaminated Sites Clean-up*. (Cambridge: Woodhead Publishing, 2013). P. 386–414.
4. R&D Activities in Ukraine towards Geological Disposal of Radioactive Waste (presentation). Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform: 7th Exchange Forum. Hotel Córdoba Centre, Córdoba, Spain, October 25–26, 2016. http://www.igdtп.eu/index.php/key-documents/cat_view/4-igdtп-exchange-forums/8-exchange-forums/134-7th-exchange-forum/136-plenary-session-1
5. Faybishenko B., Birkholzer J., Sassani D., Swift P. (eds.). *International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation*. Fifth Worldwide Review. (LBNL, 2016). <https://eesa.lbl.gov/www5/fifth-worldwide-review-report-online/>
6. Witherspoon P.A., Bodvarsson G.S. (eds.). *Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation*. Fourth Worldwide Review. Report. (LBNL, 2006).
7. Shekhunova S. The utilization experience for the subsurface excavations of saliferous formations. *Ukrainian Geologist*. 2007. (1): 44.
[Шехунова С.Б. Досвід використання підземних виробок соленосних формацій. *Геолог України*. 2007. № 1. С. 44–53.]
8. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. (Vienna: IAEA, 2006).
9. Council Directive 2011/70/Euratom of 19 July 2011. Establishing a Community framework for the responsible and safe management of spent fuel and radioactive waste. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32011L0070>
10. Witherspoon P.A., Bodvarsson G.S. (eds.). *Geological Problems in Radioactive Waste Isolation*. Third Worldwide Review. (LBNL, 2001).
11. *Disposal of radioactive waste. Specific Safety Requirements*. (Vienna: IAEA, 2011).
12. Shestopalov V.M., Shybetskyi Iu.A., Proskura M.I., Zinkevich L.I., Temny R.G. Geological Disposal of Radioactive Waste in Ukraine: Background, Status, and Future Steps. In: *International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation*. Fifth Worldwide Review. (LBNL, 2016).

13. Shestopalov V. (ed.). *Chernobyl Disaster and Groundwater*. (Leiden: Balkema, 2002).
14. Shestopalov V. (ed.). *Geological Disposal of Radioactive Waste in Ukraine (Problems and Solutions)*. (Kyiv, 2006).
15. Shestopalov V.M., Shybetskyi Iu.A. Geological disposal of radioactive waste in Ukraine: history, current state, prospects. *Nuclear and Radiation Safety*. 2017. (2): 3.
[Шестопалов В.М., Шибетський Ю.А. Геологическое захоронение радиоактивных отходов в Украине: история, современное состояние, перспективы. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2017. № 2. С. 3.]
16. Khrushchov D., Starodumov V. Programme and Results of Initial Phase of Radioactive Waste Isolation in Geological Formations in Ukraine. In: Witherspoon P.A. (ed.). *Geological Problems in Radioactive Waste Isolation*. Second Worldwide Review. (Berkeley: University of California Press, 1996). P. 241–247.
17. Khrushchov D., Tabachny L. Deep Geological Disposal of Radioactive Waste in Ukraine. In: Witherspoon P.A., Bodvarsson G.S. (eds.). *Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation*. Third Worldwide Review. (Berkeley: University of California Press, 2001). P. 283–290.

S.B. Shekhunova

Institute of Geological Sciences
of National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL PROBLEMS OF DEEP ISOLATION OF RADIOACTIVE WASTE

According to the scientific report at the meeting
of the Presidium of NAS of Ukraine, April 19, 2017

The review on current state and problems on a geological, geophysical investigation for radioactive waste geological repository development in Ukraine is given. It covers the international and national background, progress in promising areas and site selection for radioactive waste geological disposal within crystalline rocks of the Chernobyl Exclusion Zone and in adjacent territories, development of the concept for geological disposal basing on a new classification of radioactive waste. Problem of toxic waste isolation in geological medium is discussed as well. To mitigate lagging in geological and geophysical work on site selection for deep geological facility in Ukraine the foundation of Scientific and Methodological Council on Geological Problems of Deep Geological Isolation of Radioactive and Other Hazardous Wastes in Ukraine is substantiated.

Keywords: radioactive waste, toxic waste, deep geological repository, waste disposal.