

УДК 621.039.7

**Шабалін Б. Г., Злобенко Б. П., Спасова Л. В.**

*ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»*

## **ВНЕСОК АКАДЕМІКА Е.В. СОБОТОВИЧА У ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ЗАХОРОНЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ У ГЕОЛОГІЧНІ СХОВИЩА**

*У статті розглянуто внесок академіка НАН України Е.В. Соботовича у розвиток наукових засад вирішення проблеми захоронення довгоіснуючих радіоактивних відходів у стабільні геологічні утворення. Показано перспективи подальших досліджень у цьому напрямку, якими є: розвиток наукових основ і методик з оцінки безпеки підземних сховищ РАВ; проведення експериментального і математичного моделювання процесів міграції радіоізотопів в кристалічних породах; розробка наукових основ і технологічних принципів створення бар'єрних матеріалів для забезпечення безпеки сховищ РАВ.*

Проблема захоронення радіоактивних відходів (РАВ) гостро постала в Україні з набуттям державної незалежності. У нових умовах ця проблема набула особливого значення, насамперед, через наявність величезних об'ємів РАВ, що утворились внаслідок Чорнобильської катастрофи, і стала однією з реальних загроз для екологічної безпеки держави. По суті, проблема виявилася всеохоплюючою і системною.

Колектив Відділення радіогеохімії навколишнього середовища Інституту геохімії і фізики мінералів АН України (ВРНС) на чолі з Е.В. Соботовичем ще усередині 80-х років виконував фундаментальні ізотопно-геохімічні дослідження впливу на геологічне середовище атомних електростанцій (АЕС), а також теоретичні і експериментальні роботи щодо прогнозу геохімічної міграції радіонуклідів у підземних водах і зоні аерації. Особливістю досліджень було поєднання у системній єдності двох нерозривних складових – природного середовища і техногенної радіоактивної компоненти. Саме ці роботи започаткували формування у ВРНС такого винятково важливого напрямку наукової діяльності держави як поводження з РАВ, у тому числі, і захоронення довгоіснуючих РАВ (ДРВ) у стабільні геологічні утворення – геологічні сховища (ГС).

На замовлення Держкомітету з використання атомної енергії, під науковим керівництвом Е.В. Соботовича, у 1991 р. було створено Концепцію поводження з радіоактивними відходами в Україні [1], у якій проголошено основні принципи поводження з РАВ, відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП) та визнано необхідність спорудження в Україні ГС для захоронення ДРВ. Саме положення цієї Концепції було покладено в основу Державної програми поводження з радіоактивними відходами, розробленої у 1996 р. (у редакціях 1999 і 2002 рр. – Комплексна програма поводження з радіоактивними відходами), якою визначено головні напрями і заходи поводження з РАВ чорнобильського походження, а також тими, що утворились у ядерно-енергетичному комплексі та на підприємствах інших галузей народного господарства. Треба зазначити, що дана концепція у багатьох аспектах залишається актуальною і сьогодні.

Завдяки авторитету Е.В. Соботовича, його широкому науковому кругозору, визначним лідерським якостям на базі ВРНС був створений Державний науковий центр радіогеохімії навколишнього середовища (нині – ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», далі – Інститут), який став визнаним центром досліджень з проблем поводження з РАВ. На його базі організовано Міжвідомчу наукову раду при Президії НАН України з проблем поводження з РАВ, насамперед, захоронення РАВ у геологічних формаціях і координації досліджень у цій галузі, до складу якої увійшли провідні науковці та фахівці як з Інституту, так і з інших організацій.

У 1991-1995 рр. в рамках програми невідкладних заходів з ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС було виконано роботу „Аналіз принципів і критеріїв вибору та

оцінки придатності ділянок локалізації радіоактивних відходів», за результатами якої зроблено висновок про необхідність проведення комплексних досліджень щодо захоронення у ГС високоактивних відходів (ВАВ) і довго існуючих радіоактивних відходів (ДРВ) ядерної енергетики України.

Геологічні формації є виключно складними системами з великою різноманітністю можливих технічних рішень при захороненні РАВ, що треба враховувати при спорудженні ГС. Дослідження в галузі розробки наукових основ безпеки ГС представляє комплекс проблем науково-технічного характеру, таких як вибір майданчика для його спорудження, розробка і створення технологій багатобар'єрної ізоляції, детальні дослідження у підземній лабораторії і аж до етапів проектування і будівництва.

У середині 90-х років провідні фахівці з проблем захоронення РАВ дійшли висновку, що за реальних соціально-політичних, нормативно-правових, економічних та екологічних передумов пошуки місця для геологічного сховища має бути зосереджено, насамперед, на території Чорнобильської зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення (далі – ЗВ). Пізніше, на завдання Міністерства з надзвичайних ситуацій України, виконано ряд досліджень щодо вибору районів для створення ГС у ЗВ та прилеглих до неї територіях. Найбільш прийнятними для спорудження геологічного сховища у межах ЗВ вважаються породи докембрійського фундаменту. Глибина залягання поверхні фундаменту в межах ЗВ змінюється від 150 м на південному заході до 3000 м і глибше на сході території, таким чином, тектонічна структура фундаменту доступна для досліджень практично лише непрямыми геофізичними та аерокосмогеологічними методами. Між запропонованими в різні роки тектонічними схемами докембрійського фундаменту цієї території існують істотні розбіжності внаслідок застосування різних методичних засобів обробки даних і суб'єктивних підходів до інтерпретації результатів. Під час виконання цих досліджень були використані як традиційні (геофізичні, тектонічні, петрологічні, літологічні тощо) методи, так і застосовувались нові підходи. У результаті узагальнення й аналізу всієї наявної інформації був побудований комплект карт, що відображав будову осадового покриву досліджуваних територій. Результатом геодинамічного і гідрогеологічного моделювання стало створення багатофакторних картографічних моделей.

У зв'язку з пошуком тектонічно стабільної ділянки для захоронення ДРВ у докембрійських утвореннях досліджено закономірності будови київського ярусу (середній еоцен) на території ЗВ. Різноманітність умов формування київського ярусу охарактеризовано п'ятьма основними типами розрізів. Суттєво різні тенденції зміни літофаціальних умов протягом київського віку в різних частинах території встановлено шляхом аналізу мінливості просторового розподілу літотипів у послідовності латеральних зрізів товщі, які відповідають різним моментам геологічного часу. За особливостями будови київського ярусу, що зумовлені геотектонічними чинниками, територія поділяється на три райони – північно-західний, північно-східний та південний. Тектонічно найбільш стабільним уявляється будова південного району; на ньому мають бути зосереджені першочергові роботи з пошуку ділянки для захоронення ДРВ [2, 3].

В межах ЗВ було визначено ряд районів із сприятливими геологічними умовами, потенційно придатних для захоронення РАВ. Це, насамперед формація гранітів-рапаківі північно-східної частини Коростенського плутону, що залягає на малих глибинах, і геологічна будова якої найбільш досліджена. За результатами аналізу визначено дві перспективні для подальшого вивчення ділянки: перша – Вереснянська, розташована поза межами ЗВ, поблизу південно-західної її границі; друга – Товстий Ліс, яка знаходиться в межах ЗВ, на відстані 15–25 км західніше Чорнобильської АЕС.

Завдяки великому практичному досвіду Емлена Володимировича та численним науковим розробкам з питань захоронення РАВ, Європейська комісія у 1997 р. запросила його очолити наукове керівництво проектами для України.

Вже при виконанні робіт в рамках міжнародного проекту ТАСІС «Схема безпечного поводження з радіоактивними відходами», розділ «Допомога у виборі майданчика для

остаточного захоронення» за пропозицією українських експертів як варіант розміщення сховища РАВ стала розглядатися територія ЗВ, оскільки саме у зоні були зосереджені основні обсяги РАВ, що підлягали видаленню в ГС. Перспективність геологічної будови ЗВ для розміщення ГС обґрунтовано як показниками геологічної придатності, так і сучасними економічними й соціально-демографічними умовами, а також відсутністю потенційних труднощів, пов'язаних з одержанням дозволу від місцевих органів влади на розміщення радіаційно небезпечних об'єктів та близькості основних постачальників ВАВ і ДРВ [4, 5].

У іншому міжнародному проекті [6], який виконувався за завданням директорату наукових досліджень Єврокомісії з проблеми геологічного захоронення нетепловиділяючих ДРВ, наукове керівництво яким також здійснював Е.В. Собонович, брали участь експерти компаній GRS mbH (ФРН), AEA Technology (Велика Британія) та українські фахівці. Досліджувалась можливість створення сховища нетепловиділяючих низько- та середньоактивних ДРВ у відпрацьованих гірничовидобувних шахтах. За результатами експертного висновку було вибрано залізорудну шахту Саксагань (Криворізький басейн) як таку, що найбільш відповідає критеріям безпеки захоронення РАВ подібного типу. Оцінка безпеки виконувалась за допомогою запропонованих західною стороною регіональної й локальної гідрогеологічних моделей (за програмою MASCOT). Кінцевий результат досліджень представлено інтегральними детермінованими та імовірнісними оцінками потенційного радіологічного ризику від захоронення РАВ у шахті Саксагань. Згідно з попередніми висновками потенційний ризик захоронення нетепловиділяючих низько- та середньоактивних ДРВ у шахті Саксагань нижчий, ніж встановлено міжнародними нормами.

Україна, ратифікувавши Об'єднану Конвенцію про безпеку поводження з відпрацьованим паливом та про безпеку поводження з радіоактивними відходами, взяла на себе зобов'язання виконувати принцип непокладання надмірного тягаря на майбутні покоління. Тому Інститут, в особі директора, академіка НАН України Собоновича Е.В., підтримав наукову програму проекту Єврокомісії «Європейська технологічна платформа – реалізація геологічного захоронення радіоактивних відходів», якою передбачено, що перші геологічні сховища для захоронення відпрацьованого палива та високоактивних довгоіснуючих РАВ будуть побудовані в Європі до 2025 р., і став її учасником [7].

Емлен Володимирович приділяв багато уваги науково-організаційній співпраці з питань геологічного захоронення з МАГАТЕ. Починаючи з 2004 р. Інститут приймає участь у програмі за проектом «Технології захоронення РАВ у підземних науково-дослідних лабораторіях» [8], у рамках якого вже шість наукових співробітників Інституту пройшли курси МАГАТЕ за програмою фундаментальних засад геологічного захоронення – від розробки концепції до оцінки безпеки, а також з сучасних концептуального та чисельного методів моделювання процесів у системі сховища РАВ. Цей факт є особливо важливим для України, оскільки діяльність зі створення геологічного сховища РАВ знаходиться на початкових стадіях, а підготовка відповідних вітчизняних фахівців дозволить заощадити час та кошти.

Низка робіт присвячена питанням розробки комплексних геохімічних критеріїв прийнятності кристалічних порід для створення ГС. На основі аналізу факторів впливу ВАВ на кристалічні породи (мінерали) визначено, що геохімічними критеріями прийнятності, як складової частини загальних геологічних критеріїв, є термічна і радіаційна стійкість, сорбційна і ізоморфна ємність, геохімічна подібність радіонуклідному складу РАВ, вміст флюїдних включень та газоутворення. Рекомендовано методи для визначення кількісних показників геохімічних критеріїв прийнятності [9]. Експериментально досліджено міжфазовий розподіл Th і U у водній системі та запропоновано модель, за якою розраховано середні величини коефіцієнтів розподілу (Kd) U, Pu, Np, Am Cs та Tc у гранітах для використання при проведенні аналізу безпеки [10,11].

Для багатобар'єрної концепції геологічного захоронення необхідним є проведення оцінки стійкості бар'єрів. Складність цієї оцінки полягає у необхідності врахування фактора часу, а це – сотні тисяч років. Тому було вивчено можливість використання результатів

короткочасних лабораторних спостережень у методології оцінки надійності геологічного захоронення. Обговорено механізми, що викликають руйнування системи бар'єрів, включаючи дію кондиційованих відходів, мобілізацію радіонуклідів усередині ближньої зони та їхній перенос через буфер/матеріал засипки, далі – в оточуючу гірську породу. У рамках контракту з МАГАТЕ виконано дослідження стійкості мінералів з порід, які можуть вміщувати ДРВ. Проведено екстраполяцію результатів короткострокових спостережень на тривалі періоди часу (в геологічному масштабі) [12].

Дослідження довгострокової стабільності матеріалів, що застосовуються при захороненні РАВ, мають характер прогнозу. Із часом властивості захисних бар'єрів змінюються за рахунок фізико-хімічних процесів, що відбуваються усередині ГС. Тому при проведенні оцінки стійкості матеріалів, використовуваних для упаковки РАВ, можуть бути враховані результати досліджень відповідних археологічних артефактів як матеріальних аналогів інженерних бар'єрів (метал, скло, кераміка). За контрактом МАГАТЕ було виконано дослідження «Вивчення стійкості матеріалів з археологічних пам'яток України», у ході якого визначено параметри й дано оцінку швидкості корозії виробів із бронзи й міді з археологічних розкопів в античному місті Ольвія (Північне Причорномор'я). Отримані результати опубліковані в Технічному документі МАГАТЕ [13] і використовуються в інформаційно-просвітницьких заходах при обговоренні з населенням питань відносно вибору місць для створення ГС.

Під науковим керівництвом Соботовича Е.В. проведено роботи з вивчення системи інженерних бар'єрів у ближній зоні ГС, які призначені для утримання радіонуклідів протягом визначеного проектом проміжку часу, стримування їхньої мобілізації і виходу у навколишнє геологічне середовище. Співробітники відділу у рамках контракту з МАГАТЕ дослідили властивості бентоніту Черкаського родовища. Узагальнюючий аналіз експериментів з визначення параметрів набухаючих глин дозволив рекомендувати їх для використання як бар'єрного матеріалу у ГС [14].

Імобілізація ВАВ та середньоактивних РАВ (САВ) у тверді стійкі матеріали – консервуючі матриці – є на сьогодні загальноприйнятою у світі практикою запобігання надходження забруднювачів у навколишнє середовище, а вибір консервуючих матриць – це один із ключових моментів, досить актуальний для всіх ядерних держав, при вирішенні питань, пов'язаних із створенням сховищ РАВ. Необхідність підвищення екологічної безпеки ГС вимагає захоронення ВАВ у твердому стані, що пов'язано зі створенням нових матричних матеріалів для надійної і довготермінової фіксації довгоіснуючих радіонуклідів в умовах тривалої дії опромінення. Тому у відділі виконуються дослідження методів синтезу мінералоподібних матриць з ізоморфно фіксованими елементами-імітаторами відходів та комплексне дослідження фазового складу, структурних особливостей, фізико-хімічних та фізико-механічних властивостей зразків мінералоподібних матриць. При виконанні цих робіт відділ плідно співпрацює з Інститутом фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій ННЦ ХФТІ НАН України та Київським національним університетом ім. Т.Шевченка в рамках завдань і заходів, передбачених «Державною програмою фундаментальних і прикладних досліджень з проблем використання ядерних матеріалів та ядерних і радіаційних технологій у сфері розвитку галузей економіки».

Під науковим керівництвом академіка Е.В. Соботовича у відділі було підготовлено і захищено Б.Г. Шабалінін докторську дисертацію, у якій на основі мінералого-геохімічних даних показано перспективність і переваги використання мінералоподібних матриць зі структурами типу флюориту (цирконоліт, пірохлор), гранату, монациту (брабантит) і голандиту для іммобілізації відходів, які б могли містити техногенні актиноїди, рідкісноземельні і деякі інші довгоіснуючі радіонукліди [15, 16]. Уперше визначено оптимальні умови синтезу матриць методом прожарювання сумісно осаджених компонентів з одночасним введенням у високореакційну шихту елементів-імітаторів довгоіснуючих радіонуклідів. Проведено комплекс досліджень щодо експериментального визначення розчинності і радіаційної стійкості отриманих матеріалів і встановлено можливість

застосування нових енергозберігаючих методик їх отримання. Наукові результати були високо оцінені міжнародними експертами, і з Інститутом було укладено угоду на участь в координаційному проекті МАГАТЕ.

У 2008 р. в Інституті, за участі Е.В. Собоновича, у рамках проекту МАГАТЕ «Комплексна оцінка безпеки радіоактивних відходів в Україні», організовано та проведено два семінари, метою яких було ознайомлення українських спеціалістів з методологією МАГАТЕ з оцінки безпеки об'єктів для захоронення РАВ і впровадження її в Україні.

По мірі розвитку державної системи поводження з РАВ у діяльності Інституту поступово формувалися нові відгалуження, зокрема, створення нормативно-технічної бази у сфері захоронення РАВ, розробка технологічних принципів довгострокової ізоляції ВАВ тощо. Комплексною програмою поводження з РАВ передбачений, у тому числі, і першочерговий розвиток вітчизняної нормативно-правової бази. Під науковим керівництвом і за безпосередньої участі Е.В. Собоновича розроблено нормативно-правовий акт (НПА) «Загальні положення забезпечення безпеки захоронення радіоактивних відходів у геологічних сховищах» [17]. Актуальність створення цього документу викликана необхідністю вирішення проблеми ізоляції ВАВ та ДРВ для України, що визначається низкою факторів:

- значними обсягами ВАВ та ДРВ, накопиченими при ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС, експлуатації ядерних установок, використанні джерел іонізуючого випромінювання;

- необхідністю вирішення проблеми ізоляції ВАВ від переробки в Російській Федерації ВЯП з українських АЕС (реактори типу ВВЕР);

- зняття енергоблоків АЕС та дослідних реакторів з експлуатації.

Результатом розробки цього НПА є встановлення регулюючих вимог до загальних положень забезпечення ядерної та радіаційної безпеки при захороненні РАВ, які підлягають розміщенню в ГС, на всіх етапах життєвого циклу сховищ для захоронення РАВ (виборі майданчика, проектуванні, спорудженні, експлуатації та закритті), що сприятиме удосконаленню існуючої практики поводження з РАВ.

За ініціативи, наукового керівництва та безпосередньої активної участі Е.В. Собоновича було здійснено кілька крупних проектів з розробки стратегії поводження з РАВ в Україні. У цьому зв'язку не можна не згадати, з якою енергійністю, принциповістю і переконливістю наполягав Е.В. Собонович на невідкладності проведення робіт з пошуку місця для остаточного видалення ДРВ у стабільні геологічні утворення, що є однією з найважливіших умов забезпечення екологічної безпеки держави і сталого її розвитку.

Необхідність подальших комплексних геохімічних досліджень поведінки системи бар'єрів ближньої зони сховища РАВ (матриця – контейнер – глинистий бар'єр) дозволить одержати додаткові дані для проведення моделювання на вибраних ділянках для спорудження ГС РАВ в Україні. Адже створення ГС у найближчі 30-35 років є необхідною умовою сталого розвитку як України, так і її ядерної галузі.

1. Концепция обращения с радиоактивными отходами Украины / Собонович Э.В. (научный руководитель) и др. – Академия наук Украины, 1993. – 132 с.
2. Бухарев В.П., Скворцов В.В., Семенюк М.П., Степанов В.О., Скворцов Д.В., Олександрова Н.В. Районування території зони відчуження та безумовного (обов'язкового) відселення за потенційною придатністю геологічних структур для спорудження централізованого геологічного сховища РАВ / Матеріали семінару: «Дослідження території України для визначення розташування сховищ РАВ глибинного типу». Київ, 25 грудня 1998 рік. – С. 23-30.
3. Скворцов В.В., Олександрова Н.В. Дослідження будови київського ярусу в зоні відчуження з метою пошуку ділянки докембрійського фундаменту для захоронення радіоактивних відходів / Зб. наук. праць ІГНС НАН України. – 2010. – №. 18. – С. 129-139.
4. Site Selection for Radwaste Disposal in Ukraine. Final report / TACIS project No U4.02/93. / Cassiopee. Contract No 95-118-WW 93/06/02 02/B006. December 1996. – 96 p.

5. Деконінк Ж.М., Соботович Е.В., Шестопалов В.М., Скворцов В.В. Дослідження можливості захоронення радіоактивних відходів у глибоких геологічних формаціях. Проект “Кассіопея”. Бюл. екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов’язкового) відселення. – № 13, березень 1999. – С. 64–66.
6. Feasibility Study for an Underground Repository for Long-lived Non-heat-generating Radioactive Waste in Ukraine / P. Bogorinski et al. / EUR 17631, Contract № B7-6340/95/001028/MAR/C3/ – Luxembourg. – 1999. – 96 p.
7. <http://www.igdtp.eu/>
8. <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/WTS-Networks/URF/overview.html>
9. Шабалін Б.Г. Методологія мінералого-геохімічних досліджень на пошуковому етапі створення глибокого сховища радіоактивних відходів та розробка комплексних геохімічних критеріїв для оцінки його безпеки / Шабалін Б.Г. // Мінеральні ресурси України. – 2008. – № 1. – С. 43–46.
10. Шабалін Б.Г. Особливості міграції техногенних актиноідів в геологічному середовищі при захороненні відпрацьованого ядерного палива / Шабалін Б.Г., Бухарев В.П. // Геол. журн. – 2005. – № 4. – С. 71–79.
11. Колябіна І.Л., Шабалін Б.Г., Перкатиий К.Є. Оцінка коефіцієнтів розподілу U, Pu, Np, Am, Cs та Tc в кристалічних породах потенційних ділянок розміщення геологічного сховища в Україні // 36. наук. праць ДУ „ІГНС НАН України”. – 2012. – №. 21 – С. 16-26.
12. IAEA-TECDOC-1177, Extrapolation of short term observations to time periods relevant to the isolation of long lived radioactive waste, IAEA, Vienna, 2000.
13. IAEA-TECDOC-1481. Anthropogenic Analogues for Geological Disposal of High Level and Long Lived Waste, IAEA, Vienna. – 2005. – 73 p.
14. IAEA-TECDOC-1718, Characterization of swelling clays as components of the engineered barriers system for geological repositories, IAEA, Vienna, 2013.p.
15. Шабалін Б.Г. Синтез керамічних матриць на основі штучних сполук зі структурами цирконоліту, пірохлору і гранату / Шабалін Б.Г., Тітов Ю.О. // Мінерал. журнал. – 2009. – Т.31. – №4. – С.49–59.
16. Shabalin B. Ferric titanous hollandite analogues – matrices for immobilization of Cs-containing radioactive waste: synthesis and properties / Shabalin B., Titov Y., Zlobenko B. [at. al.]. // Mineral. Journal. – 2013. – V.35 – N4. – P.12–18.
17. НП 306.4.133-2007 Загальні положення забезпечення безпеки захоронення радіоактивних відходів у геологічних сховищах // К.: – ДКЯР. – 2007.

**Шабалін Б.Г., Злобенко Б.П., Спасова Л.В. ВКЛАД АКАДЕМИКА Э.В. СОБОТОВИЧА В РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХРАНИЛИЩА**

*В статье отражен вклад академика НАН Украины Э.В. Соботовича в развитие научных основ решения проблемы захоронения долгосуществующих радиоактивных отходов в стабильные геологические образования. Показаны перспективы дальнейших исследований в этом направлении, какими являются: развитие научных основ и методик по оценке безопасности подземного хранилища РАО; проведение экспериментального и математического моделирования процессов миграции радиоизотопов в кристаллических породах; разработка научных основ и технологических принципов создания барьерных материалов для обеспечения безопасности хранилищ РАО.*

**Shabalin B.G., Zlobenko B.P., Spasova L.V. CONTRIBUTION OF ACADEMICIAN EMLEN V. SOBOTOVICH IN SOLUTION OF THE PROBLEM OF RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL IN GEOLOGICAL REPOSITORIES.**

*The paper presents the contribution of Prof. Emlen V. Sobotovich, member of National Academy of Sciences of Ukraine, into development of the scientific basis for long-lived radioactive waste disposal in stable geological formations. It is considered that the prospects of further researches are the following: development of the scientific basis and methods for radioactive waste underground repository safety assessment; experimental and mathematical simulation of radioisotope migration processes in crystalline rock; development of the scientific basis and technological concepts for creation of barrier materials for ensuring safety of radioactive waste repositories.*