

ОЧИЩЕННЯ РІДКИХ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ ВІД ЦЕЗІЮ-137 ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГЛИНИСТИХ СОРБЕНТІВ, МОДИФІКОВАНИХ ФЕРОЦІАНІДАМИ ЗАЛІЗА ТА МІДІ**М. А. Петрова**

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79000, Україна. E-mail: marianna.petrova@gmail.com

Робота присвячена розробці наукових основ методу сорбційного очищення рідких радіоактивних відходів, що утворюються при проведенні дезактиваційних заходів. Вивчено процесів вилучення цезію-137 з рідких радіоактивних відходів сорбційним методом із застосуванням композитних сорбентів на основі бентонітових глин Язівського родовища сірки. Сорбенти одержані шляхом модифікування поверхні глинистого мінералу неорганічними речовинами, що мають селективність до цезію – фероціанідами заліза, міді та міді-калію. Визначено залежність сорбції цезію-137 від способу модифікування бентоніту в присутності іонів натрію. Коефіцієнти розподілу цезію при очищенні розчинів, що містять до 2 г/л натрію, сягають 10^6 см³/г. За даними десорбції цезію-137 з відпрацьованих сорбційних матеріалів встановлено механізм адсорбції. Доведено, що сорбція на модифікованих мінералах проходить за рахунок утворення комплексів радіонуклід – метал–модифікатор. Отримані дані свідчать про високу селективність композитних сорбентів та міцне закріплення радіонуклідів в матриці сорбенту.

Ключові слова: цезій-137, фероціаніди, бентоніт, адсорбція.**ОЧИСТКА ЖИДКИХ РАДІОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ОТ ЦЕЗИЯ-137 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛИНИСТЫХ СОРБЕНТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФЕРРОЦИАНИДАМИ ЖЕЛЕЗА И МЕДИ****М. А. Петрова**

Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности

ул. Клепаровская, 35, г. Львов, 79000, Украина. E-mail: marianna.petrova@gmail.com

Работа посвящена разработке научных основ метода сорбционной очистки жидких радиоактивных отходов, образованных при проведении дезактивационных мероприятий. Изучен процесс извлечения цезия-137 из жидких радиоактивных отходов сорбционным методом с применением композитных сорбентов на основе бентонитовых глин Язовского месторождения серы. Сорбенты получены путем модифицирования поверхности глинистого минерала неорганическими веществами, проявляющими селективность к цезию – ферроцианидами железа, меди и меди-калия. Определена зависимость сорбции цезия-137 от способа модифицирования бентонита в присутствии хлорида натрия. Коэффициенты распределения цезия при очистке растворов, содержащих до 2 г/л натрия, достигают 10^6 см³/г. По данным десорбции цезия-137 из отработанных сорбционных материалов установлен механизм адсорбции. Доказано, что сорбция на модифицированных минералах происходит за счет образования комплексов радионуклид – металл-модификатор. Полученные данные свидетельствуют о высокой селективности композиционных сорбентов и прочном закреплении радионуклидов в матрице сорбента.

Ключевые слова: цезий-137, ферроцианиды, бентонит, адсорбция.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Вода є одним з головних природних ресурсів, який використовується промисловістю, енергетикою та міським господарством. Зважаючи на загальний дефіцит чистої води особливо актуальним є завдання очищення стічних вод, серед яких окремою специфікою щодо поводження характеризуються рідкі радіоактивні відходи (РРВ). Їх утворення можливе в результаті порушення правил поводження з радіоактивними матеріалами, розгерметизації контейнерів з джерелами іонізуючого випромінювання, при знятті з експлуатації атомних електростанцій (АЕС) [1, 2], оскільки в результаті проведення дезактиваційних заходів основна частка активності зосереджується у рідкому стані. Особливо гостро питання дезактивації постає при подоланні наслідків аварій на об'єктах ядерної енергетики (АЕС „Фукусіма Даїчі” [3], Чорнобильська АЕС [1]), при реабілітації місцевості [4], забрудненої в результаті акту ядерного тероризму чи використанні зброї з снарядами зі збідненого урану.

Для України проблема дезактивації РРВ актуальна з точки зору подолання наслідків аварії на Чорнобильській АЕС та поводження з „історичними РРВ”, що зберігають у сховищах Державної корпорації „Українське державне об'єднання „Радон”.

Дезактивація РРВ може бути проведена із застосуванням добре вивчених класичних методів водопідготовки та водоочищення, а саме методами коагуляції, флокуляції та мембранними методами. Проте, вони мають ряд недоліків, а саме: недостатню ефективність вилучення Cs-137, низьку продуктивність та високі енергозатрати. Високоєфективні термічні методи недоцільно використовувати для дезактивації РРВ через високу вартість.

На сьогоднішній день сорбційні методи привертають все більшу увагу дослідників провідних ядерних країн світу як метод переробки РРВ [1]. До їх переваг можна віднести простоту апаратного оформлення, низькі енергозатрати та високу ефективність.

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

У випадку очищення великих об'ємів РРВ доцільним є використання природних сорбентів. Проте за сорбційними характеристиками вони значно поступаються синтетичним аналогам [5].

Метою роботи є вивчення процесів адсорбційного очищення РРВ від цезію-137 з використанням матеріалів на основі природних мінералів, модифікованих синтетичними неорганічними речовинами, які проявляють селективність щодо цезію-137.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

При вилученні сорбційними методами відбувається поглинання радіонуклідів твердою фазою за будь-яким механізмом – адсорбція, іонний обмін, співсаджання, оклюзія, адгезія. Такий підхід є ширший за традиційне поняття сорбції, але при розгляді прикладної сторони питання, коли важливим є результат процесу, а не його механізм, він є цілком виправданим [6].

Як адсорбенти застосовували матеріали на основі бентонітової глини Язівського родовища сірки (Львівська обл.), модифікованої високодисперсними неорганічними речовинами: заліза (III), міді (II), міді(II)–калію фероціанідами. Структурні дослідження матеріалів наведені у роботі [7]. Наявність глинистої матриці, що проявляє сорбційні властивості до багатьох органічних та неорганічних сполук, забезпечуватиме широкий спектр речовин, що можуть бути видалені, а присутність у складі сорбентів речовин, що є високоефективними неорганічними сорбентами, забезпечить селективність до цезію.

Реальні технологічні розчини, як правило, містять іони електролітів, концентрація яких на декілька порядків перевищує концентрацію радіонуклідів [1, 6]. При виборі речовин, іони яких могли би виступати типовими конкуруючими іонами, керувалися поєднанням принципу найбільшої конкуруючої здатності та поширеності даного іона в природних водах та РРВ. На основі цього був обраний хлорид натрію як конкурент цезію-137 за сорбційні центри.

В природних прісних водах натрій знаходиться в основному у вигляді хлоридів, його вміст становить 0,6–300 мг/дм³ [6]. В реальних РРВ АЕС України сполуки натрію присутні у вигляді нітратів, хлоридів, оксалатів, карбонатів, фосфатів [1]. Оскільки конкурувати з цезію-137 за сорбційні центри можуть тільки катіони, впливом аніонів на сорбцію знехтувано.

Дослідження проводили із застосуванням модельних розчинів, які готували на основі стандартного розчину CsCl₂ активністю 10⁵ Бк/см³ без носія. Вплив іонів–конкурентів оцінювали за даними сорбції в присутності 0,1 М розчин натрію хлориду. Сорбційні експерименти проводили в пластикових пробірках при співвідношенні „рідина : тверда фаза” 100 мл/г, нейтральному рН та температурі 19°C.

У пробірку поміщали наважку глинистого сорбенту масою 0,02 г та додавали розрахункові об'єми дистильованої води, робочого розчину та розчину цезію–137. Пробірки закривали пластиковими кор-

ками, після чого сорбент приводили в контакт з розчином перемішуванням на ротаміксері протягом 15 с, через 15 хв. процедуру періодично повторювали до настання рівноваги (1 година). Після закінчення дослідів суспензію розділяли центрифугуванням, відбирали аліквоту та проводили вимірювання активності Cs–137 на гама–спектрометрі Canaberra з напівпровідниковим детектором з надчистого германію. Межа визначення – 0,003 Бк/см³.

Ступінь сорбції (S, %) розраховували за зменшенням активності цезію-137 у водному розчині за формулою:

$$S = \frac{A_i - A_e}{A_i} \cdot 100\% \quad (1)$$

де A_i – початкова активність цезію-137 в розчині, Бк/дм³; A_e – активність цезію-137 в розчині після сорбції, Бк/дм³.

Коефіцієнти розподілу (K_d, см³/г) в перерахунок на сухий сорбент розраховували за формулою:

$$K_d = \frac{A_i - A_e}{A_e} \cdot \frac{V}{m} \quad (2)$$

де V – об'єм розчину, см³; m – маса сухого сорбенту, г.

Активність (Бк/г) цезію-137 в сорбенті після досягнення сорбційної рівноваги розраховували за формулою:

$$q_e = (A_i - A_e) \frac{V}{m} \quad (3)$$

Дані сорбції цезію–137 в присутності хлориду натрію наведені в табл. 1 та на рис. 1, 2.

Таблиця 1 – Сорбція цезію–137 в присутності натрію

Сорбційні характеристики	2,3 мг/л Na ⁺	230 мг/л Na ⁺	2000 мг/л Na ⁺
Сорбент фероціанід заліза на глинистій матриці			
Ступінь сорбції S, %	98,1–100	99,7–99,9	99,7–100
K _d · 10 ⁻³ , см ³ /г	4–16	6–38	41–1053
Сорбент фероціанід міді на глинистій матриці			
Ступінь сорбції S, %	99,4–99,9	99,6–99,9	99,8–100
K _d · 10 ⁻³ , см ³ /г	14–32	26,5–112	13–1696
Сорбент фероціанід міді–калію на глинистій матриці			
Ступінь сорбції S, %	99,46–100	99,7–99,9	99,5–99,9
K _d · 10 ⁻³ , см ³ /г	15–18	15–342	15–1090

Очевидно, що присутність натрію не пригнічує сорбцію цезію–137. Ступінь очищення для всіх досліджуваних активностей складає близько 99,8%, коефіцієнти розподілу значно вищі за відповідні величини для природних мінералів [8-9], сорбентів на основі природної сировини [10-12], та модифікованих [13] мінералів, а також композитних матеріалів [14, 15].

Вилучення Cs–137 в присутності високих концентрацій натрію в більшості випадків проходить більш ефективно (рис. 1, криві 2,3). Це може бути спричинене зростанням електропровідності системи, що підвищує сили електростатичної взаємодії між негативно зарядженою поверхнею глинистого міне-

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

ралу та катіоном цезію-137, збільшуючи ймовірність його надходження до поверхні сорбенту.

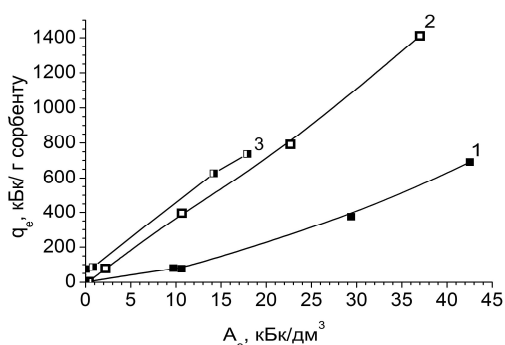


Рисунок 1 – Сорбція цезію-137 на фероціаніді заліза на глинистій матриці в присутності Na^+ : 1 – 2,3 мг/дм³; 2 – 230 мг/дм³; 3 – 2300 мг/дм³

При адсорбції на міді-калію фероціаніді на глинистій матриці (рис. 2) спостерігається незначне зниження сорбційної здатності при адсорбції з розчину з вмістом 2000 мг/л Na^+ , що пояснюється частковим блокуванням сорбційних центрів іонами натрію. Зважаючи на те, що для міді фероціаніду на глинистій матриці подібний ефект відсутній, різницю у сорбції можна пояснити відмінністю структур осаджених на поверхню глинистого мінералу неорганічних речовин (рис. 3).

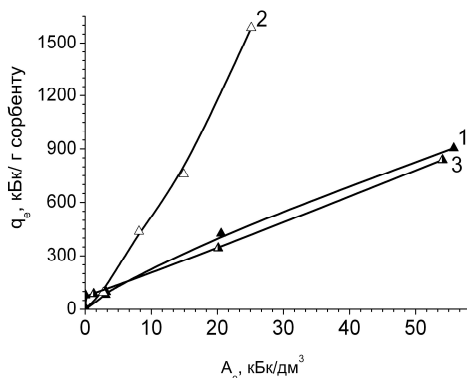


Рисунок 2 – Сорбція цезію-137 на фероціаніді міді-калію на глинистій матриці в присутності Na^+ : 1 – 2,3 мг/дм³; 2 – 230 мг/дм³; 3 – 2300 мг/дм³

Так, до складу міді-калію фероціаніду входять іони калію, які, ймовірно, і піддаються обміну на іони натрію, внаслідок чого матеріал частково втрачає сорбційну активність.

Одержані результати добре узгоджуються з даними попередніх досліджень сорбції цезію на модифікованих глинистих мінералах в присутності металів-імітаторів продуктів корозії обладнання [16], які показали повне вилучення цезію (99%) з розчинів, що містять іони кобальту та мангану.

З огляду на необхідність захоронення відпрацьованих сорбентів їх важливою характеристикою є здатність міцно утримувати сорбовані радіонукліди. Вимивання цезію-137 оцінювали за результатами трикратного промивання відпрацьованого сорбційного матеріалу після сорбції цезію -137 з розчинів активністю 20 kBq/dm³ десорбуючими агентами –

дистильованою водою, яка характеризується підвищеною кислотністю (pH=4,5), що наближає її до ґрунтових розчинів [17]; 0,01 М хлоридною кислотою, 0,01 М калію хлоридом.

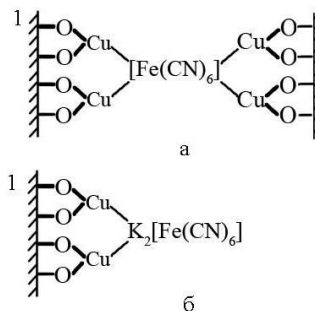


Рисунок 3 – Модифікати, нанесені на поверхню бентонітової глини: а – фероціаніду міді, б – фероціаніду міді-калію: 1 – поверхня глинистого мінералу

Встановлено, що з природної глини цезій-137 десорбується хлоридною кислотою на 45%, хлоридом калію – на 20%. Вимивання цезію водою не перевищує 5%.

Результати десорбційних експериментів по модифікованих сорбентах показали, що максимальне вимивання цезію-137 спостерігається для заліза фероціаніду на глинистій матриці (рис. 4).

Найбільш інтенсивно вимивання здійснюється водою і становить 14%. Для мінералів, модифікованих фероціанідами міді і міді-калію, сорбція цезію-137 незворотна: рівень вимивання активності у усіх випадках становить 0,1–1,2%. Таким чином, цезій-137 міцно утримується в матриці сорбенту.

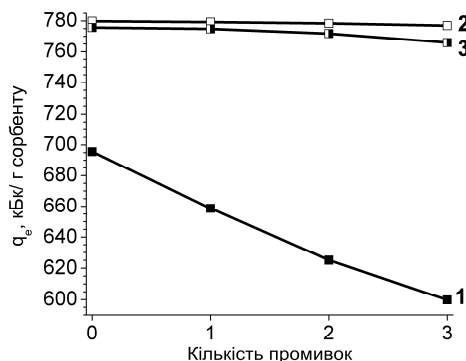


Рисунок 4 – Десорбція цезію-137 з фероціаніду заліза на глинистій матриці: 1 – вода (pH=4,5); 2 – 0,1 М HCl; 3 – 0,01 М KCl

Отримані дані дозволяють висловити припущення, що на природній глині сорбція відбувається за механізмом фізичної сорбції та за рахунок захоплення радіонуклідів поверхневими гідроксильними групами монтморилоніту. При дії хлоридної кислоти відбувається руйнування комплексів, що спричиняє вихід активності у розчин.

На противагу, сорбція на модифікованих мінералах проходить за рахунок утворення комплексів радіонуклід – метал-модифікатор (у випадку заліза

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

фероціаніду на глинистій матриці додатково задіюється фізична сорбція). При сорбції цезію-137 проходить утворення міцних комплексів на поверхні глинистої матриці, що не піддаються руйнуванню у кислому середовищі. Вклад іонного обміну у сорбцію цезію-137 незначний. Отримані дані щодо десорбції цезію-137 свідчать про міцне закріплення радіонуклідів в матриці сорбенту.

ВИСНОВКИ. Дослідження процесу адсорбційного вилучення цезію-137 з модельних розчинів радіоактивних відходів із застосуванням бентонітових глин, модифікованих фероціанідами заліза, міді, міді-калію показали, що сорбенти мають високу сорбційну здатність та селективність щодо Cs-137. Високі концентрації іонів натрію не інгібують сорбцію цезію, що дозволяє прогнозувати можливість застосування сорбційних матеріалів для очищення технологічних розчинів.

Дані десорбції радіонукліду свідчать про можливість надійного кондиціонування відпрацьованих матеріалів з метою захоронення. Окрім цього, сорбційні матеріали на основі модифікованих бентонітових глин Язівського родовища сірки можуть бути використані для облаштування захисних бар'єрів сховищ радіоактивних відходів.

Перевагами застосування сорбційних матеріалів на глинистій матриці є відсутність обмежень за сировиною та низька вартість; простота та надійність утилізації відпрацьованого матеріалу; наявність високорозвиненої поверхні, яка проявляє сорбційні властивості не тільки щодо радіонуклідів, але і до інших іонів та нечутлива до присутності колоїдних речовин; високі ємнісні характеристики щодо цезію; висока селективність, співмірна з аналогічними величинами для деяких синтетичних неорганічних сорбентів, які є значно дорожчими.

ЛІТЕРАТУРА

1. Андронов О. Б., Стрихарь О. Л., Масько А.Н. Проблемы обращения с жидкими радиоактивными отходами АЭС Украины и возможные подходы к их решению. – Чернобыль, 2005. – 36 с.
2. Lee, W. E. (2013), *Radioactive waste management and contaminated site clean-up*, Woodhead Publishing Ltd., Oxford.
3. Sachse, A., Merceille, A., Barré, Y., Grandjean, A., Fajula, F. and Galarneau, A. (2012), "Macroporous LTA-monoliths for in-flow removal of radioactive strontium from aqueous effluents: application to the case of Fukushima", *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 164, pp. 251–258.
4. Лопота В. А. "Технология и технические средства противодействия радиационному терроризму" / *Technical means for prevention of radiation terrorism and liquidation of its consequences, Materials of the International Conference*, October 18–20, 2004. – Санкт-Петербург. – С. 5–21.
5. Тарасевич Ю. И. Природные сорбенты в процессах очистки воды. – К.: Наук. думка, 1981. – 208 с.
6. Милютин В. В. Физико-химические методы извлечения радионуклидов из жидких радиоактив-

ных отходов низкого и среднего уровня активности: автореф. дис. на соискание ученой степени докт. хим. наук: 02.00.14 „Радиохимия”. – Институт физической химии и электрохимии, Москва. 2008. – 49 с.

7. Петрова М. А., Флауерс А. Дж., Петрушка І. М., Кріп І. М. Структурні дослідження глинистих мінералів Язівського родовища сірки, модифікованих фероціанідами та гідроксидами перехідних металів // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2008. – №2. – С. 145–148.

8. Atun, G. (2003), "Adsorption behavior of cesium on montmorillonite-type clay in the presence of potassium ions", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 258, no. 3, pp. 605–611.

9. Iijima, K., Tomura, T. and Shoji, Y. (2010), "Reversibility and modeling of adsorption behavior of cesium ions on colloidal montmorillonite particles", *Applied Clay Science*, vol. 49, iss. 3, pp. 262–268.

10. El-Naggar, M. R., El-Kamash, A. M., El-Dessouky, M.I. and Ghonaim A. K. (2008), "Two-step method for preparation of NaA-X zeolite blend from fly ash for removal of cesium ions", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 154, iss. 1–3, pp. 963–972.

11. Wu, J., Xu, Q. and Bai, T. (2007), "Adsorption behavior of some radionuclides on the Chinese weathered coal", *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 65, iss. 8, pp. 901–909.

12. Celebi, O., Kilikli, A. and Erten, H. N. (2009), "Sorption of radioactive cesium and barium ions onto solid humic acid", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 168, iss. 2–3, pp. 695–703.

13. Sivaiah, M.V., Kumar, S. S., Venkatesan, K. A., and Sasidhar, P. (2004), "Sorption of strontium on zirconia modified vermiculite", *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*, vol. 5, no. 2, pp. 33–36.

14. Ding, D., Zhao, Y., Yang, S., Zhang, Z., Lei, Z. and Yang, Y. (2013), "Adsorption of cesium from aqueous solution using agricultural residue – walnut shell: equilibrium, kinetic and thermodynamic modeling studies", *Water Research*, vol. 47, iss. 7, pp. 2563–2571.

15. Ambashta, R. D., Wattal, P. K., Singh, S. and Bahadur, D. (2003), "Nano-aggregates of hexacyanoferrate (II)-loaded magnetite for removal of cesium from radioactive wastes", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 267, iss. 3, pp. 335–40.

16. Петрова М. А., Мовчан І. О. Вплив кобальту та мангану на адсорбцію радіонуклідів модифікованими глинистими сорбентами // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2013. – Вип.6., №10 (66) – С. 24–27.

17. Petelet-Giraud E., Negrel P., Gourcy L. and Schmidt C. (2007), "Geochemical and isotopic constraints on groundwater-surface water interactions in a highly anthropized site", *Environmental Pollution*, vol. 148, pp. 707–717.

DECONTAMINATION OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE FROM CAESIUM-137 BY CLAY SORBENTS MODIFIED BY FERRIC AND COPPER FERROCYANIDES

M. Petrova

Lviv State University of Life Safety

vul. Kleparivska35, Lviv, 79000, Ukraine. E-mail: marianna.petrova@gmail.com

The article aims to develop the theoretical basis of adsorption treatment for radioactive wastewater, formed after decontamination procedures. The experiments on caesium-137 adsorption with application of composite adsorbents has been performed. The adsorbents were obtained from bentonite clay of Yaziv sulphur mine modified by inorganic substances that demonstrate selectivity for caesium, namely ferric, copper, and copper-potassium ferrocyanides. The modification-related caesium-137 sorption process in presence of sodium ions has been characterized. The distribution coefficients of caesium-137 in presence of 2 g/l sodium ions reach 106 sm³/g. It has been proved that high concentrations of sodium do not inhibit caesium-137 adsorption. Desorption studies allowed to determine the adsorption mechanism. Adsorption mechanism on modified clay is realized via formation of radionuclide – modifying agent complexes, and the radionuclide is irreversibly fixed on sorbent matrix. The research results prove high selectivity of the composite sorbents on the basis of bentonite modified with ferric and copper ferrocyanides for caesium-137.

Key words: caesium-137, ferrocyanides, bentonite, adsorption.

REFERENCES

1. Andronov, O.B., Strykhar, O.L. and Masko A.N. (2005), *Problemy obrashcheniya s zhydkimi radioaktivnymi otkhodami AES Ukrainy i vozmozhnye podkhody k ikh reshenniyu* [Radioactive waste treatment at Ukraine NPP and concepts of solution], Chernobyl, Ukraine.
2. Lee, W. E. (2013), *Radioactive waste management and contaminated site clean-up*, Woodhead Publishing Ltd., Oxford.
3. Sachse, A., Merceille, A., Barré, Y., Grandjean, A., Fajula, F. and Galarneau, A. (2012), "Macroporous LTA-monoliths for in-flow removal of radioactive strontium from aqueous effluents: application to the case of Fukushima", *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 164, pp. 251-258.
4. Lopota, V. A. (2004), "Technical means for prevention of radiation terrorism and liquidation of its consequences", *Technical means for prevention of radiation terrorism and liquidation of its consequences, Materials of the International Conference*, Saint-Petersburg, October 18–20, 2004, pp. 5–21.
5. Tarasevitch Yu. I. (1981), *Prirodnye sorbenty v procesakh ochistki vody*, [Natural adsorbents in water treatment], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
6. Miliutin, V. V. (2008), "Physical and chemical methods for low and medium level radioactive wastewater treatment", Thesis abstract for Doct. Sc. (Chemistry), 02.00.14, Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Moscow, Russian Federation.
7. Petrova, M. A., Flowers, A. G., Petrushka, I. M. and Krip I. M. (2008), "Structural investigation of Yaziv sulfur mine clay modified by ferrocyanides and hydroxides of transition metals", *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, no. 2, pp. 145–148.
8. Atun, G. (2003), "Adsorption behavior of cesium on montmorillonite-type clay in the presence of potassium ions", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 258, no. 3, pp. 605–611.
9. Iijima, K., Tomura, T., and Shoji, Y. (2010), "Reversibility and modeling of adsorption behavior of cesium ions on colloidal montmorillonite particles", *Applied Clay Science*, vol. 49, iss. 3, pp. 262-268.
10. El-Naggar, M.R., El-Kamash, A.M., El-Dessouky, M.I. and Ghonaim A.K. (2008), "Two-step method for preparation of NaA-X zeolite blend from fly ash for removal of cesium ions", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 154, iss. 1–3, pp. 963–972.
11. Wu, J., Xu, Q. and Bai, T.(2007), "Adsorption behavior of some radionuclides on the Chinese weathered coal", *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 65, iss. 8, pp. 901-909.
12. Celebi, O., Kilikli, A. and Erten, H. N. (2009), "Sorption of radioactive cesium and barium ions onto solid humic acid", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 168, iss. 2–3, pp. 695–703.
13. Sivaiah, M.V., Kumar, S.S., Venkatesan, K.A., and Sasidhar, P. (2004), "Sorption of strontium on zirconia modified vermiculite", *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*, vol. 5, no. 2, pp. 33–36.
14. Ding, D., Zhao, Y., Yang, S., Zhang, Z., Lei, Z. and Yang, Y. (2013), "Adsorption of cesium from aqueous solution using agricultural residue – walnut shell: equilibrium, kinetic and thermodynamic modeling studies", *Water Research*, vol. 47, iss. 7, pp. 2563–2571.
15. Ambashta, R.D., Watal, P.K., Singh, S. and Bahadur, D. (2003), "Nano-aggregates of hexacyanoferrate (II)-loaded magnetite for removal of cesium from radioactive wastes", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 267, iss. 3, pp. 335–340.
16. Petrova, M. A., Movchan, I. O. (2013), "Effect of cobalt and manganese on radionuclides adsorption by modified clay sorbents", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6., no. 10(66), pp. 24–27.
17. Petelet-Giraud E., Negrel P., Gourcy L. and Schmidt C. (2007), "Geochemical and isotopic constraints on groundwater-surface water interactions in a highly anthropized site", *Environmental Pollution*, vol. 148, pp. 707–717.