

УДК 628.398:622.272.3

**ГЛИБИННЕ ЗАХОРОНЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ У СВЕРДЛОВИНАХ  
DEEP DISPOSAL THE RADIOACTIVE WASTE IN BOREHOLES**

**Л.І. Петренко  
Liliana I. Petrenko**

Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, 55-b O. Honchara Str., Kyiv, Ukraine, 01601 (petrenko.l@nas.gov.ua)

Дослідження можливості захоронення радіоактивних відходів у глибоких свердловинах для використання їх як сховищ проводяться в Сполучених штатах Америки, Кореї, Швеції та інших країнах. З метою підвищення ефективності довгострокової стратегії для геологічного захоронення відпрацьованого ядерного палива та радіоактивних відходів розробляються та вивчаються різні концепції. Наприклад, концепції низькотемпературних та високотемпературних систем, концепція глибокого самозахоронення, 5-кілометрового свердловинного захоронення. Остання концепція для геологічних умов України є найбільш підходящою. У статті виконано порівняння основних концепцій глибокого свердловинного захоронення. Крім того, проаналізовано проблему вибору матеріалу виповнення каністр та наведено орієнтовну вартість бурових робіт, яку взято із літературних джерел. Розглянуто можливі варіанти вибору матеріалу (свинець, мідь, титан) виготовлення контейнерів для радіоактивних відходів. Україна є країною із значними покладами титанових руд. Тому вибір титану як перспективного матеріалу для виготовлення контейнерів для радіоактивних відходів, може значно вплинути на зниження вартості захоронення радіоактивних відходів в Україні, забезпечуючи при цьому безпеку їх захоронення.

*Ключові слова:* РАВ, захоронення, свердловинне сховище, матеріал контейнерів, вартість.

A deep borehole repository is geologic disposal system options currently under study by the U.S., Sweden, South Korea and other countries to support the development of a long-term strategy for geologic disposal of commercial used nuclear fuel and high-level radioactive waste. The basic conceptions of deep borehole disposal are studied in the article. For example, the concept of low-temperature and high-temperature systems, the concept of deep self-burial disposal well, the 5-kilometer borehole disposal. The latest concept for geological conditions of Ukraine is the most suitable. Also analyzed the problem of the material of the canisters and the approximate cost of drilling, which is found in the literature. The possible choices of containers material (lead, copper, titanium) for Ukraine are considered. Ukraine is a country with significant deposits of titanium ore. Therefore, the choice of titanium as perspective material for the manufacture of containers for radioactive waste, can significantly affect the lower cost of disposal of radioactive waste in Ukraine, while ensuring the safety of disposal.

*Keywords:* high-level radioactive waste, disposal, borehole repository, material of the canisters, cost of drilling.

**ВСТУП**

Захоронення радіоактивних відходів (РАВ) у геологічних формаціях визнане Міжнародним агентством з атомної енергії (МАГАТЕ) як можливе і безпечне при дотриманні ряду рекомендацій. Вибір формації, глибини захоронення та інші базові положення вибору майданчика для захоронення РАВ пов'язані як з національними особливостями країни, яка збирається здійснювати захоронення РАВ, так і з радіаційними, фізико-хімічними характеристиками відходів та їх упаковок. Затвердження рішень щодо майданчика РАВ відбуваються на законодавчому рівні. Основними породами, які можуть виступати середовищем для захоронення РАВ, є кристалічні формації, глинисті та соляні відклади. Для України в основному розглядаються магматичні та метаморфічні породи Українського щита (УЩ) як утворення, що є стабільними протягом мільйонів років. Щодо інформації про РАВ, які є та в подальшому утворюють-

ся в Україні, то частково такі дані будуть наведені у цій статті, а більш повна інформація у даному контексті надана, зокрема, у роботах (Проскура и др. 2014; Шестопапов, 2006; Шестопапов, 2008). Вибір майданчика починається з розробки концепції проекту сховища і дослідження регіонів, з послідовною характеристикою потенційних площадок і підтвердженням пріоритетної площадки для захоронення відповідних категорій РАВ.

В останні роки науковці різних країн підвищують увагу спрямовують на розгляд різноманітних концепцій захоронення високо активних відходів (ВАВ) та відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) у глибоких свердловинах як альтернативу захороненню шахтним способом. Технологію свердловинного способу захоронення ВЯП почали розробляти в наприкінці 70-х – на початку 80-х років, тобто дещо пізніше від шахтного способу захоронення. На той час на вивчення шахтного способу та обґрунтування його безпеки вже були ви-

трачені значні зусилля і кошти. Це стало однією з причин того, що і в подальшому свердловинному варіанту приділялося менше уваги (Шестопалов, 2006). Однак останнім часом інтерес до свердловинного типу конструкції геологічного сховища зростає. Однією з причин є більше розповсюдження потенційно придатних майданчиків. Кристалічні породи УЩ є придатними як для шахтного, так і для свердловинного захоронення, зокрема при розгляді концепції 5-кілометрового свердловинного захоронення, що описана у даній статті.

Якщо виконати порівняння шахтного та свердловинного способів захоронення з позиції забезпечення безпеки при захороненні РАВ і в подальшому, то у випадку шахтного способу утримання радіонуклідів досягається шляхом використання важких контейнерів з інертних матеріалів. Природні бар'єри мають другорядне значення. У свердловинному сховищі провідна роль у забезпеченні безпеки належить гідрогеологічним характеристикам геологічної формації та потужній ізоляції здатності верхніх інтервалів свердловини-сховища. Концепції передбачають різні глибини захоронення РАВ – при шахтному захороненні вони становлять 500–1000 м, інтервал глибин при свердловинному захороненні – 2000–4000 м.

Метою даної статті є стислий аналіз міжнародного досвіду у контексті безпечного захоронення РАВ способом глибинного свердловинного захоронення та формування можливих варіантів захоронення РАВ для України. Крім цього, виконати огляд орієнтовної вартості бурових робіт у разі вибору варіанту свердловинного захоронення, а також оглядовий аналіз матеріалу, що може бути використаний для каністр, призначених для зберігання відходів.

#### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Відповідно до міжнародного досвіду поводження з РАВ, геологічні сховища як мультибар'єрна конструкція розраховані на тривалий час і є єдиною технічно прийнятною альтернативою безпечної ізоляції найбільш небезпечних РАВ. Різними авторами розглядаються декілька концепцій захоронення РАВ у сховищах свердловинного типу. Також аналізуються різні глибини таких свердловин – у середньому 4–5 км, є поодинокі свідчення про розгляд варіанту захоронення у свердловинах глибиною 10 км (Forsberg, 2006), і навіть 16 км (Nirex Report N / 108, 2004). У табл. 1 наведено перелік концепцій та стислі коментарі до них.

Об'єднуючим моментом концепцій, що розглядаються, є досягнення і забезпечення безпеки при

захороненні РАВ і після закриття сховища протягом багатьох тисяч років. Тому значна увага приділяється вибору оптимальних бар'єрних якостей геологічного середовища та технології виконання інженерних бар'єрів. При першому наближенні для геологічних умов України найбільш підхожою концепцією виступає концепція 5-кілометрового свердловинного захоронення. Для точнішої відповіді необхідно виконати більш детальний аналіз концепцій.

Дизайн сховищ-свердловин схожий на конструкції геотермальних свердловин за діаметром, глибиною (Brady, 2010). У табл. 2 наведено основні технічні характеристики вертикальних свердловин.

#### ВИБІР МАТЕРІАЛУ ВИПОВНЕННЯ КАНІСТР ДЛЯ ВІДХОДІВ

Згідно із (Про затвердження..., 2012), у розд. III (Вимоги до контейнерів для зберігання високоактивних радіоактивних відходів) не вказано конкретний матеріал для виготовлення контейнерів для РАВ, який відповідав би вимогам безпеки. Однак перелічені основні вимоги для такого матеріалу, а саме: радіаційна стійкість, міцність, корозійна стійкість, стійкість до дезактивуючих розчинів та до впливу навколишнього природного середовища, хімічна стійкість (до вилуговування), морозостійкість, вогнестійкість, вибухобезпечність, фізична та хімічна сумісність один з одним та з радіоактивними відходами; водо- та газонепроникність, дифузійна проникність, біологічна стійкість. Матеріали мають зберігати зазначені властивості протягом строку служби контейнера, а це не менше кількох сотень років. Додаткові вимоги до міцності такі: щоб за всіх можливих зовнішніх впливів (тиск, вигин, удар, пожежа тощо) в умовах експлуатації контейнера не відбувався вихід радіонуклідів за його межі.

Матеріалом для каністр традиційно виступають чисті метали або їх сплави. Андерсон (Boman, 2014) пропонує мідь, зважаючи на її антикорозійні властивості. Результати досліджень показують, що механізми корозії найшвидше відбуватимуться за рахунок реакцій між залізом та водою у свердловинах з утворенням магнетиту і водню (Grundfelt, 2014). Металева мідь може зазнавати корозії в основному за рахунок води без молекулярного кисню (dioxxygen-free water), отримуючи водень (Boman, 2014). Це може мати негативні наслідки для захоронення ядерного палива SKB. Аналіз показав, що швидкість корозії міді у чистій воді є дуже низькою, ймовірно менше за 1 нм/рік.

Свинець є відносно простий та поширений. Його властивості можуть надавати деякий ступінь

Таблиця 1. Концепції захоронення РАВ у глибоких свердловинах  
Table 1. Concepts disposal of radioactive waste in deep borehole

Назва концепції та коментарі	Літературне джерело
<b>Концепція 5–кілометрового свердловинного захоронення</b>	
Свердловину загальною глибиною 5 км умовно поділяють на три зони (знизу вгору): зона захоронення ( <i>disposal zone</i> ) – 2 км, зона ущільнення бентонітовими глинами ( <i>seal zone</i> ) – 1 км та верхня зона ( <i>upper zone</i> ) пройдена в осадових відкладах – 2 км. Зона захоронення може бути пройдена тільки в кристалічних породах. У шведському варіанті захоронення зона ущільнення поділяється на нижню (потужність 1,5 км, бентоніт) та верхню (0,5 км, знизу вгору: бентоніт, асфальт та цемент)	(Joon H. Lee, 2012; Joon H. Lee et al., 2011; Charles, Forsberg, 2006; Kang, 2010; Winterle, Pauline, 2011)
<b>Плавлення <i>in situ</i></b>	
Численні малі металеві контейнери розміщуються на дні свердловини та засипаються уламками гірських порід. З часом тепло від радіоактивного випромінювання переплавляє відходи, контейнери та породи. Відбувається так зване «консервування» відходів на місці	(Nirex Report N / 108, 2004)
<b>Глибоке самозахоронення</b>	
Тепло випромінюючі відходи розміщуються у важкі металеві контейнери та опускаються у свердловини, пройдені у кристалічних породах нижче 2 км. Коли охолодження зупиниться, відбудеться плавлення відходів та оточуючих порід, крізь які під силою гравітації новоутворена маса остаточно розміститься аж до закінчення тепловіддачі	(Nirex Report N / 108, 2004), (Logan, 1976)
<b>Концепція низькотемпературних систем (LT)</b>	
Базується на обмеженні впливу тепла від розпаду елементів шляхом використання для захоронення канистр з відносно низькою концентрацією радіоактивних речовин. Ідея полягає в тому, щоб найменше змінити властивості оточуючих порід, зберегти природну стратифікацію відкладів та гідрогеологічну обстановку таким чином, щоб навіть при руйнуванні деяких канистр не відбувалась міграція РАВ до біосфери	(Åhäll Karl–Inge, 2006; Winterle, Pauline, 2011; Patrick, Brady, 2009; Nirex Report N / 108, 2004)
<b>Концепція високотемпературних систем (HT)</b>	
У системі HT–сховищ розглядається більш щільне розташування відходів при високій концентрації активності РАВ у канистрах, що позначається на необхідності меншої кількості свердловин та зменшення розміру сховища в цілому. Спочатку тепло, що виділятиметься у результаті розпаду радіоактивних елементів, поступово замінить всі рідини та гази у породах ближньої зони захоронення. У міру остигання переплавлених порід довкола відходів сформується суха зона ново– кристалізованих порід, зовнішній периметр якої буде оточений геохімічними та фізичними бар'єрами. Разом ці бар'єри будуть перешкоджати обміну між вмістом канистр з відходами та новоутвореними породами	(Åhäll Karl–Inge, 2006; Nirex Report N /108, 2004)
<b>Захоронення відходів у свердловинах, пройдених під кутом</b>	
Основним її недоліком є недостатній досвід буріння через великий діаметр свердловин. Також є складність завантаження свердловини канистрами з відходами горизонтальним способом, оскільки канистри з відходами не зможуть рухатись під дією власної ваги, як у випадку вертикального завантаження. Перевагою при захороненні такого типу є зниження тиску дроблення, спричиненого збіркою канистр з відходами	(Charles, Forsberg, 2006)
<b>Гібридне (інкапсульоване) свердловинне захоронення</b>	
Ущільнення глибоких свердловин породами, частково переплавленими в результаті тепловиділення від РАВ, або за рахунок використавши електронагрівачів	(Åhäll Karl–Inge, 2006)
<b>Захоронення у колишніх нафтових свердловинах</b>	
Повторне використання виснажених нафтових резервуарів пройдених, глибокими свердловинами	(Nirex Report N /108, 2004)

Таблиця 2. Основні технічні характеристики (для малорозмірних контейнерів) вертикальних свердловин у контексті концепції свердловинного захоронення (Forsberg, 2006; Grundfelt, 2014)

Table 2. The main characteristics of vertical wells in the context of borehole disposal concept

Технічні характеристики вертикальних свердловин	Параметри
Діаметр зовнішній (внутрішній), мм	340 (315–318)
Діаметр свердловин, мм	445
Розміри обшивки: зовнішній діаметр, мм	406
внутрішній діаметр, мм	381
Довжина каністри, м	5
Зовнішній діаметр муфти каністри, мм	360
Ємність	Одна збірка PWR (pressurized water reactors (PWRs), розміри 405,9±21,4 (мм) і масу 666 кг

захисту від радіоактивного випромінювання. Також розглядають сталь, однак вона не має антикорозійних властивостей на необхідний період, але її можна використовувати разом з гірськими породами чи екрануючим матеріалом. Шведи застосовують для облицювання мідь та сталь, що збільшує корозійну стійкість каністр. Альтернативою може бути розміщення каністри у кварцовій тубі. Граніти на 50 % складаються з кварцу, вода в свердловині буде насичена іонами, які будуть знаходитись у рівновазі з кварцом, тобто будуть неагресивні. Міцність кварцу на стиск висока – 1000 МПа у порівнянні з 30 МПа гідростатичного тиску на глибині 3 км.

Крім міді рекомендується титан (Nirex, Report N / 108, 2004). Однак як мідь, так і титан дорогі метали. При звичайній температурі титан покривається захисною пасивуючою плівкою  $TiO_2$  і тому є корозійно стійким в усіх середовищах, окрім лужного (Галецький, Ремезова, 2014). За своєю корозійною стійкістю у морській воді він перевищує всі метали, за винятком благородних. Титан має значну твердість: він у 12 разів твердіший за алюміній, у 4 рази – за мідь та залізо. За питомою міцністю титан не має рівних серед металів; окрім того, ці властивості зберігаються при високих температурах (до 500 °C і навіть до 650 °C при додаванні до титанових сплавів легувальних металів).

Оскільки Україна є країною з найбільшими покладами титанових руд, останні можна розглядати перспективними для виготовлення матеріалу для контейнерів для РАВ, що значно вплине на зниження вартості захоронення РАВ в Україні, забезпечуючи при цьому безпеку захоронення РАВ.

#### ОРІЄНТОВНА ВАРТІСТЬ ВИКОНАННЯ БУРОВИХ РОБІТ

Вартість виконання бурових робіт для свердловинного сховища (чи проходження тунелів та закладення галерей для шахтного сховища) є однією із складових загальної вартості геологічного захоронення.

Підраховано (Brady et al., 2011), що захоронення свердловинного типу безпечно на рівні із захороненням РАВ у геологічних сховищах шахтного типу, але більш «гнучке», менш дорого вартісне, з більшою ймовірністю реалізації. Оцінюється захоронення свердловинного типу в \$158/кг НМ (МТНМ – metric tons of heavy metal – 1000 кг важкого металу) (Brady et al., 2011), що суттєво дешевше, ніж було підраховано для Юка Маунтін і можливо дешевше, ніж обходиться поточне зберігання РАВ. Фактор дорожнечі може обмежити використання такого типу захоронення лише у випадку незначних об'ємів відходів, однак технології буріння таких свердловин стрімко розвиваються зважаючи на необхідність видобування нафти, газу, також вирішення геотермальних потреб. У табл. 3 наведено орієнтовні дані вартості виконання бурових робіт при різних діаметрах свердловин.

Головне при бурінні глибоких свердловин (а це є основним проектом і складною задачею) – вибір комбінації «глибина – діаметр» (Beswick, 2008). Ряд досліджень спрямовано на визначення доцільності буріння на глибині великими діаметрами. Це є технічно складною задачею при розгляді даних концепцій, так як буріння на нафту – газ не вимагає великодіаметрових свердловин (Winterle et al., 2011).

Кількість породи зростає пропорційно до квадрата діаметра. Тому економічна доцільність буріння свердловин знижується із збільшенням розміру свердловин. Але якщо використовувати існуючі технології, то вийде дешевше.

При виборі малих діаметрів свердловин для зони захоронення – 300 та 500 мм – завдання спрощується, оскільки для таких діаметрів є досвід буріння з успішною реалізацією. Бракує досвіду при бурінні свердловин діаметром 750 і 1000 мм (Beswick, 2008). При сприятливих геологічних умовах ще можна розглядати діаметр 750 мм до глибини 4 км. Вважається можливим зекономити кошти від 25 до 50% після набуття досвіду на одному з перших майданчиків (Beswick, 2008).



Таблиця 3. Орієнтовні дані вартості буріння однієї свердловини при різних діаметрах  
Table 3. The estimated value of the data of drilling one well at differen

Глибина, км	Діаметр, мм	Вартість, \$ США	Літературне джерело
4	830	7 млн.	(Harrison, 2000, Winterle, Pauline, 2011)
5	500	57–65 млн. 41–49 млн.	(Beswick 2009)

В Україні щорічно утворюється близько 300 т ВЯП. Крім того, у нас досі не вирішено питання про пряме захоронення ВЯП чи про його переробку. У роботі (Шестопапов и др., 2006) ця проблема проаналізована більш детально, звідки випливає економічна недоцільність розвитку власної інфраструктури для переробки ВЯП. Основною проблемою в оцінці кількості відходів є очікувані об'єми відходів, які виникнуть у ході виконання робіт на майданчику Чорнобильської АЕС та Зони відчуження.

Вартість системи захоронення (свердловинним чи шахтним способом) залежить і від характеру відходів (активності радіонуклідів, форми відходів, їх об'ємів та ін.). А від цього, в свою чергу, і залежать вимоги до забезпечення радіаційної безпеки. Відходи низької та середньої активності із забезпеченням довготривалої безпеки достатньо розміщувати на глибині близько 500 м, що дешевше, ніж для відходів високої активності (глибина становить 4–5 км). У роботах (Проскура и др., 2014; 2015) розглядається розробка нової системи класифікації РАВ із введенням класу дуже низько активних відходів. Застосування нової класифікації дасть змогу зменшити об'єми високоактивних РАВ та збільшити об'єми низько- та середньо активних РАВ і відповідно забезпечити як слідування цілям і критеріям безпечного захоронення, так і економічно ефективним маршрутам захоронення відходів з використанням

оптимальних типів сховищ.

## ВИСНОВКИ

Поводження з ВЯП і РАВ повинно проводитись з належним забезпеченням безпеки для сьогоднішніх і майбутніх поколінь, а також у відповідності до міжнародних зобов'язань. Захоронення високоактивних РАВ у глибоких свердловинах з позиції забезпечення безпеки варте розгляду. Потенційно придатними є багато літологічних формацій. Тому геологічна оточуюча обстановка є вирішальною, як і вибір концепції захоронення. Щодо технічної можливості, то однозначних висновків немає. Геологічна ізоляція РАВ та відпрацьованого палива у глибоких свердловинах великими діаметрами (830 мм) буде вигідніша у разі одночасної кількості РАВ, що будуть захоронені. Скажімо, таке буріння технічно можливе, однак бракує практики та обійдеться не дешево. Взагалі, для переходу від орієнтовних оцінок вартості захоронення РАВ тим чи іншим способом до більш точних необхідно, зокрема, мати детальну інформацію про реальні об'єми відходів, що потребують захоронення. З позиції наявності в Україні значних покладів титану останній може розглядатись як матеріал для контейнерів для відходів.

Автор висловлює подяку за допомогу у написанні статті В.М. Шестопапову та Ю.О. Шибецькому.

## REFERENCES

Galetskiy L., Remezova O., 2007. Titanium ore of Ukraine. Ukrainian Geologist (Geolog Ukrainy). No. 3, pp. 51–61. (In Ukrainian).

Shestopalov V. M. (Ed.), Rudenko Y. F., Sobotovich E. V., Brevitts V. Shybetky Yu, Shyschyts I. Y, Belevtsev R. Y, Mikolaichuk E. A, Shymkiv L. M., Grytsenko N. N, Yakovlev E. A, Proskura N. I., Korchagin P. A., Stetsenko B. D., Boguslavsky A. S., Tokarevskiy V. V., Azimov A. T., Bondarenko Y. I., Zayonc I. O., Tokarevskiy A. V., Kolyabina I. L., Litinskii Yu. B., Bobrowski V. A., Mankin V. I., 2006. Isolation of radioactive waste in the bowels of Ukraine (problems and possible solutions). Kiev: National Academy of Sciences, Research and Engineering Center of radiohydroecology Field of Research. 398 p. (In Russian).

Proskura N.I., Shestopalov V.M., Zinkevych L.I. et al., 2015. Evaluation of the effectiveness of introduction in Ukraine the new classification of radioactive waste. Nuclear and Radiation Safety (Yaderna ta radiatsiyina bezpeka ). No. 1 (65), pp. 34–40. (In Russian).

Галецький Л.С. Титанові руди України / Галецький Л.С., Ремезова О.О. // Геолог України. – 2007. – № 3. – С. 51–61.

Изоляция радиоактивных отходов в недрах Украины (проблемы и возможные решения) / [Шестопапов В. М., Руденко Ю. Ф., Собонович Э. В., Бревитц В., Шибецкий Ю. А., Шишиц И. Ю., Белевцев Р. Я., Миколайчук Е. А., Шимкив Л. М., Гриценко Н. Н., Яковлев Е. А., Проскура Н. И., Корчагин П. А., Стеценко Б. Д., Богуславский А. С., Токаревский В. В., Азимов А. Т., Бондаренко Я. И., Зайонц И. О., Токаревский А. В., Колябина И. Л., Литинский Ю. В., Бобровский В. А., Манькин В. И.] ; под. ред. В. М. Шестопапова. – Киев: НАН Украины, Научно-инженерный центр радиогидроэкологических полигонных исследований, 2006. – 398 с.

Оценка эффективности внедрения в Украине новой схемы классификации радиоактивных отходов / Н. И. Проскура, В. М. Шестопапов, Л. И. Зинкевич и др.] // Ядерна та радіаційна безпека. – 2015. – № 1 (65). – С. 34–40.

Approval Requirements for containers for the storage of high level radioactive waste from reprocessing spent nuclear fuel of VVER-440 reactors. The order dated 04.07.2012 No. 485 of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, available at: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z1290-12> (In Russian).

Shestopalov V.M. (Ed.), 2008. Development of the national strategy and concept of the state programme for radioactive waste management in Ukraine, including strategy of NNEGC Energoatom radioactive waste management. Kyiv, «PRO-MIN», 500 p., (Documents of Tacis Project U4.03/04), (V. 1). (In Russian).

Proskura N.I., Shestopalov V.M., Zinkevych L.I. et al., 2014. Radioactive Waste Classification for Long term Disposal Safety Nuclear and Radiation Safety Nuclear and Radiation Safety (Yaderna ta radiatsiyna bezpeka ). No. 2 (62), pp. 37–43. (In Russian).

Shestopalov V. M., Shybetzky Y. O., 2006. Regarding the possibility of use in Ukraine borehole design type geological repository for radioactive waste. Environment ecology and safety of life activity (Ekolohiya dovkillya ta bezpeka zhyttyediyal'nosti) No. 5, pp. 39–50. (In Ukrainian).

Åhäll Karl-Inge, 2006. Final Deposition of High-level Nuclear Waste in Very Deep Boreholes. MKG Report 2, available at: [http://130.88.20.21/uknuclear/pdfs/MKG\\_Final\\_Deposition\\_of\\_High\\_Level\\_Nuclear\\_Waste\\_in\\_Very\\_Deep\\_Boreholes\\_December\\_2006.pdf](http://130.88.20.21/uknuclear/pdfs/MKG_Final_Deposition_of_High_Level_Nuclear_Waste_in_Very_Deep_Boreholes_December_2006.pdf)

Joon H. L., Bill W., Peter N. et al. 2012. A Prototype Performance Assessment Model for Generic Deep Borehole Repository for High-Level Nuclear Waste. Phoenix, Arizona, USA, available at: <https://www.osti.gov/scitech/biblio/22293443>

Nirex Report N/108A., 2004. Review of the Deep Borehole Disposal Concept for Radioactive Waste, available at: [http://www.mkg.se/uploads/Nirex\\_Report\\_N\\_108\\_-\\_A\\_Review\\_of\\_the\\_Deep\\_Borehole\\_Disposal\\_Concept\\_for\\_Radioactive\\_Waste\\_June\\_2004.pdf](http://www.mkg.se/uploads/Nirex_Report_N_108_-_A_Review_of_the_Deep_Borehole_Disposal_Concept_for_Radioactive_Waste_June_2004.pdf)

Beswick J., 2008. Status of technology for deep borehole disposal. EPS International Contract No NP 01185, available at: [http://www.mkg.se/uploads/DB/NDA\\_Status\\_of\\_Technology\\_for\\_Deep\\_Borehole\\_Disposal\\_April\\_2008.pdf](http://www.mkg.se/uploads/DB/NDA_Status_of_Technology_for_Deep_Borehole_Disposal_April_2008.pdf)

Charles W. Forsberg, Michael J. Driscoll, 2006. Specialized Disposal Sites for Different Reprocessing Plant Wastes. Boston, Massachusetts, available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.558.7132&rep=rep1&type=pdf>

Boman M., Ottosson M., Berger R. et al., 2014. Corrosion of copper in ultrapure water. Ångström Laboratory, available at: <http://www.skb.se/publikation/2718444/R-14-07.pdf>

Patrick V. Brady, Bill W, Geoff A. Freeze et al., 2009. Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550, – 2009. avail-

Про затвердження Вимог до контейнерів для зберігання високоактивних радіоактивних відходів від переробки відпрацьованого ядерного палива реакторів ВВЕР-440. Наказ від 04.07.2012 № 485 Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z1290-12> – Електронний ресурс.

Разработка национальной стратегии и концепции по обращению с радиоактивными отходами в Украине, включая стратегию по обращению с радиоактивными отходами НАЭК «Энергоатом» / под общей ред. В.М. Шестопалова. – Киев: Промінь, 2008. – 500 с. – (Проект Tacis – U4.03/04). – (Т. 1).

Схема классификации радиоактивных отходов для обеспечения долгосрочной безопасности захоронения / Н. И. Проскура, В. М. Шестопалов, Л. И. Зинкевич и др.] // Ядерна та радіаційна безпека. – 2014. – № 2 (62). – С. 37–43.

Шестопалов В.М. Щодо можливості використання в Україні свердловинного типу конструкції геологічного сховища радіоактивних відходів / Шестопалов В.М., Шибетський Ю.О. // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2006. – № 5. – С. 39–50.

Åhäll Karl-Inge. Final Deposition of High-level Nuclear Waste in Very Deep Boreholes / Karl-Inge Åhäll // MKG Report 2. – 2006. – Електронний ресурс. Режим доступу: [http://130.88.20.21/uknuclear/pdfs/MKG\\_Final\\_Deposition\\_of\\_High\\_Level\\_Nuclear\\_Waste\\_in\\_Very\\_Deep\\_Boreholes\\_December\\_2006.pdf](http://130.88.20.21/uknuclear/pdfs/MKG_Final_Deposition_of_High_Level_Nuclear_Waste_in_Very_Deep_Boreholes_December_2006.pdf)

A Prototype Performance Assessment Model for Generic Deep Borehole Repository for High-Level Nuclear Waste / [H. L. Joon, W. Bill, N. Peter et al. // Phoenix, Arizona, USA. – 2012. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://www.osti.gov/scitech/biblio/22293443>

A Review of the Deep Borehole Disposal Concept for Radioactive Waste // Nirex Report N / 108. – 2004. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.mkg.se/uploads/Nirex\\_Report\\_N\\_108\\_-\\_A\\_Review\\_of\\_the\\_Deep\\_Borehole\\_Disposal\\_Concept\\_for\\_Radioactive\\_Waste\\_June\\_2004.pdf](http://www.mkg.se/uploads/Nirex_Report_N_108_-_A_Review_of_the_Deep_Borehole_Disposal_Concept_for_Radioactive_Waste_June_2004.pdf)

Beswick J. Status of technology for deep borehole disposal / John Beswick. // EPS International Contract No NP 01185. – 2008. – Електронний ресурс. – Режим доступу: [http://www.mkg.se/uploads/DB/NDA\\_Status\\_of\\_Technology\\_for\\_Deep\\_Borehole\\_Disposal\\_April\\_2008.pdf](http://www.mkg.se/uploads/DB/NDA_Status_of_Technology_for_Deep_Borehole_Disposal_April_2008.pdf)

Charles W. Forsberg. Specialized Disposal Sites for Different Reprocessing Plant Wastes / Charles W. Forsberg, Michael J. Driscoll // Boston, Massachusetts. – 2006. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.558.7132&rep=rep1&type=pdf>

Corrosion of copper in ultrapure water / [M. Boman, M. Ottosson, R. Berger et al.] // Ångström Laboratory. – 2014. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <http://www.skb.se/publikation/2718444/R-14-07.pdf>

Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste / Patrick V. Brady, Bill W, Geoff A. Freeze et al.] // Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550. – 2009. – Електронний ре-

able at: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2009/094401.pdf>

Bonano E., Cunnane J., Cotton T. et al., 2014. Evaluation of Options for Permanent Geologic Disposal of Spent Nuclear Fuel and High Level Radioactive Waste in Support of a Comprehensive National Nuclear Fuel Cycle Strategy Vol. 2 SAND 2014-0187P (Vol. I). available at: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/OEDispOptionsR1Volume2Appendices%20Apr15\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/OEDispOptionsR1Volume2Appendices%20Apr15_0.pdf)

Bertil G., Crawford J., Kemakta Konsult., 2014. The deep borehole concept A conceptual model for gas generation and gas transport, available at: <http://www.skb.com/publication/2720080/P-13-11.pdf>

Kang J., 2010. An Initial Exploration of the Potential for Deep Borehole Disposal of Nuclear Wastes in South Korea. Visiting Scholar, SAIS-JHU, and Associate, Nautilus Institute-ARI, Seoul, available at: [http://nautilus.org/wp-content/uploads/2011/12/JMK\\_DBD\\_in\\_ROK\\_Final\\_with\\_Exec\\_Summ\\_12-14-101.pdf](http://nautilus.org/wp-content/uploads/2011/12/JMK_DBD_in_ROK_Final_with_Exec_Summ_12-14-101.pdf)

Kemakta Bertil G., 2013. Radiological consequences of accidents during disposal of spent nuclear fuel in a deep borehole. SKB P-13-13, available at: <http://www.skb.com/publication/2641868/P-13-13.pdf>

Logan S. E., 1974. Deep self-burial of radioactive wastes by rock melting capsules. Nuclear Technology, Vol. 21. Pp. 111-117, available at: [http://www.ans.org/pubs/journals/nt/a\\_31367](http://www.ans.org/pubs/journals/nt/a_31367)

Patrick V. Brady B., Michael J. Driscoll, 2010. Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: Report from a Sandia-MIT Workshop on March 15, 2010 in Washington, available at: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2012/127789.pdf>

Brady B., Swift W., Patrick V., 2011. Pilot Testing Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: October 26, 2011 Albuquerque, NM Workshop Report. Arnold Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, available at: [http://www.mkg.se/uploads/Pilot\\_Testing\\_Deep\\_Borehole\\_Disposal\\_of\\_Nuclear\\_Waste-October\\_26\\_2011\\_Albuquerque\\_NM\\_Workshop\\_Report.pdf](http://www.mkg.se/uploads/Pilot_Testing_Deep_Borehole_Disposal_of_Nuclear_Waste-October_26_2011_Albuquerque_NM_Workshop_Report.pdf)

Joon H. Lee, Swift, Bill W., Patrick V. Brady B., 2011. Preliminary Performance Assessment for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, available at: <http://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/SAND2011-2370C.pdf>

R-00-35., 2010. Very deep borehole Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Sweden, available at: [http://www.mkg.se/uploads/DB/SKB\\_R-00-35\\_Very\\_deep\\_borehole\\_Deutags\\_opinion.pdf](http://www.mkg.se/uploads/DB/SKB_R-00-35_Very_deep_borehole_Deutags_opinion.pdf)

Sapiie B. M. J. Driscoll, K. G. Jensen, 2010. Regional Examples of Geological Settings for Nuclear Waste Disposal

сурс. – Режим доступу: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2009/094401.pdf>

Evaluation of Options for Permanent Geologic Disposal of Spent Nuclear Fuel and HighLevel Radioactive Waste in Support of a Comprehensive National Nuclear Fuel Cycle Strategy. Vol. 1 / E. Bonano, J. Cunnane, T. Cotton et al.]// SAND 2014-0187P (Vol. 2). – 2014. – Электронний ресурс. – Режим доступу: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/OEDispOptionsR1Volume2Appendices%20Apr15\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/OEDispOptionsR1Volume2Appendices%20Apr15_0.pdf)

Grundfelt Bertil. The deep borehole concept A conceptual model for gas generation and gas transport / Bertil Grundfelt, James Crawford, Kemakta Konsult. – 2014. – Электронний ресурс. – Режим доступу: <http://www.skb.com/publication/2720080/P-13-11.pdf>

Kang Jungmin. An Initial Exploration of the Potential for Deep Borehole Disposal of Nuclear Wastes in South Korea / Jungmin Kang // Visiting Scholar, SAIS-JHU, and Associate, Nautilus Institute-ARI, Seoul. – 2010. – Электронний ресурс. – Режим доступу: [http://nautilus.org/wp-content/uploads/2011/12/JMK\\_DBD\\_in\\_ROK\\_Final\\_with\\_Exec\\_Summ\\_12-14-101.pdf](http://nautilus.org/wp-content/uploads/2011/12/JMK_DBD_in_ROK_Final_with_Exec_Summ_12-14-101.pdf)

Kemakta Bertil Grundfelt. Radiological consequences of accidents during disposal of spent nuclear fuel in a deep borehole / Bertil Grundfelt Kemakta // SKB P-13-13. – 2013. – Электронний ресурс. – Режим доступу: <http://www.skb.com/publication/2641868/P-13-13.pdf>

Logan S. E. Deep self-burial of radioactive wastes by rock melting capsules / Logan, S. E. // Nuclear Technology. – Vol. 21. – Pp. 111-117 – 1974. – Электронний ресурс. – Режим доступу: [http://www.ans.org/pubs/journals/nt/a\\_31367](http://www.ans.org/pubs/journals/nt/a_31367)

Patrick V. Brady. Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: Report from a Sandia-MIT Workshop on March 15, 2010 in Washington / Patrick V. Brady, Michael J. Driscoll. – 2010. – Электронний ресурс. – Режим доступу: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2012/127789.pdf>

Pilot Testing Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: October 26, 2011 Albuquerque, NM Workshop Report / Brady, B. W, Swift, Patrick V // Arnold Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico. – 2011. – Электронний ресурс. – Режим доступу: [http://www.mkg.se/uploads/Pilot\\_Testing\\_Deep\\_Borehole\\_Disposal\\_of\\_Nuclear\\_Waste-October\\_26\\_2011\\_Albuquerque\\_NM\\_Workshop\\_Report.pdf](http://www.mkg.se/uploads/Pilot_Testing_Deep_Borehole_Disposal_of_Nuclear_Waste-October_26_2011_Albuquerque_NM_Workshop_Report.pdf)

Preliminary Performance Assessment for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste / Joon H. Lee, Swift, Bill W., Patrick V. Brady // Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA. – 2011. – Электронний ресурс. – Режим доступу: <http://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/SAND2011-2370C.pdf>

R-00-35: Very deep borehole Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability // Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Sweden. – 2010. – Электронний ресурс. – Режим доступу: [http://www.mkg.se/uploads/DB/SKB\\_R-00-35\\_Very\\_deep\\_borehole\\_Deutags\\_opinion.pdf](http://www.mkg.se/uploads/DB/SKB_R-00-35_Very_deep_borehole_Deutags_opinion.pdf)

Sapiie B. Regional Examples of Geological Settings for Nuclear Waste Disposal in Deep Boreholes / B. Sapiie, M. J.

in Deep Boreholes. MIT-NFC-TR-113, available at: [http://www.mkg.se/uploads/DB/DeepBorehole2\\_MIT-NFC-TR-113-1.pdf](http://www.mkg.se/uploads/DB/DeepBorehole2_MIT-NFC-TR-113-1.pdf)

TR 01-17., 2001. Project JADE: Comparison of repository systems. Executive summary of results. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Sweden, available at: <http://www.skb.com/publication/19246/>

Winterle J., R. Pauline, G. Ofoegbu, 2011. Regulatory perspectives on deep borehole disposal concepts. Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses San Antonio, Texas, available at: <https://www.nrc.gov/docs/ML1114/ML111470719.pdf>

Driscoll, K. G. Jensen // MIT-NFC-TR-113. – 2010. – Электронный ресурс. – Режим доступа: [http://www.mkg.se/uploads/DB/DeepBorehole2\\_MIT-NFC-TR-113-1.pdf](http://www.mkg.se/uploads/DB/DeepBorehole2_MIT-NFC-TR-113-1.pdf)

TR 01-17: Project JADE: Comparison of repository systems. Executive summary of results // Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Sweden. – 2001. – Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://www.skb.com/publication/19246/>

Winterle J. Regulatory perspectives on deep borehole disposal concepts / J. Winterle, R. Pauline, G. Ofoegbu // Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses San Antonio, Texas. – 2011. – Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://www.nrc.gov/docs/ML1114/ML111470719.pdf>

Manuscript revised 28 December 2015;  
revision accepted 22 January 2016

Інститут геологічних наук НАН України,  
Київ, Україна

**Л.И. Петренко**

**ГЛУБИННОЕ ЗАХОРОНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ У СКВАЖИНАХ**

Исследование глубоких скважин для использования их в качестве хранилищ для высоко активных отходов проводится в США, Корею, Швеции и других странах с целью разработки долгосрочной стратегии для геологического захоронения отработанного ядерного топлива и радиоактивных отходов. В статье рассмотрены основные концепции глубинного скважинного захоронения. Например, концепции низкотемпературных и высокотемпературных систем, концепция глубокого самозахоронения, 5-километрового скважинного захоронения. Последняя концепция для геологических условий Украины является наиболее подходящей. Кроме того проанализирована проблема выбора материала исполнения канистр и приведена ориентировочная стоимость буровых работ, взята из литературных источников. Рассмотрены возможные варианты выбора материала (свинец, медь, титан) для контейнеров. Украина является страной со значительными залежами титановых руд. Поэтому выбор титана как перспективного материала для изготовления контейнеров для радиоактивных отходов, может значительно повлиять на снижение стоимости захоронения радиоактивных отходов в Украине, обеспечивая при этом безопасность захоронения радиоактивных отходов.

*Ключевые слова:* радиоактивные отходы, захоронение, скважинное хранилище, материала исполнения канистр, стоимость буровых работ.