

Comparison of the Methods Based on the Radiometric Analysis and Characteristic X-Ray Radiation for Definition of Strontium by Zeolites

V.V. Levenets, A.Yu. Lonin*, O.P. Omelnik, A.O. Shchur

National Science Center «Kharkov Institute of Physics and Technology» NAS of Ukraine, 1, Akademicheskaya St., Kharkov, 61108, Ukraine; *e-mail: a_lonin@kipt.kharkov.ua

Received: April 07, 2017; Accepted: February 20, 2018

DOI: 10.17721/moca.2018.64-70

The article investigated the sorption properties of natural and synthetic zeolites towards to radioactive and stable isotopes of strontium in static conditions. Have been used various methods for determining the strontium depending on the isotope content. The content of ^{90}Sr was measured by the radiometric method. Determination of the content stable strontium was conducted nuclear-physical methods, according to the characteristic X-rays of the target that has been energized by a proton beam with an energy of 1.6 MeV. Has been defined the correlation coefficient by Pearson's equation. It amounted to 0.9523. This indicates that both methods give an adequate assessment of the sorption characteristics of zeolites. In the experiment have been calculated adsorption coefficients (K_s , %) for the zeolites, which was as follows: for the clinoptilolite 85.00–88.50 %, for the zeolite NaX 91.00–94.00 %, for the zeolite NaA 90.00–90.60 %. It is necessary to take into account that the use of the stable strontium compounds significantly increases the safety of conducting research to determine the sorption ability of sorbents, and allows to do the modeling experiments without using dangerous radioactive isotopes.

Keywords: liquid radioactive waste, strontium, zeolite, radiometric analysis, proton beam, characteristic X-rays

Сравнение методик на основе радиометрического анализа и характеристического рентгеновского излучения для определения стронция с помощью цеолитов

В.В. Левенец, А.Ю. Лонин*, А.П. Омельник, А.А. Щур

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108; *e-mail: a_lonin@kipt.kharkov.ua

Поступила: 07 апреля 2017 г; Принята: 20 февраля 2018 г

DOI: 10.17721/moca.2018.64-70

В работе изучены сорбционные свойства природных и синтетических цеолитов по отношению к радиоактивным и стабильным изотопам стронция в статических условиях. Использованы различные методы определения стронция в зависимости от изотопного содержания. Содержание ^{90}Sr определялось радиометрическим методом, путем регистрации β -распада ^{90}Y . Определение содержания стабильного стронция проводилось ядерно-физическим методом по характеристическому рентгеновскому излучению мишени, возбужденной пучком протонов с энергией 1.6 МэВ. Определен коэффициент корреляции по уравнению Пирсона, который составляет 0.9523. Это указывает на то, что оба метода позволяют дать адекватную оценку сорбционных свойств цеолитов. В эксперименте были рассчитаны коэффициенты сорбции (K_s , %) для цеолитов, которые составили: для клиноптилолита 85.00–88.50 %, для цеолита NaX 91.00–94.00 %, для цеолита NaA 90.00–90.60 %. При этом необходимо учитывать, что использования стабильных соединений стронция значительно повышает безопасность проведения исследований по определению сорбционных способностей сорбентов, позволяя проводить модельные эксперименты, не используя опасные радиоактивные изотопы.

Ключевые слова: жидкие радиоактивные отходы, стронций, цеолит, радиометрический анализ, пучок протонов, характеристическое рентгеновское излучение

Развитие ядерной энергетики приводит к увеличению объемов радиоактивных отходов (РАО), в частности, жидких радиоактивных отходов (ЖРАО). Образование ЖРАО связано с

различными технологическими процессами, в том числе с процессами дезактивации оборудования, помещений и персонала. Жидкие радиоактивные отходы составляют 85% от общего объема

радиоактивных отходов. ЖРАО имеют сложный изотопный состав, в который входят: ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{90}Sr , ^{60}Co и др [1-3].

С учетом этого, остро стоит проблема очистки полученных водных отходов. Существуют различные методы очистки таких РАО, но наиболее перспективным является использование сорбентов. Особое место занимает использование ионообменных сорбентов, как природных, так и синтетических.

При выборе ионообменных сорбентов, когда речь идет о больших объемах жидкостей, необходимо выделить следующее: сложность проведения дезактивационных работ; химическая и радиационная стойкость сорбента; себестоимость сорбента; объемы его производства. Учитывая перечисленное, наиболее эффективным является использование природных ионообменных сорбентов, среди которых цеолиты являются наиболее яркими представителями природных ионообменных сорбентов.

Цеолиты образуют группу алюмосиликатных минералов, которые имеют правильную простран-

ственную структуру. В силикатной решетке цеолитов часть ионов Si^{4+} заменена ионами Al^{3+} , что придает решетке цеолита остаточный отрицательный заряд. Этот заряд компенсируется ионами щелочных и щелочноземельных металлов [4,5]. Для клиноптилолита обменными ионами выступают ионы Na^+ , K^+ , Ca^{2+} . При этом каждый из ионов имеет определенное расположение внутри каналов кристаллической решетки клиноптилолита [4] (рис.1).

Для синтетических цеолитов NaA, NaX характерно более сложное расположение ионов и на основе рентгеноструктурного анализа выделяется 6 мест локализации обменных ионов [4, 5].

Присутствие обменных ионов и обуславливает ионообменные свойства цеолитов. При прохождении реакций ионного обмена ионы, участвующие в процессах обмена, занимают места обменных ионов в структуре цеолитов в соответствии со своим зарядом и размером, с учетом энергии гидратации ионов и ионного радиуса, а также с учетом наличия кристаллической воды и температурных параметров реакции обмена.

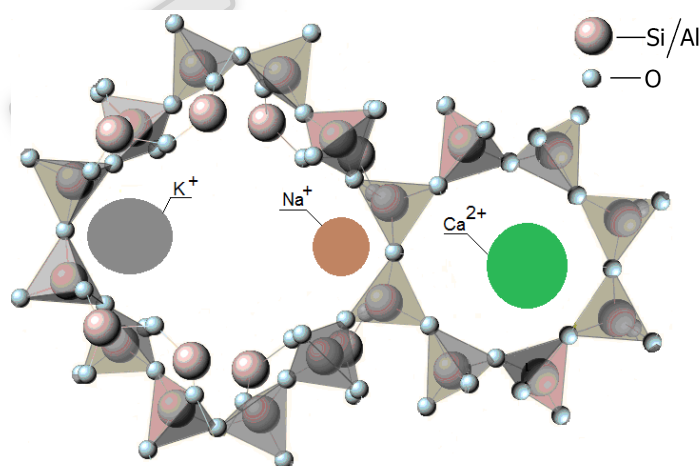


Рис. 1. Схема локализации обменных ионов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) в структуре клиноптилолита.

Одной из важных характеристик цеолитов является отношение Si/Al . По величине этого отношения цеолиты делятся на высококремнистые (природные цеолиты – клиноптилолит, морденит и др.) и низкокремнистые (синтетические цеолиты –

NaA, NaX). Высококремнистые цеолиты обладают высокой термостабильностью, химической и радиационной стойкостью. Но при этом высококремнистые цеолиты имеют меньшую обменную емкость, чем низкокремнистые цеолиты (Табл.1.) [4].

Табл.1. Характеристики клиноптилолита и синтетических цеолитов [4].

Цеолит	Типичная окисная формула	Si/Al	ρ , г/см ³	q, ммоль/г
клиноптилолит (природный)	$(\text{Na}_2, \text{K}_2, \text{Ca})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	4.25–5.25	2.16	2.2
цеолит NaA (синтетический)	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$	0.7–1.2	1.99	5.5
цеолит NaX (синтетический)	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2.5\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.0–1.5	1.93	4.7

Примечание. ρ - плотность, г/см³; q - обменная ёмкость, ммоль/г.

Исследуя природные цеолиты, необходимо учитывать, что в зависимости от месторождения и глубины добычи, изменяется состав обменных ионов и места локализации внутрикристаллической воды. Изменение этих факторов ведет к существенному изменению сорбционных свойств цеолитов. Так, американский минералогический каталог выделяет семь модификаций клиноптилолита [6]. Учитывая высокую термальную и радиационную стойкость природных цеолитов, представляет большой интерес изучение сорбционных свойств цеолитов в отношении радионуклидов, в том числе ^{90}Sr , как для самостоятельного использования, так и включения в состав комбинированных сорбентов [7-19]. Разработка комбинированного сорбента на основе природного и синтетического сорбента представляет очень большой интерес [20,21]. Для проведения таких исследований необходимо проведение предварительного исследования и сравнения сорбционных свойств природного цеолита (клиноптилолита) и синтетических цеолитов.

В составе жидких радиоактивных отходов значительную часть составляет изотоп ^{90}Sr , но при этом в растворах присутствуют стабильные соединения стронция. Поэтому изучение сорбционных свойств цеолитов в отношении стронция играет большую роль в их возможном использовании в ядерной энергетике.

При этом необходимо учитывать, что существуют разные аналитические физические методы определения стронция, позволяющие дать количественную оценку сорбционных свойств цеолитов. Выбор метода зависит от изотопного состояния стронция. Один из методов основан на регистрации ^{90}Sr в модельных экспериментах. Это позволяет более точно моделировать взаимодействие сорбента с радиоактивным стронцием. Однако, при этом существует потенциальная угроза здоровью персонала, проводящего исследования, а сам эксперимент требует дополнительного радиационного контроля и мер физической безопасности.

Другой метод основан на возбуждении мишеней со стабильными изотопами стронция пучком протонов, с последующей регистрацией характеристического рентгеновского излучения К-серии стронция (метод ХРИ).

Целью исследований было сравнение аналитических технологий определения содержания изотопа радиоактивного ^{90}Sr и стабильных изотопов стронция при изучении процессов сорбции стронция из растворов природными и синтетическими цеолитами в статических условиях.

Для проведения сравнения использовались данные о радиометрическом определении ^{90}Sr в сорбционных процессах на природном цеолите – клиноптилолите и синтетических цеолитах - NaX

и NaA [17-19]. В работах использовался раствор радионуклида ^{90}Sr с удельной активностью 1.76×10^6 Бк/дм³ без носителя. Сорбция проводилась в статических условиях. Сорбент (0.05 г) перемешивали с 10 мл раствора, содержащего радионуклид Sr на протяжении 7 дней [22-25].

Радиоактивность проб ^{90}Sr определяли после достижения его равновесия с дочерним ^{90}Y . При этом происходила регистрация электронов β -распада ^{90}Y , что позволяет дать оценку содержания ^{90}Sr . Радиометрические измерения сухого остатка проб проводили на радиометре NRR 610 "Tesla". Относительная погрешность измерений радиоактивности не превышала 3.0% [22-25].

При рассмотрении радиометрического метода определения стронция необходимо учитывать следующие недостатки:

- метод позволяет проводить анализ только на модельных растворах и не пригоден для оценки содержания стронция в ЖРАО. Это связано в первую очередь с тем, что в состав ЖРАО наряду со ^{90}Sr входят его стабильные изотопы. Их общее количество примерно в 10^6 раз больше, чем ^{90}Sr [26];
- метод не позволяет сохранять мишени, учитывая их радиоактивность;
- метод не дает возможности провести идентификацию стронция;
- метод требует специальной подготовки персонала, наличия оборудованной радиохимической лаборатории и разрешения на работу от соответствующих органов.

При подготовке и проведению исследований сорбции со стабильным стронцием количество сорбента и экспериментального раствора брали в количествах, идентичных исследованиям со ^{90}Sr [22-25].

Материалы и методы исследований

Объекты исследований (природный и синтетические цеолиты). В ходе работы использовали природный цеолит – клиноптилолит и синтетические цеолиты - NaX и NaA. Клиноптилолит относится к высококремнистым цеолитам и характеризуется отношением $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 4-10$. Для экспериментов был использован клиноптилолит, добываемый в Украине (Сокирницкое месторождение в Закарпатской области). А цеолиты NaX и NaA относятся к низкокремнистым цеолитам и имеют отношением $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2-3$. При проведении эксперимента использовали частицы сорбентов размером 0.1-0.2 мм.

Методика определения стронция по характеристическому рентгеновскому излучению, возбуждаемому пучком протонов.

Эксперименты проводили в статических условиях 7 дней. В работе использовался раствор стабильных изотопов азотнокислого стронция с концентрацией $6.66 \cdot 10^{-4}$ М. В ходе

эксперимента брали минимальное количество стабильного стронция, чтобы смоделировать ситуацию с использованием ^{90}Sr без носителя [22-25]. В качестве растворителя использовали дистиллированную воду. Сорбция проводилась в статических условиях. Навеску сорбента массой 0.05 г помещали в 10 мл раствора, содержащего стронций. Соотношение фаз в эксперименте (жидкость : сорбент) составляет - 200:1, сорбент - твердая фаза. Раствор подвергали периодическому перемешиванию. На протяжении эксперимента периодически отбирали пробы для определения сорбционного взаимодействия в системе раствор – сорбент. Для исследований на пучке протонов из проб с различным содержанием стронция готовили мишени на углеродной подложке. Раствор, содержащий стронций, наносили на углеродную подложку и высушивали при нагреве до 35 °С.

Аналитическая часть работы выполнялась на аналитическом ядерно-физическом комплексе «Сокол» (АЯФК «Сокол») [27, 28]. Возбуждение атомов стронция проводили пучком протонов с энергией $E_p \approx 1600$ кэВ, среднем токе $I_p \approx 150$ нА. Для измерения заряда протонов камера использовалась как цилиндр Фарадея. Облучение образцов происходило в вакууме при давлении 10^{-4} Па. Вывод рентгеновского излучения из камеры осуществляли через окошко из бериллиевой фольги толщиной 25 мкм. Регистрация возбуждаемого характеристического рентгеновского излучения К-серии атомов стронция проводили полупроводниковым детектором Ge(HP). Детектор был установлен под углом 135° к пучку протонов, за окном из бериллиевой фольги толщиной 25 мкм (рис.2) [27].

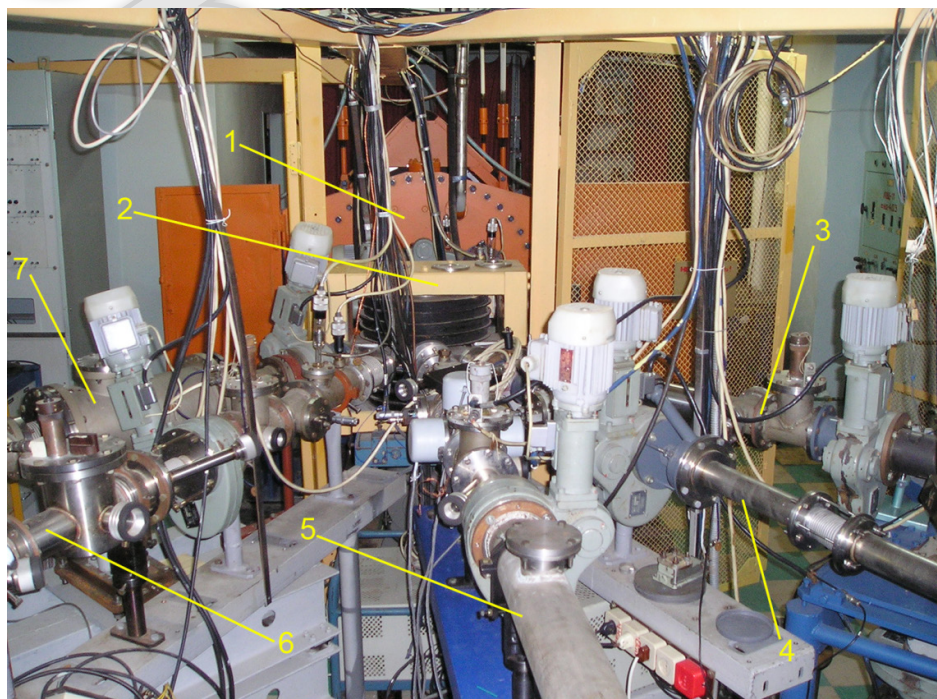


Рис. 2. АЯФК «Сокол» [27]. 1- малогабаритный электростатический ускоритель, 2- раздаточный магнит, 3- влево 45°-канал ХРИ и МИЯР; 4 - влево 26° - канал выпуска пучка в атмосферу; 5 - влево 5°40' -канал облучения материалов ионами газов; 6-вправо 26°-канал РОР, МЯР, ЯО; 7 - 45° вправо –ядерный микрозонд.

Ge(HP) детектор на основе сверхчистого кристалла германия с толщиной кристалла 8.5 мм и площадью чувствительной поверхности 25 мм² имеет входное бериллиевое окно диаметром 18 мм и толщиной 25 мкм. Детектор изготовлен так, что его главный блок находится при температуре, близкой к температуре кипения жидкого азота. Относительная погрешность измерений не превышала 2.90 %. В процессе проведения анализа используют относительно невысокие энергии частиц пучка (до 1.6 МэВ). Этой энергии недостаточно для формирования наведенной активности образца. Указанная особенность метода

позволяет сохранять образцы неповрежденными длительное время и подвергать их повторному анализу при необходимости.

Типичный вид спектра х.р.и. исследуемой мишени при определении стронция, позволяет провести идентификацию стронция по Ka – серии стронция. На рис. 3 представлен спектр углеродной матрицы с сухим остатком дистиллированной воды и спектр мишени, содержащей минимальное количество стронция (0.0012 мг), используемого в определениях. В спектре сухого остатка воды нет линий, мешающих определению стронция.

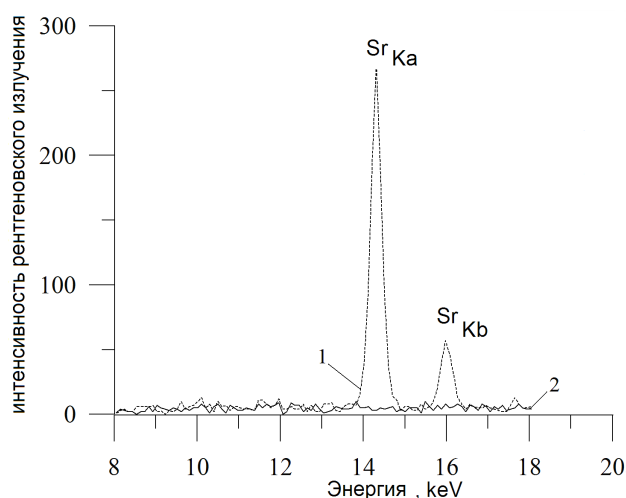


Рис. 3. Спектры характеристического рентгеновского излучения углеродной мишени, содержащей 0.0012 мг (1) стронция и с сухим остатком воды (2) ($E_p = 1600$ keV, $I_p = 200$ nA, $Q_p = 45$ mC) [15].

Использование метода ХРИ позволяет решить следующие проблемы, возникающие при использовании радиометрического метода определения стронция:

- методика позволяет определять все изотопы стронция;
- мишени сохраняются для повторного анализа;
- существует возможность проводить идентификацию стронция по $K\alpha$ – серии спектра х.р.и.;

- метод дает возможность проводить модельные эксперименты в условиях химической лаборатории.

Результаты исследований и их обсуждение

Для количественной характеристики сорбционного взаимодействия природного и синтетических цеолитов со стронцием использовался коэффициент сорбции (K_{Sl} и K_{Sc} , %), который рассчитывали по формулам:

$$K_{Sl} = \frac{(I_0 - I_p) \cdot 100\%}{I_0} \quad (1)$$

$$K_{Sc} = \frac{(C_0 - C_p) \cdot 100\%}{C_0} \quad (2)$$

где I_0 и I_p – начальная и равновесная радиоактивность раствора, имп/с; C_0 и C_p – начальная и равновесная концентрации раствора, мг/мл;

При этом для определения стронция используются разные методы – радиометрический (РМА) и ХРИ (таблицах 2, 3).

Результаты характеризуются большой схожестью. Для клиноптилолита коэффициент сорбции в отношении стронция составил $K_{Sl} = 85.00\%$, а $K_{Sc} = 88.00\%$. Для цеолита NaX $K_{Sc} = 94.00\%$, а $K_{Sc} = 91.00\%$. Для цеолита NaA $K_{Sc} = 90.00\%$, а $K_{Sc} = 90.60\%$

Таблица 2. Определение K_{Sl} с использованием радиометрического метода определения ^{90}Sr ($n = 3$, $P = 95\%$) [22-25].

Сорбент	K_{Sl} , %			$\overline{K_{Sl}}$, %	Δx	ϵ , %	S_x	S
	1	2	3					
Цеолит NaA	90.0	89.0	91.0	90.0	1.0	1.11	2.45	1.42
Цеолит NaX	94.0	92.0	96.0	94.0	2.0	2.13	4.89	2.82
Клиноптилолит	85.0	83.0	87.0	85.0	2.0	2.35	4.89	2.82

Примечание. n – число измерений; P – доверительный интервал; Δx – абсолютная погрешность; ϵ , % – относительная погрешность; S_x – среднее квадратическое отклонение; S – стандартная ошибка.

Таблица 3. Определение K_{Sc} с использованием метода ХРИ для стабильных изотопов Sr ($n = 3$, $P = 95\%$).

Сорбент	K_{Sc} , %			$\overline{K_{Sc}}$, %	Δx	ϵ , %	S_x	S
	1	2	3					
Цеолит NaA	90.6	89.6	91.6	90.6	1.0	1.10	2.47	1.43
Цеолит NaX	91.0	89.0	92.0	91.0	1.5	1.65	3.67	2.12
Клиноптилолит	88.5	86.0	91.0	88.5	2.5	2.82	6.12	3.54

Примечание. n – число измерений; P – доверительный интервал; Δx – абсолютная погрешность; ϵ , % – относительная погрешность; S_x – среднее квадратическое отклонение; S – стандартная ошибка.

Поэтому была проведена оценка коэффициента корреляции, характеризующего степень линейной зависимости между результатами определения коэффициента сорбции стронция различными методами. Он рассчитывался по формуле:

$$R_{X,Y} = \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (3)$$

где $\bar{X}$, $\bar{Y}$ – выборочные средние X_m (результаты РМА) и Y_m (результаты ХРИ).

Полученное значение $R_{x,y}$ составляет 0.952, и это указывает на то, что оба метода позволяют получить адекватную оценку сорбционных свойств цеолитов. А это дает возможность проводить модельные эксперименты, используя стабильные соединения стронция, что значительно повышает безопасность проводимых исследований.

Литература:

1. Abdel-Rahman R.O., Ibrahim H.A., Hung Yung-Tse. Liquid Radioactive Wastes Treatment: A Review. *Journal Water*, 2011, 3(2), 551 – 565.
2. International Atomic Energy Agency. Classification of Radioactive Waste. General Safety Guide GSG-1. IAEA, Vienna, 2009, P. 68.
3. Запорозчук А. Класифікація радіоактивних відходів відповідно до рекомендацій МАГАТЕ. *Журнал «Актуальні проблеми міжнародних відносин»*, 2011, 101(2), 22-27.
4. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита. Пер. с англ. Москва: Мир, 1976. С. 606.
5. Рабо Дж. Химия цеолитов и катализ на цеолитах. Том 1. Пер. с англ. Москва: Мир, 1980. С. 506.
6. American Mineralogist Crystal Structure Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/result.php>
7. Yıldız B., Erten H. N., Kis M. The sorption behavior of Cs⁺ ion on clay minerals and zeolite in radioactive waste management: sorption kinetics and thermodynamics. *J. Radioanalyt. Nucl. Chem.* 2011, 288, 475–483
8. Nikashina V. A., Serova I. B., Kusmina T. G., Roschina I. A., Gromyak I. N., Lihareva N., Petrov O. Features of kinetics of Sr²⁺ sorption from surface drinking water on clinoptilolites from Russian and Bulgarian deposits. *Zastita Materijala*. 2016, 57, 545 – 550.
9. Sachse A., Merceille A., Barre Y., Grandjean A., Faila F., Galarneau A. Macroporous LTA-monoliths for in-flow removal of radioactive strontium from aqueous effluents: application to the case of Fukushima. *Micropor. Mesopor. Mater.* 2012, 164, 251-258.
10. Gomonaj V., Gomonaj P., Golub N., Szeresh K., Charmas B., Leboda R. Compatible Ad-

Заключение

В ходе исследований проведено сравнение сорбции цеолитами стабильных ионов стронция и ⁹⁰Sr. Достижение сорбционного равновесия достигнуто в течение 168 часов. Определение ⁹⁰Sr проводят радиометрическим методом. Для определения содержания стабильного стронция использовали метод ХРИ. Использование обоих методов для количественной оценки содержания стронция, позволило дать, адекватную оценку сорбционных свойств цеолитов. Полученные результаты подтверждают идеи возможности моделирования с использованием стабильных соединений стронция для оценки сорбционных характеристик цеолитов. Определенные в ходе работы коэффициенты сорбции (K_s , %) для цеолитов составили: для клиноптилолита 85.00 – 88.50 %, для цеолита NaX 91.00 – 94.00 %, для цеолита NaA 90.00 – 90.60%.

sorption of Strontium and Zinc Ions as Well as Vitamins on Zeolites. *Adsorption Science & Technology*. 2000, 4 (18), 295 – 306.

11. O'Day P.A., Newville M., Neuhoof P.S., Sahai N., Carroll S.A. X-Ray Absorption Spectroscopy of Strontium(II) Coordination. *J. Coll. Interf. Sci.* 2000, 222, 184 – 197.

12. Rabideau A.J., Benschoten J.V., Patel A., Bandilla K. Performance assessment of a zeolite treatment wall for removing Sr-90 from groundwater. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2005, 79, 1–24.

13. Yusan S., Erenturk S. Adsorption Characterization of Strontium on PAN/Zeolite Composite Adsorbent. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 2011, 1, 6–12.

14. Esfandian H., Fakhraee H., Azizi A. Removal of Strontium Ions by Synthetic Nano Sodalite Zeolite from Aqueous Solution. *International Journal of Engineering*. 2016, 29 (2), 160-169.

15. Araissi M., Ayed I., Elaloi E., Moussaoui Y. Removal of barium and strontium from aqueous solution using zeolite 4A. *Water Science et Technology*. 2016, 73 (7), 1628-1636.

16. Abd El-Rahman K. M., El-Sourougy M. R., Abdel-Monem N. M., Ismail I. M. Modeling the Sorption Kinetics of Cesium and Strontium Ions on Zeolite A. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*. 2006, 7 (2), 21–27.

17. Handley-Sidhu S., Mullan T. K., Grail Q., Albadarneh M., Ohnuki T., Mac L.E. Influence of pH, competing ions, and salinity on the sorption of strontium and cobalt onto biogenic hydroxyapatite. *SCIEN-TIFIC RepoRts*. 2016, 6, 1-8.

18. Faghihian H., Moayed M., Firooz A., Iravani M. Synthesis, characterization, and evaluation of a ferromagnetically modified natural zeolite composite

for removal of Cs⁺ and Sr²⁺. *Clays and Clay Minerals*. 2013, 61(3), 193–203.

19. Kartel M., Galysh V. New composite sorbents for cesium and strontium ions sorption. *Chemistry Journal of Moldova*. 2017, 12(1), 37–44.

20. Levenets V.V., Lonin A.Yu., Omelnik O.P., Shchur A.O. Comparison the sorption properties of clinoptilolite and synthetic zeolite during sorption strontium from the water solutions in static conditions: Sorption and quantitative determination of strontium by the method PIXE. *J. Environ. Chem. Engin.* 2016, 4, 3961–3966.

21. Герасимова Л.Г., Майоров Д.В., Маслова М.В., Матвеев В.А., Щербakov В.М. Разработка технологии получения и применения сорбентов радионуклидов на основе техногенных отходов обогащения апатито-нефелиновых руд. *Альтернативная энергетика и экология: Междунар. науч. журнал*. 2005, 2 (22), 39–41.

22. Lonin A.Yu., Krasnopyorova A.P. Studying sorption properties of a mixture of natural and synthetic zeolites in respect of radionuclides ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations*. 2009, 3(51), 67–70.

23. Краснощёва А.П., Лонин А.Ю., Юхно Г.Д., Лебедева Л.Т., Далецкая Н.В. Сорбционно-селективные свойства природного цеолита клиноптилолита в отношении радионуклидов ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs.

Вестник Харьковского национального университета. Химия. 2001, 7 (30), 143–148.

24. Краснощёва А.П., Юхно Г.Д., Лебедева Л.Т., Далецкая Н.В., Лонин А.Ю. Сорбционно-селективные свойства некоторых синтетических цеолитов в отношении радионуклидов ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs. *Вестник Харьковского национального университета. Химия*. 2002, 8 (31), 119–125.

25. Lonin A.Yu., Krasnopyorova A.P. Influence of different factors on sorption of ⁹⁰Sr by natural and synthetic zeolites. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations*. 2005, 6 (45), 130–132.

26. Локшин Э.П., Иваненко В.И., Авсарагов Х.Б., Калинин В.Т. Дезактивация жидких радиоактивных отходов с повышенным содержанием [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.kolasc.net.ru/russian/innovation_ksc/3.6.pdf

27. Levenets V.V., Lonin A.Yu., Omelnik O.P., Shchur A.O. PIXE in the studies of stable cesium sorption from water solutions. *Journal X-Ray Spectrometry*. 2015, 44 (6), 447–450.

28. Lonin A.Yu., Levenets V.V., Neklyudov I.M., Shchur A.O. The usage of zeolites for dynamic sorption of cesium from waste waters of nuclear power plants. *J. Radioanal. and Nuclear Chemistry*. 2015, 303 (1), 831 – 836.