

**В. Шестопалов, Ю. Шибецький, Л. Кузів**

*Інститут геологічних наук НАН України*

## **ПЕТРОФІЗИЧНІ КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ПРИДАТНОСТІ КРИСТАЛІЧНИХ ПОРІД ДЛЯ ГЕОЛОГІЧНОГО ЗАХОРОНЕННЯ РАВ**

*Об'єктом дослідження є петротипи гранітоїдів Українського щита та їх петрофізичні характеристики. Мета роботи — розробка методики оцінки придатності петротипів гранітоїдів для спорудження геологічного сховища радіоактивних відходів за їх петрофізичними характеристиками. Основним методом є аналіз і узагальнення літературних джерел стосовно підходів, що використовуються для обґрунтування довготривалої радіаційної безпеки систем геологічного захоронення радіоактивних відходів. Показано, що на основі аналізу лише петрофізичних характеристик гранітоїдів неможливо зробити обґрунтований (з позицій безпеки) вибір петротипу для спорудження геологічного сховища. Розроблено рекомендації щодо критеріїв і методології оцінки ступеню відносної придатності петротипу.*

### **Вступ**

Проблема захоронення радіоактивних відходів (РАВ) є актуальною для України. Це пов'язано з намірами подальшого використання ядерної енергії (що означає і подальше накопичення РАВ), а також з нагальними потребами у захороненні значних обсягів РАВ, які утворилися внаслідок використання ядерних технологій. Для України ця проблема вкрай загострилася після Чорнобильської катастрофи [1].

На поточний момент вважається, що єдиним технічно здійсненим варіантом захоронення найбільш небезпечних РАВ — відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), високоактивних (ВАВ) і довгоіснуючих радіоактивних відходів (ДРВ) — який є етичним по відношенню до прийдешніх поколінь і відповідає вимогам захисту людини і довкілля, є захоронення зазначених відходів в мультибар'єрних системах захоронення — геологічних сховищах [2].

Метою роботи є визначення методології встановлення петрофізичних критеріїв оцінки придатності (і вибору) петротипів гранітоїдів для будівництва геологічного сховища радіоактивних відходів. Основою для роботи виступають загальні рекомендації і вимоги міжнародних (зокрема МАГАТЕ) і національних нормативних документів щодо виконання аналізу безпеки геологічних сховищ радіоактивних відходів, метод багатокритеріального аналізу, а також існуючі дані щодо петрофізичних та деяких інших властивостей гранітоїдів України докембрійського віку. Робота спрямована на коректне застосування петрофізичних характеристик гранітоїдних формацій при виконанні аналізу безпеки геологічного сховища радіоактивних відходів.

### **1. Оцінка придатності майданчика і його вибір з позицій безпеки геологічного захоронення РАВ**

До складу інженерних бар'єрів геологічної системи захоронення РАВ входять: 1) форма (або матриця) відходів; 2) контейнер; 3) бентонітовий буфер; 4) матеріали-заповнювачі гірничих виробок. Природні бар'єри системи геологічного захоронення РАВ включають: 1) породи ближньої зони, що безпосередньо вміщують систему інженерних бар'єрів і зазнають впливу процесів, що відбуваються в цій системі; 2) породи дальньої зони, де відбувається міграція радіонуклідів; 3) ландшафти і біосферу, що визначають особливості перерозподілу радіонуклідів в ландшафтах і харчових ланцюжках, тобто — можливі дози для населення.

Система захоронення вважається безпечною, якщо буде доведено, що в процесі її еволюції протягом всього бажаного терміну ізоляції дози опромінення і радіологічні ризики для населення не перевищать встановлені законодавством норми. Бажаний період ізоляції ВЯП, ВАВ і ДРВ складає не менше від кількох сотень тисяч років [4]. Тому,

радіаційна безпека населення та довкілля не може бути гарантованою одними лише інженерними спорудами. Сховище РАВ необхідно розмістити в такому геологічному оточенні, яке зберігає свої ізолюючі властивості тривалий час. Одним з перспективних типів вміщуючих порід для розміщення багатобар'єрних систем геологічного захоронення РАВ є саме гранітоїдні формації [4].

Методологія вибору геологічного оточення (майданчика) для розміщення системи геологічного захоронення РАВ, що спрямована на обґрунтування і доказ безпеки системи, будується на основі системи термінів: *система захоронення, функції безпеки (ізолювальна і утримувальна), вимога, перевага, показник геологічної придатності, критерій вибору*. Їх визначення наводяться в [5, 6].

Ключовим моментом вибору майданчика є встановлення критеріїв вибору. Процедура встановлення критеріїв базується на вище означеній системі термінів. Вона є ітеративною і повторюється на кожній зі стадій процесу вибору. Процедура встановлення описана в [7].

Для того щоб використати будь-яку характеристику (в тому чисті: петрофізичну або фізико-хімічну) геологічного оточення в якості показника геологічної придатності і визначити критерій вибору майданчика за цією характеристикою необхідно:

- визначити, чи впливає зазначена характеристика на функції компонентів сховища;
- встановити вимоги до майданчика і його переваги, а також визначити, чи може використовуватися характеристика для доказу того, що вимога або перевага задовольняються;
- визначити чисельне значення характеристики, при якому буде задовольнятися вимога або перевага, тобто встановити критерій вибору для характеристики.

Останнє можна зробити в рамках виконання оцінок безпеки. Оцінки безпеки передбачають розрахунок доз опромінення або радіологічних ризиків для моделі міграції радіонуклідів із системи захоронення для певних сценаріїв її еволюції. Очевидно, що створення зазначеної моделі вимагає значних витрат часу і ресурсів і може бути зробленим на основі комплексного дослідження майданчика, розробки проекту сховища, проведення ряду натурних експериментів і дослідження природних аналогів системи захоронення.

## **2. Вимоги міжнародних і національних нормативних документів до характеристик геологічного середовища**

Загальні вимоги до геологічного середовища, придатного для розміщення геологічного сховища РАВ, сформульовані в ряді міжнародних і національних нормативних документів [6, 8–10]. Як правило, вимоги формулюються тут в дуже загальному вигляді, що виключає їх безпосереднє використання для встановлення показників придатності або для оцінки того, чи може певна характеристика геологічного середовища бути використаною в якості зазначеного показника.

Для України важливим є досвід виконання шведської програми створення геологічного сховища. Шведські майданчики розміщуються в схожій геологічній обстановці (Балтійський щит), що дозволяє (з урахуванням певних особливостей) практично повністю скористатися відповідними розробками стосовно визначення вимог до геологічного середовища і його переваг. Відповідно до [5], вимоги до геологічного середовища, придатного для розміщення геологічного сховища, в Швеції визначаються наступним чином:

- майданчик для розміщення сховища РАВ має бути позбавленим мінеральних ресурсів, майбутній видобуток яких виправдовував би виконання гірничих робіт до глибин кілька сотень метрів;
- сховище має розташовуватися поза зонами регіональних пластичних деформацій, якщо буде доведено, що їх властивості відрізняються від властивостей вміщуючих порід;
- тунелі і індивідуальні свердловини для встановлення контейнерів з РАВ не повинні перетинатися або розміщуватися в безпосередній близькості від локальних зон тріщинуватості;

- міцність порід, геометрія зон тріщинуватості та початкове напруження гірничого масиву не повинні негативно впливати на стабільність тунелів;
- підземні води на глибині розміщення сховища не повинні містити розчиненого кисню; свідченнями відсутності кисню є негативні значення Eh, присутність заліза в стані окислення  $Fe^{2+}$  або наявність сульфідів;
- загальна солоність підземних вод не повинна перевищувати 100 г/л на глибині розміщення сховища (ця вимога є надлишковою для майданчиків Українського щита, оскільки такі значення загальної мінералізації підземних вод є характерними для глибин, що перевищують кілька кілометрів).

Додатково до перерахованих вимог виділяються також і переваги, або умови, які мають прийматися до уваги при розташуванні геологічного сховища, але не є критичними для безпеки сховища:

- сховище бажано розмістити в широко розповсюдженому типі порід, оскільки важко передбачити, яким чином різні породи використовуватимуться в майбутньому;
- бажано, щоб міцність і початкове напруження гірничого масиву попадали в діапазон середніх значень для вибраного регіону;
- бажано, щоб коефіцієнт теплового розширення порід був середнім для даного регіону, а його просторові варіації були мало градієнтними для типів порід майданчика;
- теплопровідність порід має перевищувати 2,5 Вт/(м·°К); слід уникати районів з підвищеним геотермальним градієнтом; температура порід на глибині розміщення сховища не повинна перевищувати 25° С;
- бажано, щоб коефіцієнт фільтрації основної частини гірничого масиву не перевищував 10–8 м/с, а водопровідність зон тріщинуватості не перевищувала 10–5 м<sup>2</sup>/с.; наявність зон тріщинуватості не повинна ускладнювати гірничі роботи;
- гідравлічний градієнт на глибині розміщення сховища не повинен перевищувати 1%, а швидкість фільтрації для основної частини порід масиву (для масштабу контейнера) була не вищою від 0,01 м/рік;
- поверхнева інфраструктура геологічного сховища не повинна розміщуватися на територіях з великою біологічною різноманітністю, заповідних територіях, в районах із рудним потенціалом і значними ресурсами водопостачання, а також — із значним сільськогосподарським потенціалом.

Загальні вимоги до кристалічних формацій Чорнобильської зони відчуження з урахуванням особливостей РАВ України і можливих типів конструкції геологічного сховища, а також підходи до встановлення критеріїв вибору майданчика, розглядалися нами попередньо в [7, 11].

Підсумовуючи вищевикладене, слід підкреслити, що при встановленні вимог до характеристик геологічного середовища для розміщення системи захоронення основна увага приділяється тим властивостям середовища, які описують умови мобілізації, перенесення і процеси затримки радіонуклідів, шляхи міграції радіонуклідів, рух підземних вод. Значна увага приділяється також механічним і тепловим властивостям середовища, які визначають стабільність масиву порід в часі. Важливою вимогою є також відсутність мінеральних ресурсів, що має мінімізувати ризики ненавмисного порушення людиною системи бар'єрів сховища в майбутньому.

### **3. Аналіз потенційного зв'язку характеристик порід та їх здатності щодо забезпечення безпеки геологічного сховища**

#### **3.1. Вихідні дані і використаний підхід**

В роботі [12], яка присвячена комплексному петрофізичному аналізу гранітоїдів Українського щита, основним об'єктом дослідження виступає петротип. Петротип — це геологічно однорідне утворення, яке формувалося в певних фізико-хімічних і термодинамічних умовах і характеризується схожим складом, структурно-текстурними

особливостями і фізичними параметрами. Стосовно гранітоїдних утворень петротип може відповідати провідному фаціальному різновиду порід, а іноді — і масиву порід.

Петротипи виділяються за: мінералогічним складом; хімічним складом; структурними і текстурними характеристиками; тектонічними і геодинамічними характеристиками масивів.

В зазначеній роботі на великому аналітичному матеріалі виконано також петрофізичну класифікацію гранітоїдів України за щільнісними, ємнісними, пружними, магнітними, термічними і радіоактивними характеристиками.

Постає питання — наскільки ефективно дані про петрофізичні характеристики гранітоїдів, а також інші характеристики, за якими в [12] виділяються петротипи, можуть бути використаними для визначення показників геологічної придатності, тобто для оцінки придатності даного петротипу для розміщення геологічного сховища? В свою чергу відповідь на зазначене питання передбачає і відповіді на наступні питання. Чи впливає петрофізична (або інша) характеристика петротипу на функції безпеки компонентів сховища? Наскільки великий ступінь впливу конкретної характеристики на безпеку сховища? Відповіді на ці питання є важливими для оцінки петротипів гранітоїдів з точки зору придатності для будівництва геологічного сховища.

Ключем для відповіді на зазначені питання є аналіз процесів, що є важливими для безпеки сховища і відбуваються в компонентах системи захоронення, а також характеристик компонентів системи, які впливають на перебіг цих процесів.

Вивчення петрофізичних характеристик вміщуючих порід (петротипів) є однією із обов'язкових складових дослідження майданчиків для вибору місця розташування геологічного сховища [13–15]. Головним чином, петрофізичні характеристики порід використовуються для інтерпретації геофізичних даних з метою попереднього виділення різних типів порід. Як правило, це такі характеристики, як магнітна сприйнятність, залишкова намагніченість, електричний опір, щільність, швидкості розповсюдження поздовжніх і поперечних хвиль.

Лише деякі з петрофізичних характеристик використовуються як показники геологічної придатності [5], тобто можуть використовуватися для безпосередньої оцінки відповідності петротипу вимогам безпеки. Тому далі використовуватимуться два різновиди критеріїв:

*критерій вибору* — якісна характеристика (геологічна, гідрогеологічна, тощо) або чисельне значення показника геологічної придатності, за яким на стадії вибору майданчика приймається рішення про відповідність території, що розглядається, певним вимогам або перевагам;

*критерій оцінки* — чисельне значення характеристики (геологічної, гідрогеологічної, петрофізичної тощо) геологічного середовища, яка не є показником геологічної придатності, але може опосередковано впливати на функції безпеки компонентів системи геологічного захоронення і використовується для ранжювання геологічних умов за відносною їх здатністю забезпечити безпеку геологічного сховища.

### **3.2. Геологічні характеристики петротипу**

*Мінералогічний і хімічний склад петротипу, його структурні і текстурні характеристики.* Значимість петротипу для розміщення геологічного сховища визначається головним чином його термічними і механічними характеристиками (теплопровідність, міцність при стисканні, пластичність, і т.і.). Зазначені властивості визначають особливості процесу спорудження сховища і ступінь його термомеханічного впливу на ізолюючі властивості вміщуючих порід, тобто — природних бар'єрів системи захоронення. Непряму інформацію про міцність порід можуть дати їх структурно-текстурні характеристики, мінеральний склад, метаморфічні зміни або вивітрілість.

Відмінності в міцності, структурі і геологічній історії порід визначають і відмінності в характерних системах їх тріщинуватості. В загальному випадку, границі між типами порід є потенціальними зонами послаблення міцності, оскільки різні механічні властивості петротипів визначають їх різну здатність до пружних деформацій. З точки зору безпеки геологічного сховища, а також з позицій зниження невизначеностей оцінок безпеки

переваги при виборі майданчика мають віддаватися таким, які складені мінімальною кількістю петротипів.

Мінералогічний склад петротипу впливає на гідрохімічний склад підземних вод. Кисень із поверхневих вод, які фільтруються через породи, витрачається на окислення мінералів. Мінеральний склад порід за рахунок протікання буферних реакцій контролює також рН, Eh і інші хімічні параметри підземних вод, наприклад — вміст карбонатів. Однак, вимоги і переваги відносяться не до мінералогічного складу вміщуючих порід, а саме до гідрохімічних показників підземних вод.

Певні петротипи можуть бути перспективними у відношенні їх потенціальної рудоносності, а також — і як джерело облицювальних матеріалів. Майбутнє видобування мінеральних ресурсів може призвести до ненавмисного руйнування системи захоронення. Тому відсутність потенціальних мінеральних ресурсів в межах петротипу є важливою вимогою. Окрім цього, перевагою є широке розповсюдження петротипу в межах потенціально придатного району.

Підсумовуючи вищевикладене, можна сказати наступне:

- розповсюдження петротипів з певними характеристиками в межах майданчика є важливим показником придатності майданчика;
- показником придатності петротипу є його потенціал як можливого джерела мінеральних ресурсів;
- в якості показників придатності або непридатності петротипу виступають не характеристики, за якими виконується їх геологічна класифікація (мінералогічний і хімічний склад, структурні і текстурні характеристики), а їх механічні, термічні і фільтраційні характеристики;
- критеріями вибору петротипу є: відсутність в його просторових межах потенційних мінеральних ресурсів; широке розповсюдження і «пересічність» петротипу.

**Тектонічні і геодинамічні характеристики масивів.** Кристалічні породи Українського щита впродовж мільйонів років переживали складну історію метаморфічних змін, викликаних перемінними впливами температур і тисків. Еволюція порід була складною і мала регіональні особливості. Це привело до формування зон пластичних і крихких деформацій. Зони деформацій мають суттєві відмінні механічні і гідравлічні властивості порівняно із вміщуючими їх породами.

Якщо температура і тиск були достатньо значними — формувалися зони пластичних деформацій. Такі зони (лінійні і площинні) характеризуються наявністю розсланцювання порід, формуванням складок, жильного комплексу, мілонітів. Цей тип деформацій приводить до зростання гетерогенності порід і формування ослаблених зон. В свою чергу, при зменшенні навантажень (пов'язаних, наприклад, з гірничими роботами під час спорудження сховища) в ослаблених зонах можуть сформуватися зони тріщинуватості, що суттєво знизить бар'єрні властивості середовища.

*Отже, наявність зон пластичних деформацій є показником геологічної непридатності. Критерієм вибору майданчика є відсутність зон пластичних деформацій порід з відмінними від вміщуючих порід механічними і гідравлічними властивостями.*

Зони крихких деформацій (тріщинуватості) визначаються як зони деформацій, які супроводжуються формуванням механічних тріщин. Такі зони формуються в умовах менших температур і тисків порівняно із зонами пластичних деформацій. В загальному випадку ці зони характеризуються низькою міцністю і підвищеною проникністю порівняно з вміщуючими породами.

Регіональні і основні локальні зони крихких деформацій часто формуються по зонах пластичних деформацій. Вони характеризуються проявами значної сланцюватості з великою кількістю тріщин, часто спостерігаються зони подрібнення порід і ділянки формування вторинних глинистих мінералів. З точки зору наслідків для механічної стабільності сховища значні майбутні механічні деформації більш вірогідні саме в таких зонах порівняно із другорядними локальними зонами тріщинуватості. Регіональні і основні локальні зони характеризуються також підвищеною проникністю, хоча часто і індивідуальні тріщини є водовміщуючими структурами.

Інформація про зони крихких деформацій є важливим показником геологічної придатності. Критерії вибору, пов'язані з наявністю зон крихких деформацій, можуть бути сформульовані наступним чином:

- *геометрія розташування регіональних і основних локальних зон крихких деформацій на майданчику або масиві, складеному певним петротипом, має дозволити розмістити на цьому майданчику сховище певної площі і уникнути при цьому поділу сховища на значну кількість окремих секцій;*
- *геометрія розташування зон тріщинуватості має дозволити розмістити окремі секції сховища на відстані не менше, як 100 м від регіональних, і не менше, як кілька десятків метрів — від основних локальних зон крихких деформацій [5].*

### **3.3. Петрофізичні характеристики**

**Щільнісні характеристики.** Загальна густина порід і їх мінеральна густина не впливають на функції безпеки компонентів системи геологічного захоронення, а отже — не можуть використовуватися як показники геологічної придатності [5].

**Пружні характеристики.** Швидкості розповсюдження поздовжніх і поперечних сейсмічних хвиль в породах важко безпосередньо використати для однозначної оцінки впливу порід на функції безпеки компонентів системи геологічного захоронення. Зазначені параметри залежать від багатьох характеристик порід (механічні характеристики, пористість, тріщинуватість), важливих для оцінки такого впливу. В загальному випадку породи з підвищеними значеннями швидкості розповсюдження поздовжніх і поперечних хвиль можуть бути відносно більш придатними для розміщення геологічного сховища. *Таким чином, за пружними характеристиками може бути встановлений критерій оцінки петротипу, значимість якого є невисокою з огляду на комплексний зв'язок зазначених характеристик з функціями безпеки.*

**Магнітні характеристики.** Магнітна сприйнятність і залишкова намагніченість порід безпосередньо не впливають на функції безпеки компонентів системи геологічного захоронення. Дані по зазначеним характеристикам використовуються для інтерпретації матеріалів магнітної зйомки. Однак, як було зазначено в [12], магнітні характеристики можуть опосередковано характеризувати ступінь окисленості заліза в петротипі. В загальному випадку можна очікувати, що підземні води, які асоціюють з більш «магнітними» породами, будуть характеризуватися більш від'ємними значеннями Eh, а отже більш «магнітні» петротипи будуть відносно більш придатними для розміщення геологічного сховища. *Отже, за магнітними характеристиками може бути встановленим критерій оцінки петротипу, значимість якого є невисокою з огляду на опосередкований зв'язок цих характеристик з функціями безпеки сховища.*

**Ємнісні характеристики.** Відкрита пористість впливає на міграцію елементів, які не сорбуються — наприклад: Cl і I. Радіонукліди  $^{36}\text{Cl}$  і  $^{129}\text{I}$  мають великі періоди напіврозпаду, присутні в помітних кількостях в радіоактивних відходах і саме цьому можуть давати помітний внесок в дози опромінення населення після закриття геологічного сховища. Відкрита пористість є менш значимим параметром для затримки більшої частини радіонуклідів (уран і трансуранові нукліди), що вивільняються з порушеного контейнера, з огляду на їх високу здатність до сорбції. Це означає, що міграція таких радіонуклідів буде суттєво сповільнюватися при їх сорбції і визначатися їх здатністю до дифузії.

З огляду на здатність бентонітового буфера до набухання, завдяки чому тріщини прилеглих порід будуть заліковуватися після зволоження бентоніту, більш важливим параметром, що вплине на функції сховища, є апертура тріщин, яка має бути меншою певної критичної величини. Відсутність критичних тріщин забезпечується активним вибором відповідного місця розташування свердловин для розміщення контейнерів. Тому специфічна вимога до пористості вміщуючих порід не встановлюється. *Загальна пористість не є показником геологічної придатності, а отже до цього показника не встановлюється критерій вибору. Однак, відкрита пористість може використовуватися як критерій оцінки, оскільки зрозуміло, що більш низькі її значення сприятимуть зменшенню потоку підземних вод через переріз сховища.*

**Термічні характеристики.** Формування теплових полів у вміщуючих породах визначається їх теплоємністю і теплопровідністю, а термомеханічні зміни — коефіцієнтами теплового розширення породоутворюючих мінералів. Термічні властивості порід впливають на ізолюючу функцію системи захоронення. І з точки зору забезпечення безпеки, і з точки зору оптимізації обсягів гірничих робіт підземний простір сховища має бути мінімізованим. Можливості такої мінімізації залежать від термічних характеристик порід, тобто від того, наскільки добре породи сприяють розсіюванню тепла від контейнерів з РАВ. З іншої сторони, досвід прив'язки підземних споруд сховища до місцевих особливостей розташування регіональних і головних локальних зон крихких деформацій показує, що саме розташування зазначених зон, а не термічні характеристики порід, є фактором, який обмежує можливість мінімізації простору сховища. Тому, по відношенню до теплопровідності порід встановлюється не вимога, а перевага.

*Таким чином, з однієї сторони, термічні характеристики петротипу є показником геологічної придатності, тобто до цих характеристик можуть встановлюватися критерії вибору. З іншої ж сторони, зменшення негативних теплових явищ в системі захоронення досягається за рахунок вибору щільності розміщення контейнерів, тобто в процесі проектування, отже такий критерій не буде визначальним.*

*Наприклад, відповідно до [5], критерієм вибору може бути значення теплопровідності порід ( $\lambda$ ), що перевищує  $2,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°К})$ . Додатковим критерієм може бути також низьке значення коефіцієнта теплової неоднорідності ( $\beta$ ) порід.*

**Радіоактивні характеристики.** Підвищений вміст в петротипі урану і торію можуть вимагати облаштування у сховищі ефективної системи вентиляції для зниження концентрації радону до припустимих рівнів. Тому *загальна радіоактивність може бути показником геологічної придатності петротипу.* Однак, цей показник має використовуватися для обґрунтування вимог щодо дотримання експлуатаційної безпеки персоналу сховища. Він не важливий з точки зору обґрунтування довготривалої безпеки сховища. Таким чином, *критерієм оцінки придатності петротипу може бути низький вміст урану і торію, однак значимість цього критерію є низькою.*

#### **4. Методика оцінки придатності петротипів**

Як вже було показано, більшість з петрофізичних характеристик можуть використовуватися лише для ранжиювання петротипів за відносною їх здатністю до забезпечення безпеки геологічного сховища. Окрім цього, слід наголосити, що для доказу відповідності петротипу (геологічного середовища) вимогам безпеки використовується більш широкий список характеристик порід і середовища, де провідну роль відіграють фільтраційні, гідрохімічні і механічні параметри (див. розділ 2). Це означає, що петротип, який отримує найбільш високий ранг за обмеженим набором параметрів (в основному — за петрофізичними), може виявитися нездатним задовольнити всі вимоги безпеки, а, отже — і непридатним для розміщення геологічного сховища. Можлива і зворотня ситуація, коли петротип навіть найнижчого рангу виявиться придатним для створення сховища. Так чи інакше, для остаточного доведення відповідності петротипу вимогам безпеки, необхідно виконати аналіз безпеки всієї системи захоронення.

В таблиці наводяться рекомендації щодо встановлення критеріїв оцінки петротипу гранітоїдів за петрофізичними (і деякими іншими) характеристиками. При цьому враховується ступінь і характер впливу характеристики на функції безпеки компонентів системи геологічного захоронення (розділ 3). Характеристики в таблиці розташовано в порядку зменшення ступеню їх впливу на безпеку сховища.

**Таблиця.** Встановлення критеріїв вибору і оцінки петротипу

Назва характеристики*	Метод встановлення критерію	Орієнтовні категорії критерію**	Тип критерію	Значимість критерію**
Потенційна цінність петротипу, як джерела ресурсів	Експертний, за певними правилами	0 — петротип використовується вже зараз для видобування сировини; 1 — петротип має ознаки потенційної цінності; 2 — петротип не має ознак потенційної цінності.	Критерій вибору	Дуже висока
Розповсюдженість зон крихких і пластичних деформацій	Експертний, за певними правилами	0 — широка розповсюдженість зон; 1 — середня розповсюдженість зон; 2 — рідка проявленість зон	Критерій вибору	Дуже висока
Розповсюдженість петротипу	Експертний, за певними правилами	0 — рідко проявлений, або характерний розмір площі окремих тіл менше 5 км <sup>2</sup> ; 1 — середня розповсюдженість, або характерний розмір площі окремих тіл від 5 до 10 км <sup>2</sup> ; 2 — широка розповсюдженість, або характерний розмір площі окремих тіл більше від 10 км <sup>2</sup> .	Критерій вибору	Висока
Теплопровідність ( $\lambda$ )	За діапазоном значення величини, визначеному за літературними даними	0 — якщо $\lambda$ менше 2,5 Вт/(м·°К); 1 — якщо $\lambda$ становить від 2,5 до 3,2 Вт/(м·°К); 2 — якщо $\lambda$ більше 3,2 Вт/(м·°К).	Критерій вибору	Висока
Коефіцієнт теплової неоднорідності ( $\beta$ )	За діапазоном значення величини, визначеному за результатами статистичного аналізу	0 — якщо $\beta$ більше від $\beta_{\text{середнє}} + \sigma$ ; 1 — якщо $\beta$ в діапазоні $\beta_{\text{середнє}} \pm \sigma$ ; 2 — якщо $\beta$ менше від $\beta_{\text{середнє}} - \sigma$ .	Критерій оцінки	Висока
Пористість ( $\epsilon$ )	За діапазоном значення величини, визначеному за результатами статистичного аналізу	0 — якщо $\epsilon$ більше від $\epsilon_{\text{середнє}} + \sigma$ ; 1 — якщо $\epsilon$ в діапазоні $\epsilon_{\text{середнє}} \pm \sigma$ ; 2 — якщо $\epsilon$ менше від $\epsilon_{\text{середнє}} - \sigma$ .	Критерій оцінки	Середня
Швидкість позовжніх хвиль ( $V_p$ )	За діапазоном значення величини, визначеному за результатами статистичного аналізу	0 — якщо $V_p$ менше від $V_{p \text{ середнє}} - \sigma$ ; 1 — якщо $V_p$ в діапазоні $V_{p \text{ середнє}} \pm \sigma$ ; 2 — якщо $V_p$ більше від $V_{p \text{ середнє}} + \sigma$ .	Критерій оцінки	Середня
Швидкість поперечних хвиль ( $V_s$ )	За діапазоном значення величини, визначеному за результатами статистичного аналізу	0 — якщо $V_s$ менше від $V_{s \text{ середнє}} - \sigma$ ; 1 — якщо $V_s$ в діапазоні $V_{s \text{ середнє}} \pm \sigma$ ; 2 — якщо $V_s$ більше від $V_{s \text{ середнє}} + \sigma$ .	Критерій оцінки	Середня
Вміст урану ( $C_U$ )	За діапазоном значення величини, визначеному за результатами статистичного аналізу	0 — якщо $C_U$ більше від $C_{U \text{ середнє}} + \sigma$ ; 1 — якщо $C_U$ в діапазоні $C_{U \text{ середнє}} \pm \sigma$ ; 2 — якщо $C_U$ менше від $C_{U \text{ середнє}} - \sigma$ .	Критерій оцінки	Низька
Магнітна сприйнятність ( $\chi$ )	За діапазоном значення величини, визначеному за результатами статистичного аналізу	0 — якщо $\chi$ менше від $\chi_{\text{середнє}} - \sigma$ ; 1 — якщо $\chi$ в діапазоні $\chi_{\text{середнє}} \pm \sigma$ ; 2 — якщо $\chi$ більше від $\chi_{\text{середнє}} + \sigma$ .	Критерій оцінки	Низька
Вміст торію ( $C_{Th}$ )	За діапазоном значення величини, визначеному за результатами статистичного аналізу	0 — якщо $C_{Th}$ більше від $C_{Th \text{ середнє}} + \sigma$ ; 1 — якщо $C_{Th}$ в діапазоні $C_{Th \text{ середнє}} \pm \sigma$ ; 2 — якщо $C_{Th}$ менше від $C_{Th \text{ середнє}} - \sigma$ .	Критерій оцінки	Низька

*Примітки:*

\* — перелік характеристик петротипу не є вичерпним; \*\* — правила визначення категорії критерію і його значимості є попередніми і можуть підлягати уточненню.



Далі наводиться методологія оцінки ступеню придатності петротипу для спорудження геологічного сховища. Власне, вона базується на методі багатокритеріального аналізу різнорідних даних, що часто застосовується для прийняття рішень в процесі вибору майданчика (див. наприклад, [16]). Методологія носить експертний характер і є суб'єктивною. Можливе її застосування дозволяє максимально повно використати великий масив вже існуючих даних по петрофізичним характеристикам петротипів. Основне її призначення — отримати список петротипів, ранжированих за відносною здатністю петротипу забезпечити довготривалу безпеку системи геологічного захоронення. Високий ранг петротипу не означає доказу того, що він здатний забезпечити вимоги безпеки, але є першочерговим «кандидатом» для подальшого визначення. Практичне здійснення оцінки ступеню придатності петротипу включає наступні кроки.

**Визначення діапазону чисельних значень характеристики ( $X_i$ ) для категорій критерію ( $K_{X_i}$ ).** Якщо значення категорії попередньо не визначено, виконується статистичний аналіз сукупності всіх можливих значень характеристики для визначення її середнього значення ( $\bar{X}$ ) і стандартного відхилення ( $\sigma_x$ ) з метою визначення категорії критерію. Приклад попереднього визначення категорій критерію подано в таблиці для характеристик «теплопровідність» та «розповсюдження петротипу».

**Визначення значень категорії критерію ( $K_{X_i}$ ).** Для кожної з характеристик петротипу, відповідно до значень  $\bar{X}$  і  $\sigma_x$ , встановлюється значення категорії ( $K_{X_i}$ ). Значення  $K_{X_i}$  може дорівнювати: 0, 1 або 2 (див. таблицю).

**Обчислення рангу петротипу.** Для кожного з оцінюваних петротипів його ранг визначається за формулою:

$$РАНГ_{петротипу} = \sum_{i=1}^n k_x K_{X_i}, \text{ де}$$

$k_x$  — коефіцієнт, який приймає значення 4, 2, 1 і 0,5, якщо значимість критерію є «дуже високою», «високою», «середньою» або «низькою», відповідно;

$K_{X_i}$  — категорія критерію, що приймає значення 0, 1 або 2, залежно від того, до якого діапазону належить значення характеристики  $X_i$ .

Правила встановлення значень категорій критеріїв та коефіцієнтів їх значимості підбрано таким чином, що петротип з максимальним чисельним значенням рангу буде відносно найбільш придатним для спорудження геологічного сховища РАВ.

Наприкінці відмітимо, що запропонована методологія оцінки ступеню придатності петротипу для спорудження геологічного сховища була використана (в дещо спрощеному і модифікованому вигляді) для оцінки гранітоїдів Волинського мегаблоку Українського щита [17].

## Висновки

Вибір геологічного середовища, представленого певним петротипом, для розміщення геологічної системи захоронення радіоактивних відходів здійснюється відповідно до попередньо встановлених вимог, виконання яких гарантує довготривалу безпеку геологічного сховища. Вимоги встановлюються до тих характеристик вміщуючих порід, які впливають на функції безпеки компонентів геологічної системи захоронення радіоактивних відходів. Основна увага приділяється тим властивостям середовища, які описують умови мобілізації, перенесення і процеси затримки радіонуклідів, шляхи міграції радіонуклідів, рух підземних вод. Значна увага приділяється також механічним і тепловим властивостям середовища, які визначають стабільність масиву порід в часі.

Оцінки безпеки передбачають розрахунок доз опромінення або радіологічних ризиків для моделі міграції радіонуклідів із системи захоронення для певних сценаріїв її еволюції. Створення зазначеної моделі вимагає значних витрат часу і ресурсів і може бути зроблене на основі комплексного дослідження майданчика, розробки проекту сховища, проведення ряду натурних експериментів і дослідження природних аналогів системи захоронення.

Більшість із петрофізичних характеристик можуть використовуватися лише для ранжиювання петротипів за відносною їх здатністю до забезпечення безпеки геологічного сховища. Для доказу відповідності петротипу (геологічного середовища) вимогам безпеки використовується більш широкий список характеристик порід і середовища.

Запропонована методологія (і критерії) оцінки ступеню придатності петротипу для спорудження геологічного сховища застосовується для прийняття рішень в процесі вибору майданчика. Вона носить експертний характер. Її застосування дозволяє максимально повно використати вже отримані дані стосовно петрофізичних характеристик петротипів. Основне її призначення — отримати список петротипів, ранжированих за відносною здатністю забезпечити довготривалу безпеку системи геологічного захоронення. Високий ранг петротипу не є доказом того, що він здатний забезпечити вимоги безпеки, але є першочерговим «кандидатом» для подальшого визначення.

1. 20 років Чорнобильської катастрофи: Національна доповідь України. — Київ : Атіка, 2006. — 224 с.
2. The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes. — OECD, Paris, 1995.
3. TR 99-06: Deep repository for spent nuclear fuel. SR 97 — post-closure safety. — SKB, Stockholm, Sweden, 1999.
4. TRS No.413. Scientific and Technological Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste. — IAEA, Vienna, 2003.
5. TR-00-12. J. Andersson et al. What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation. — SKB, Stockholm, Sweden, 2000.
6. Вимоги до вибору майданчика для розміщення сховища для захоронення радіоактивних відходів. — Наказ Державного комітету ядерного регулювання України 14.11.2008 № 188.
7. Шестопапов В.М., Шибецкий Ю.А. Требования к площадке и критерии выбора площадки для размещения геологического хранилища радиоактивных отходов. — Международная конференция «Двадцать лет Чернобыльской катастрофы. Взгляд в будущее», Киев, Украина, 24–26 апр. 2006 г.: Сб. докл. — К.: «ХОЛТЕХ», 2006. — с. 518–523.
8. SAFETY SERIES No 111-G-4.1. Siting of Geological Disposal Facilities A Safety Guide. — IAEA, Vienna, 1994.
9. TECDOC-991. Experience in selection and characterization of sites for geological disposal of radioactive waste. — IAEA, Vienna, 1997.
10. Загальні положення забезпечення безпеки захоронення радіоактивних відходів у геологічних сховищах, наказ Державного комітету ядерного регулювання України № 81 від 29.05.2007.
11. Изоляция радиоактивных отходов в недрах Украины (проблемы и возможные решения) / Монография под ред. В.М. Шестопапова. — Киев : НАН Украины, НИЦ РПИ, 2006. — 398 с.
12. М.И. Толстой, А.В. Чекунов, И.Б. Шербаков и др. Петрофизика гранитоидов Украинского щита. — Киев: Наукова думка, 1987. — 240 с.
13. TR-00-20: Geoscientific programme for investigation and evaluation of sites for the deep repository. — SKB, Stockholm, Sweden, 2000.
14. TR 01-29: Site investigations. Investigation methods and general execution programme — SKB, Stockholm, Sweden, 2001.
15. POSIVA 2000-15: The site selection process for a spent fuel repository in Finland — Summary report. — POSIVA OY, Finland, 2000.
16. Разработка национальной стратегии и концепции по обращению с радиоактивными отходами в Украине: проект TACIS U4.03/04/ под общей редакцией В.М.Шестопапова. — Киев : Изд. «ПРОМИНЬ», 2008. — Т.1. — 500 с.
17. Л. Кузів, В. Шестопапов, М. Толстой, Ю. Шибецкий. Петрофізична оцінка кристалічних порід при виборі геологічного середовища для захоронення РАВ (на прикладі гранітоїдів Волинського мегаблоку). — Екологія довкілля та безпека життєдіяльності (в друці).

### **Шестопапов В.М., Шибецкий Ю.А., Кузів Л.И. ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПРИГОДНОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОД ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАО**

*Объектом исследований являются петротипы гранитоидов Украинского щита и их петрофизические свойства. Цель работы — разработка методики оценки пригодности петротипов гранитоидов для сооружения геологического хранилища радиоактивных отходов по их петрофизическим характеристикам. Основным методом служит анализ и обобщение литературных источников относительно подходов, которые используются для обоснования длительной радиационной безопасности систем геологического захоронения РАО. Показано, что на основе анализа только петрофизических характеристик гранитоидов нельзя сделать обоснованный (с позиции безопасности) выбор петротипа для сооружения геологического*

хранилища. Разработаны рекомендации относительно критериев и методологии оценки степени относительной пригодности петротипа.

**Shestopalov V, Shybetskyi I, Kuziv L PETROPHYSICAL CRITERIA OF CRYSTALLINE ROCKS SUITABILITY ASSESSMENT AT RADIOACTIVE WASTE GEOLOGICAL DISPOSAL**

*The main subject of inquiry are Ukrainian Shield granitic petrotypes and their petrophysical properties. The aim of investigation is the development of a methodology for petrotypes suitability assessment for radioactive waste geological disposal. The main methods are analysis and synthesis of approaches concerning of geological repository long-term safety justifying. It was shown that sound conclusion about selection of petrotype for safe disposal can not be made solely on the base of petrophysical properties. Recommendation about criteria and methodology of petrotypes relative suitability estimation have been developed.*