

ність надходження або мобілізації специфічного компонента врівноважать обсяги водовідбору.

Прикладом родовищ з поновлюваними ресурсами можуть бути родовища бромних вод, що утворюються шляхом вилугування солей або розбавлення седиментаційних розсолів інфільтраційними водами. Інфільтраційний генезис таких вод контролюється хлор-бромним коефіцієнтом, який значно перевищує 300 (що відповідає морській воді) і може досягати кількох тисяч. Але такі родовища теж потенційно вразливі. Поновленню ресурсів може зашкодити потужний водозабір на прісні води, що перехоплює потік інфільтраційних вод від області живлення або призводить до інверсії напорів, в результаті якої можна втратити як прісні так і мінеральні води.

Стойким хімічним складом, характерним для глибокозалегаючих мінералізованих вод, відрізняються мінеральні води Мінського родовища у верхньопротерозойських відкладах регіонального поширення. Знизу в гору, завдяки збільшенню ступеню водообміну з верхніми прісними водами, зменшується лише мінералізація, що дозволяє використовувати води з верхньої частини комплексу внутрішньо, а з більших глибин – в якості бальнеологічних (у ваннах, басейнах) [5]. Завдяки тому, що родовище приурочене до Мінської височини, в розрізі осадової товщі переважає низхідна фільтрація, яка забезпечує поновлення ресурсів лікувальних вод.

При непоновлюваності запасів поклади мінеральних вод, які носять локальний характер, тобто забезпечуються локальними геохімічними чинниками, можуть утворитись за рахунок тривалої взаємодії підземних вод із вмшчючими породами. При цьому для мінеральних вод характерний режим дуже уповільненого водообміну, в якому елементи та їх сполуки набувають рівноваги в системі "розчин-вмшчюча порода" за дуже тривалий час. Цю рівновагу можна охарактеризувати більш менш сталими коефіцієнтами, що являють собою співвідношення вмісту розрахованої за енергіями Гіббса найбільш стійкої сполуки специфічного аніоногенного компоненту (наприклад  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) у воді до вмісту мікроелементу – комплексоутворювача (Cu, Be, Zn, Al, Fe, Mn то що) (третє припущення). Це може також бути співвідношення катіоногенного елементу з високим коефіцієнтом водної міграції та високим кларком до вмісту специфічного біологічно активного катіоногенного компоненту (або компоненту комплексоутворювача). Такий коефіцієнт можна назвати *рівноважним гідрогенетичним* або гідрохімічно-генетичним.

Тоді, в умовах експлуатації родовища, для елементів або їх сполук, що мають меншу швидкість мобілізації і менший коефіцієнт водної міграції, будуть різко зменшуватись концентрації, що обумовить помітне зростання вищеозначених коефіцієнтів. Звідси, *межі родовища будуть визначатись контуром області захвату водозабору, за час формування якого гідрогенетичний коефіцієнт суттєво не зміниться*. Тобто, в більшості випадків якісне виснаження родовищ буде пов'язано із

кількісним вичерпанням ємнісних запасів, по яких і слід оцінювати експлуатаційні запаси мінеральних вод в умовах дуже уповільненого водообміну.

#### Висновки.

1. Характер змін хімічного складу мінеральних вод різних родовищ України свідчить, що найбільш захищеними від якісного виснаження під час експлуатації (мають поновлювані запаси) є родовища в умовах інтенсивного водообміну, тобто, переважно такі, що носять регіональний характер, а найменш захищеними – локальні родовища в умовах уповільненого та дуже уповільненого водообміну.

2. При визначенні меж та запасів локальних родовищ мінеральних вод в умовах дуже уповільненого водообміну пропонується враховувати рівноважні генетичні коефіцієнти та час їх різкої зміни. Цей коефіцієнт контролює і обмежує експлуатацію родовища не тільки за просторовими координатами, а й в розмірності часу. Подібні коефіцієнти дозволять визначити час вичерпання ємнісних запасів і початку формування притоку динамічних ресурсів. За умов складної гідрогеологічної будови і невизначеності джерел формування складу мінеральних вод, проведення детальних гідрохімічних досліджень з визначенням рівноважних генетичних і нерівноважних експлуатаційних коефіцієнтів допоможе з'ясувати геологічні границі родовища та шляхи надходження некондиційних вод до водоносного горизонту мінеральних вод.

3. Гідрогенетичні коефіцієнти можуть бути не лише індивідуальними (для конкретного родовища), а поширюватись на родовища одного типу, що залегають в межах однієї гідрогеологічної структури, одного водоносного комплексу та гідрохімічної зони.

4. Використовуючи вищеозначені варіанти збагачення мінеральних вод специфічними компонентами в умовах експлуатації та спираючись на зміни гідрогенетичного коефіцієнту, доцільно класифікувати родовища за режимом експлуатації:

а) можливий практично безперервний режим із визначеними, чітко обмеженими об'ємами водовідбору, що не перевищують пружних запасів, або повністю компенсуються надходженням кондиційних вод;

б) режим водовідбору переривчастий – інтервал зупинки в експлуатації регламентується часом відновлення бальнеологічної норми специфічного компоненту та інших кондицій мінеральної води.

1. Классификация минеральных вод Украины: Под. ред. В.М. Шестопалова. К., 2003. 2. Барс Е.А. Органическая гидрогеохимия нефтегазоносных бассейнов. – М., 1981. 3. Огняник М.С. Минеральні води України: Підручник. К., 2000. 4. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М., 1975. 5. Станкевич Р.А. Минское месторождение глубоких артезианских вод, Минск: 1997. – С. 39-43. 6. Щерев К.Д. Система экзогенных минеральных вод (Абстрактная модель в генетично-вещественных, энергетических и пространственно-временных ординатах). Автореф. докт. дисс. София, 1975.

Надійшла до редколегії 30.11.09

В. Мельничук, канд. геол.-мін. наук

## ОЦІНКА ПРИДАТНОСТІ ТУФОВОЇ ТОВЩІ В НИЖНЬОВЕНДСЬКИХ ТРАПАХ ВОЛИНО-ПОДІЛЬСЬКОЇ ПЛИТИ ДЛЯ ЗАХОРОНЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол.-мінералог. наук, проф. В.В. Шевчуком)

Розглядаються вулканічні туфи трапової формації Волино-Поділля як об'єкт для захоронення радіоактивних відходів.

Volcanic tuffs of trap-rocks of Volyno-Podillya is examined as an object for the burial of radio-active wastes.

**Вступ.** Нагальною проблемою для України і, зокрема, Волино-Подільського регіону, де знаходяться Рівненська

та Хмельницька АЕС, є захоронення радіаційно активних відходів (РАВ) атомної енергетики. Підземне захоронен-

ня визнається як найбільш екологічно, технічно та економічно раціональний спосіб тривалої ізоляції РАВ від екосфери [2, 3, 7, 8]. Науково-інженерним центром радіо-гідрогеоекологічних полігонних досліджень НАН України виконані рекогносцировочні дослідження з вибору ділянок для тривалої ізоляції РАВ в геологічному середовищі Чорнобильської зони відчуження і прилеглий частині Коростенського плутону [7]. Розглядаються перспективи використання підземних виробок для підземного захоронення РАВ в соленосних формаціях [7]. Однак широка географія вітчизняних джерел РАВ, розмаїття їх типів і технічних проектів могильників вимагають додаткових альтернативних підходів у виборі геологічних об'єктів захоронення РАВ в надрах України.

Вибір останніх регламентують наступні основні вимоги [3, 7, 8] щодо економічної доцільності і надійності ізоляції РАВ: близькість об'єкта до джерел РАВ; проста геологічна будова території захоронення, її геодинамічна стабільність, достатня глибина і потужність вміщуючи порід, високі ізоляційні властивості гірських порід – могильника РАВ, сорбційна здатність гірських порід по відношенню до радіоактивних ізотопів, сповільнений водообмін та інші позитивні інженерно-геологічні та гідрогеологічні умови.

У Волино-Подільському регіоні найкраще даним вимогам відповідає товща вулканічних туфів серед трапів нижнього венду, яка належить до бабинської світи (верств) волинської серії [1, 4, 5]. Автором виконана попередня оцінка її придатності для підземного захоронення РАВ неподалік від діючих в регіоні Хмельницької і Рівненської АЕС.

**Умови залягання туфової товщі.** За даними глибинного геологічного картування туфова товща простежується під мезозойсько-кайнозойськими відкладами вздовж західного схилу Українського кристалічного щита (УКЩ) у вигляді смуги шириною 1-10 км на глибинах від 5 до 250 м, звідки поступово занурюється на захід до глибин понад 4 км. В межах цієї смуги розміщені Рівненська та Хмельницька АЕС (рис. 1).

Під першою туфи залягають в інтервалі глибин 50-180 м, під другою – 30-130 м). На денну поверхню туфи виступають лише в 5 км на південний схід від м. Славути Хмельницької обл. в кар'єрі Ташки, де видобуваються, та в базальтових кар'єрах біля сіл Берестовець, Мидськ, Базальтове, Іванчі.

Територія розповсюдження туфів в цілому відповідає Волино-Подільській плиті, яка стабільно розвивалась в пасивному геодинамічному режимі принаймні на протязі останніх 100 млн р. Непорушені розломами тіла туфів за площею становлять десятки і сотні км<sup>2</sup> та мають потужність до 210 м.

В розрізі нижньовендської волинської серії туфова товща залягає на покривах олівінових базальтів (до восьми) заболотівської світи, а на західному схилі УКЩ і Поліської сідловини – на олігомітових теригенних відкладах горбашівської світи. В останньому випадку в основі розрізу товщі знаходиться пачка (до 20 м) туфитів. На більшій території регіону досліджувана товща перекрита численними покривами (до семи) базальтів ратнівської світи нижнього венду та її латеральних аналогів (случька, грушківська світи). Попередня оцінка інженерно-геологічних умов залягання туфової товщі (бабинської світи) серед трапів Волино-Поділля, виконана автором за даними буріння 440 свердловин, що розкрили туфи бабинської світи, показує їхню високу потенційну придатність для захоронення РАВ в широкому діапазоні глибин. Найдоступнішими для приповерхневого захоронення РАВ є верхні частини розрізу туфової товщі з неглибоким (до 25 м) заляганням її покривлі, що знаходяться в північній частині Подільської височини (верхів'я р. Горинь, свердловини 86, 98, 197, 1520, 1522, 1551, 1555, 3615 та інші). Тут туфова товща потужністю до 100 м місцями знаходиться в зоні аерації ґрунтових вод і залягає на максимальних абсолютних відмітках до 233 м. Разом з тим, як показали результати попередньої розвідки туфів біля с. Ташки Славутиського р-ну, сапонітові їх різновиди в цій місцевості, завдяки високим вмістам цеолітів та смектитів, мають найкращі в регіоні сорбційні, катіонообмінні та ізоляційні властивості.

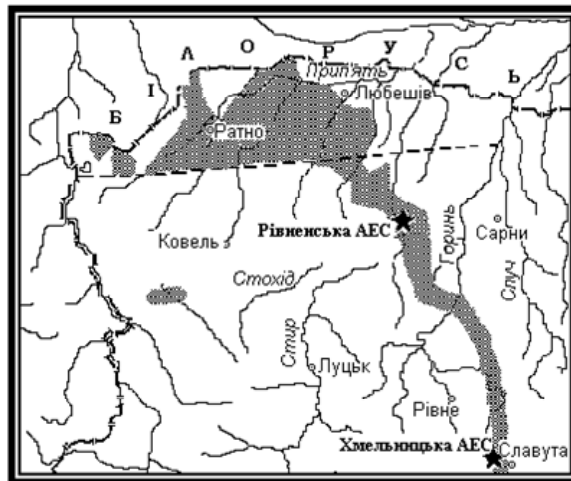


Рис. 1. Схема поширення вулканічних туфів Волино-Поділля на домезозойській поверхні

Що стосується глибокого захоронення РАВ, то для цього можуть бути придатними ті ділянки туфової товщі, де вона залягає серед трапів нижнього венду в межах динамічно стабільних блоків на глибинах в сотні і тисячі метрів, та ізольовані зверху і знизу потужними товщами скельних, слабководоникливих порід. Такі умови залягання туфів властиві для більшої частини

Волино-Подільської моноклінали, Волинського палеозойського підняття і Львівсько-Волинської западини на площі приблизно 150 тис. км<sup>2</sup>. Покривля туфової товщі тут найглибше розкрита свердловинами на абсолютних відмітках -3285 м (с. Н. Витків), -3370 м (с. Літовеж), -3740 м (с. Перемишляни), а потужність туфів сягає 210 м (с. Овадне). Під туфовою товщею і

над нею на значній території регіону залягають численні покриви скельових інженерних ґрунтів – базальтів зальною потужністю до 220 м, а вище по розрізу – потужні товщі осадових відкладів неопротерозою і фанерозою, серед яких наявні численні шари порід з надійними ізоляційними властивостями.

**Речовинний склад туфів.** В складі досліджуваної товщі за розмірністю кластогенного матеріалу перева-

жають, псамітові і пелітові різновиди туфів (літо-вітрокластичні, літокластичні та вітрокластичні). Уламки в них представлені зміненими вулканічним склом, базальтами, шлаками, а також мінералами: плагіоклазами та піроксенами, які в значній мірі заміщені глинистими мінералами – смектитами. Уламки скріплені цементуючими мінералами: в основному цеолітами та смектитами, які в породах домінують (табл. 1).

**Таблиця 1.** Мінеральний склад (%) вулканічних туфів бабинської світи за даними повного мінералогічного аналізу (околиці с. Іванчі Володимирецького р-ну)

№№ свердловин	19	17	8	20	13	14	Середнє
Гл. відбору, м	54,5	58,4	60,0	61,0	62,0	62,0	
Цеоліти	39,15	46,23	33,50	45,40	47,51	47,35	43,19
Смектити	59,62	42,83	31,54	54,78	50,83	51,08	48,53
Польові шпати	0,92	9,13	13,73	1,6	0,89	зн.	5,25
Магнетит	0,30	1,49	зн.	0,22	0,77	1,57	0,87
Мартит	0	0	3,52	0	0	0	0,59
Кварц	зн.	зн.	зн.	0	0	зн.	зн.
Хлорит	зн.	зн.	зн.	0	зн.	зн.	зн.
Піроксен	0	0,22	0	0	зн.	зн.	0,06
Муть	0	0	17,66	0	0	0	2,94
Сума	99,99	99,90	99,95	102,00	100,00	100,00	100,31

Аналізи виконані в мінералогічній лабораторії Рівненської геологічної експедиції ПДРГП "Північгеологія"

За даними комплексного рентгеноструктурного та термічного аналізу (14 визначень) в пелітових різновидах червоноколірних туфів Берестовецького кар'єру Рівненщина) в середньому міститься 64,8 (±20) % смектитів диоктаєдричної будови ряду монтморилоніт-нонtronіт. Псамітові різновиди туфів, видобуті із свердловин поблизу Рафалівського кар'єру, в середньому (6 визначень) містять 65,0 (±15,0)% смектитів триоктаєдричної будови ряду гекторит-сапоніт та 28,2 (±14,6) % анальциму та цеолітів.

Туфи з високими концентраціями вказаних мінералів проявляють цінні сорбційні та катіонообмінні властивості. Так, в анальцим-сапонітових туфах Варварівського родовища (Славутський р-н Хмельницької обл.) вибірково адсорбція радіоцезію Cs<sup>137</sup> при початковій радіоактивності середовища 46000 Бк (Т:Р=1:10) становить 99,5 %, а адсорбція радіостронцію Sr<sup>90</sup> при початковій

радіоактивності середовища 3900 Бк (Т:Р = 1:10) досягає 97,0 %. Їмкість катіонного обміну в цих туфах складає 74,7 мг.екв./100г. До складу обмінного комплексу входять переважно катіони Mg<sup>2+</sup> та Ca<sup>2+</sup>, в меншій кількості Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> та інші. Загалом цеоліт-смектитові різновиди охарактеризованих туфів за мінеральним складом і властивостями близькі до бентонітів.

За хімічним складом (табл. 2) домінуючі в розрізі червоноколірні туфи відповідають натрієвим базальтам сублужного ряду і характеризуються, порівняно з менш зміненими зеленоколірними туфами, низькими вмістами СаО, FeО та підвищеною кількістю Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O. За даними спектральних аналізів середні вмісти мікроелементів, в тому числі екологічно небезпечних, в туфах загалом відповідають кларковим значенням, розрахованим для основних гірських порід літосфери та гранично-допустимим концентраціям (ГДК) в ґрунтах (табл. 2).

**Таблиця 2.** Середній хімічний склад туфів нижнього венду Волині

Породи	Петрогенні компоненти, ваг. %											Кількість проб
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
туфи червоноколірні	47,49	1,87	13,57	10,7	2,81	0,19	7,18	3,06	4,7	1,37	0,15	147
туфи зеленоколірні	47,08	1,42	13,92	7,37	4,28	0,22	7,06	7,58	3,78	0,92	0,11	16
Породи	Розсіяні елементи (в п × 10 <sup>-4</sup> г/т)											Кількість проб
	Ba	Pb	Cr	Ni	Co	V	Cu	Zn	Zr	Sr	Sc	
червоноколірні туфи	208	4	81	50	26	187	64	77	152	109	18	1437
зеленоколірні туфи	299	6	69	50	41	257	67	88	179	103	28	60
кларкові вмісти	290	6	230	80	30	300	90	84	150	460	30	

Аналізи виконувались в Центральній лабораторії ПДРГП "Північгеологія"

**Фізико-механічні і фільтраційні властивості туфів.** За результатами фізико-механічних випробовувань (табл. 3) вулканічні туфи регіону відносяться до різновиду напівскельових маломіцних ґрунтів. У водонасиченому стані вони мають межу міцності на одноосьове стиснення 5 – 10 МПа. При обпаленні в інтервалі температур 1000-1100°C водопоглинання туфів зменшується до 5 %, а при 1150-1200°C вони плавляться з

утворенням міцних керамічних мас, в яких межа міцності на одноосьове стиснення сягає 25 МПа [6].

Вулканічні туфи Волино-Поділля загалом слабопроникливі породи. За даними пробних відкачок підземних вод із свердловин в умовах інтенсивного водообміну на родовищі базальтової і туфової сировини "Іванчі", вони мають коефіцієнт фільтрації 0,1-0,25 м/добу, що є значно меншим від цього показника для тріщинуватих скельових ґрунтів (4-12 м/добу).

Таблиця 3. Результати фізико-механічних випробовувань вулканічних туфів Іванчівського родовища (за матеріалами Рівненської геологічної експедиції ПДРГП "Північгеологія")

Властивості туфів	Значення			Кількість проб
	Xmin	Xmax	$\bar{X}$	
Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,65	2,24	2,09	39
Абсолютна вологість, %	0,027	0,149	0,088	14
Об'ємна маса скелету, г/см <sup>3</sup>	0,027	0,149	0,088	13
Питома вага, г/см <sup>3</sup>	2,12	2,89	2,52	24
Пористість, %	8,3	30,8	22,31	18
Коефіцієнт пористості	0,199	0,445	0,297	18
Абсорбція, %	3,32	18,8	13,4	38
Межа міцності при стисканні в повітряно-сухому стані, кг/см <sup>3</sup>	59	1160	393	57
Кут внутрішнього тертя, градус	30	40	34	17
Коефіцієнт зчеплення, кг/см <sup>3</sup>	47	111	86	17

Тріщинуватість у туфах також на порядок слабкіша від тієї, що проявлена в скельових ефузивних породах волинської серії. Для туфів характерні переважно міжзернові деформації, а тріщини, як правило, заліковані вторинними мінералами: смектитами, карбонатами і хлоритами. Однак, в умовах глибокого залягання по наявних тріщинах і порах через туфи все ж таки можливе повільне проникнення напірних вод.

Зазначений чинник, незважаючи на порівняно добрі ізоляційні та абсорбційні властивості туфів, дещо понижує рівень безпеки захоронення в них РАВ. За прикладом вулканічних туфів гори Яка (штат Невада), котрі вибрані для захоронення РАВ у США [2], найперспективнішими в цьому відношенні є ті масиви туфів, котрі розміщені в зоні аерації підземних вод, або добре ізольовані водотривами. Виявлення і вивчення таких відносно сухих туфових масивів у Волино-Подільському регіоні має стати важливою задачею майбутніх інженерно-геологічних досліджень і вимагає проведення комплексних інженерно-геологічних, гідрологічних та геофізичних вишукувань в туфових горизонтах на предмет безумовної надійності їх ізоляційних властивостей. Високотемпературне обпалення туфів в підземних виробках дасть змогу створити навколо останніх надійну керамічну броню, про що свідчать зразки міцної кераміки, виготовлені з туфів [6].

**Висновки.** Цеоліт-смектитові туфи Волино-Поділля завдяки своїм унікальним ізоляційним і сорбційним властивостям, сприятливим інженерно-геологічним умовам залягання в геологічному середовищі можуть розглядатись як потенційний об'єкт для підземного захоронення РАВ.

У зв'язку з накопиченням значних об'ємів РАВ на Рівненській і Хмельницькій АЕС, актуальним є їхнє захоронення в туфовій товщі поблизу цих атомних електростанцій, що зніме додаткові загрози при транспортуванні радіоактивних відходів. Оптимальним рішенням може бути захоронення РАВ в охоронній зоні цих АЕС.

Пропозиція підземного захоронення РАВ в цеоліт-смектитових туфах Волино-Поділля, за прикладом проєктів захоронення РАВ в туфових товщах, які розробляються в США та Росії [2, 3], може стати додатковою альтернативою намірам ізолювати РАВ від екосистеми в Чорнобильській зоні відчуження і прилеглий частині Коростенського плутону [7], в підземних виробках соленосних формацій [8] та інших геологічних об'єктах України.

1. Богданов Г.О., Верджиховський О.М., Долецький С.П. та ін. Цеоліт-смектитові туфи Рівненщини: біологічні аспекти використання. – Рівне, – 2005.
2. Кочкин Б.Т. Оценка гидрогеологических условий при выборе места для могильника отвержденных радиоактивных отходов // Геоекология. – 1997. – №3. – С. 68-78.
3. Кочкин Б.Т. Об объективности экспертных методик выбора места для захоронения радиоактивных отходов // Геоекология. – 1998. – № 1. – С.48-53.
4. Мельничук В.Г., Матеюк В.В. Туфи Волино-Поділля як новий вид мінеральних ресурсів // Проблеми раціонального використання, охорони і відтворення природно-ресурсного потенціалу України. – Чернівці. – 2000. – С. 133-134.
5. Мельничук В.Г. Цеоліт-смектитові вулканічні туфи Волині – новий тип природної агрохімічної сировини // Агрономічні руди України. – К., 2004. – С. 117-119.
6. Скрипник І.Г., Ніхаєва Л.І., Філоненко В.В. Дослідження фізико-хімічних властивостей базальтового туфу як сировини для будівельної кераміки // Мат-ли наук.-техн. конф. УІВГ. – Рівне. – 1995.
7. Шестопапов В.М., Руденко Ю.Ф., Соботович Э.В. и др. Изоляция радиоактивных отходов в недрах Украины (проблемы и возможные решения). – К., 2006.
8. Шехунова С.Б. Досвід використання підземних виробок соленосних формацій // Геолог України. – 2007. – №1. – С. 44-52.

Надійшла до редколегії 12.12.09