

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ЦЕОЛИТОВ

Константин Константинович Размахнин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Читинский филиал, 672039, Россия, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30, кандидат технических наук, доцент, зав. филиалом, тел. (914)466-17-37, e-mail: constantin-const@mail.ru

Виталий Витальевич Милютин

Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, 119071, Россия, г. Москва, Ленинский пр., 31, корп. 4, доктор химических наук, профессор, зав. лабораторией хроматографии радиоактивных элементов, тел. (495)335-92-88, e-mail: vmilyutin@mail.ru

Алиса Николаевна Хаткова

Забайкальский государственный университет, 672039, Россия, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30, доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной работе, тел. (3022)41-44-44, e-mail: alisa1965.65@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы использования природных цеолитов Восточного Забайкалья при решении задач в области геоэкологии, приведен химический и минеральный состав природных цеолитов Восточного Забайкалья, обозначены основные направления применения цеолитсодержащих пород в горнодобывающей и горноперерабатывающей промышленности, а также при защите окружающей среды при электроснабжении горных предприятий с использованием атомной энергии, описаны экспериментальные исследования по очистке сточных вод промышленных предприятий от радионуклидов и других загрязняющих компонентов, приведены характеристики сорбции природными цеолитами ^{137}Cs из раствора 0,1 и 1,0 моль/дм³ нитрата натрия, установлены зависимости сорбции ^{137}Cs от концентрации ионов натрия в растворе и от размера гранул сорбента, приведены результаты исследований по сорбции природными цеолитами радионуклида ^{90}Sr и ионов Ca^{2+} .

Ключевые слова: геоэкология, природные цеолиты, направления применения, комплексное использование, радионуклиды, сорбция.

GEO-ECOLOGICAL ASPECTS OF NATURAL ZEOLITES USING

Konstantin K. Razmahnin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, Chita Branch, 30, Alexandro-Zavodskaya St., Chita, 672039, Russia, Ph. D., Associate Professor, Head of the Chita Branch, phone: (914)466-17-37, e-mail: constantin-const@mail.ru

Vitaly V. Milyutin

Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electro Chemistry, building 4, 31, Leningradsky Prospect St., Moscow, 119071, D. Sc., Professor, Head of the Laboratory of Chromatography of Radioactive Elements, phone: (495)335-92-88, e-mail: vmilyutin@mail.ru

Alisa N. Khatkova

Transbaikal State University, 30, Alexandro-Zavodskaya St., Chita, 672039, Russia, D. Sc., Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Work, phone: (3022)41-44-44, e-mail: alisa1965.65@mail.ru

In the paper the issues of using of natural zeolites from Eastern Transbaikal for solving geoecological problems are considered. Chemical and mineral composition of natural zeolites from Eastern Transbaikal is presented. Main directions of the application of zeolite containing rocks at mining industry and for environmental protection at atomic power provision mining enterprises are outlined. Experimental investigations for decontaminating of waste water of industrial enterprises from radionuclide and other contaminants. Characteristics of sorption with natural zeolites ^{137}Cs from solution 0.1 and 1.0 mol/l sodium nitrate are represented. Sorption dependences ^{137}Cs from concentration of sodium ions in solution and from size of sorbent granules are established. Results of investigation of sorption with natural zeolite of radionuclide ^{90}Sr and ions Ca^{2+} .

Key words: geo-ecology, natural zeolites, application directions, complex using, radionuclides, sorption.

Введение

Сточные воды горной промышленности оказывают значительное воздействие на состояние компонентов окружающей природной среды. В связи с бурным развитием горной промышленности в России, определяющим постоянное значительное увеличение выпускаемых объемов продукции и непрерывным образованием существенных объемов отходов производства, количество сточных вод обогатительных фабрик, карьеров, шахт и рудников имеет постоянную тенденцию к росту. К данному перечню можно добавить стоки котельных и теплоэлектростанций горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий, стоки атмосферных вод, а также шахтные и карьерные воды. При этом сточные воды предприятий горнопромышленного комплекса зачастую характеризуются повышенным содержанием в них ионов металлов, различных химических соединений (в том числе флотореагентов), коллоидных минеральных частиц, нефтепродуктами, органических и бактериальных веществ, токсичных и радиоактивных элементов. К основным свойствам, которыми обладают сточные воды предприятий горной промышленности можно отнести: повышенную щелочность, кислотность, жесткость, повышенное содержание солей и взвешенных веществ (мутность).

Очистке сточных вод горнопромышленных предприятий от ионов цветных металлов, химических соединений, взвешенных минеральных частиц и нефтепродуктов посвящено большое количество исследований [4,5,6,7]. При этом слабо изученным остается вопрос применения природных цеолитов Восточного Забайкалья, где сосредоточены крупные запасы цеолитсодержащих пород (около 70% от общероссийских запасов), в очистке вод, используемых для нужд горнопромышленных предприятий, а также сточных вод предприятий, являющихся поставщиками энергии для горнопромышленного комплекса (либо планируемым к введению в эксплуатацию), от радиоактивных элементов. К таким элементам можно отнести радионуклиды цезия, стронция, кадмия, урана и др.

Предлагаемая в последние годы концепция по применению атомных станций малой мощности для горнопромышленных предприятий, находящихся в отдаленных районах страны приобретает все больше сторонников [1, 2, 3]. При этом важной проблемой использования атомной энергии в горнопромышленной сфере является обеспечение безопасности эксплуатации, в том числе очистка сточных вод предприятий от радионуклидов.

При эксплуатации предприятий ядерного топливного цикла и ядерных энергетических установок образуется большое количество жидких радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности, переработка которых, является неотъемлемой частью обращения с радиоактивными материалами.

В настоящее время для извлечения радионуклидов из растворов наиболее часто используются методы, основанные на сорбционных, осадительных и мембранных процессах [1-11]. Выбор того или иного метода зависит от химического и радионуклидного состава жидких радиоактивных отходов и определяется состоянием радионуклидов в растворе.

Наиболее актуальной задачей при переработке жидких радиоактивных отходов является извлечение долгоживущих и высокотоксичных радионуклидов цезия, стронция, кобальта, плутония и др. Для очистки природных и сточных вод от радионуклидов широко используются сорбционные методы [4, 5, 7]. В качестве сорбентов используют органические ионообменные смолы, а также неорганические сорбенты, как синтетические, так и природного происхождения [6]. Основным преимуществом сорбентов на основе природных материалов является их доступность и низкая стоимость. Среди природных сорбентов наибольшее применение для очистки растворов от радионуклидов получили различные алюмосиликатные минералы, в частности, природные глины различного состава [4]. Данный тип сорбентов используется, в основном для извлечения ионных форм радионуклидов цезия и стронция. Сорбция указанных радионуклидов протекает за счет наличия в структуре сорбентов обменных ионов натрия, калия, магния, кальция и др. Для повышения ионообменных характеристик алюмосиликатных минералов их подвергают модифицированию химическими или термическими методами.

В данной работе были изучены сорбционные характеристики по отношению к радионуклидам стронция и цезия различных природных и синтетических цеолитов с целью определения возможности их использования для очистки радиоактивнозагрязненных техногенных и природных вод.

Представленные данные показывают, что синтетические и природные цеолиты обладают определённой селективностью по отношению к радионуклидам Cs и Sr. Цеолиты используются в основном для очистки малосолевых сточных вод, не содержащих больших количеств конкурирующих ионов. Сорбция радионуклидов Cs и Sr наиболее эффективно протекает в нейтральной и слабощелочной среде. После насыщения радионуклидами отработанный сорбент направляют на захоронение вместе с твёрдыми радиоактивными отходами.

В процессе проведения исследований были проведены испытания сорбционных характеристик природных цеолитов (клиноптилолитов) Забайкальского края по отношению к радионуклидам ^{137}Cs и ^{90}Sr . Были предоставлены образцы клиноптилолитов следующих месторождений: Бадинское – КЛ (Бад), Холинское – КЛ (Хол), Шивыртуйское - КЛ (Шив), Талан-Гозагорское - КЛ(Т-Г).

Образцы отличались гранулометрическим составом и способом обогащения (магнитная сепарация и/или ультразвуковая обработка).

Химический и минералогический состав цеолитов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав цеолитсодержащих туфов Восточного Забайкалья

Компоненты	Месторождения, среднее содержание компонентов, %			
	Шивыртуйское	Бадинское	Холинское	Талан–Гозагорское
SiO ₂	62,90	68,50	65,62	53,12
P ₂ O ₅	0,08	0,08	0,0004	0,33
Al ₂ O ₃	13,61	10,57	12,21	16,63
TiO ₂	0,34	0,18	0,07	1,50
Fe ₂ O ₃	3,00	0,68	1,25	11,40
FeO	0,14	0,07	0,06	0,32
CaO	0,61	2,52	2,07	5,82
MgO	1,51	0,88	0,64	1,97
Na ₂ O	1,36	0,24	1,90	3,45
K ₂ O	4,04	3,12	4,14	1,78
S _{общ.}	0,007	<0,05	0,016	0,041
MnO	0,11	0,03	0,14	0,08
H ₂ O	3,88	5,10	3,82	1,08
п.п.п.	9,16	7,70	8,22	3,28

Таблица 2

Минеральный состав цеолитсодержащих пород

Минерал	Месторождение, содержание минеральных фаз, %			
	Шивыртуйское	Холинское	Бадинское	Талан–Гозагорское
Клиноптилолит	45 – 65	60 – 66	63 – 74	–
Морденит	–	–	7	–
Шабазит	–	–	–	8 – 10
Монтмориллонит	15 – 20	3 – 5	3 – 5	8 – 10
Гидрослюды	3 – 5	–	–	2 – 3
Кварц	3 – 10	3 – 5	1 – 3	5 – 10
Кальцит	2 – 5	–	–	~2
Микроклин	3 – 5	3 – 5	–	–
Плагиоклазы	–	–	–	–
Кристобалит	2 – 3	10 – 12	15 – 18	–
Пироксены	–	–	–	~21
Рентгеноаморфная фаза	<5	10 – 12	<10	–
Распределение железа по фазам, %, отн. вес.:				
Гематит	32,3/0,40	6,7/0,06	3,8/0,02	59,3/4,88
Монтмориллонит	56,4/0,71	40/0,37	40/0,21	9,4/0,77
Гидрослюда, тонкодисперсные гидроксиды железа	11,3/0,14	53,3/0,49	5,62/0,30	21,2/1,74
Оливин	–	–	–	10,1/0,83

Для получения сравнительных характеристик, кроме вышеперечисленных образцов при испытаниях использовали клиноптилолиты следующих месторождений: «Нижний Требавец», Словакия- КЛ(НТ), «Белый Пласт», Болгария- КЛ(БП), «Сокирница», Украина - КЛ(Сок).

Кроме вышеперечисленных сорбентов для испытаний использовали следующие сорбенты: ГЛ(Б) - природная бентонитовая глина (Белгородская обл.), NaA - синтетический цеолит типа А, ТУ 2163-003-15285215-2006, промышленная партия, производитель-Ишимбайский спецхимзавод катализаторов (Республика Башкортостан), ФНС - неорганический сорбент на основе ферроцианида никеля-калия, нанесенного на поверхность силикагеля, опытно-промышленная партия, ТУ 2641-003-51255813-2007, производитель - ИФХЭ РАН, МДМ - сорбент на основе модифицированного диоксида марганца (ТУ 2641-001-51255813-2007), промышленная партия, производитель - ИФХЭ РАН.

Методика испытаний

Сорбционные характеристики образцов определяли на примере сорбции микроколичеств радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr . Эксперименты проводили в статических условиях путем непрерывного перемешивания навески воздушно-сухого сорбента массой около 0,05 или 0,1г, взвешенной с точностью 0,0001г с 20 см³ раствора в течение 48 часов. Затем смесь фильтровали через бумажный фильтр «белая лента» и определяли в фильтрате удельную активность радионуклидов. По результатам анализов рассчитывали значения коэффициента распределения (K_d) соответствующего радионуклида по формуле (1):

$$K_d = \frac{A_0 - A_p}{A_p} \times \frac{V_p}{m_c} \quad (1)$$

где A_0 , A_p – соответственно удельная активность радионуклида в исходном растворе и в фильтрате, Бк/дм³;

V_p – объем жидкой фазы, см³;

m_c – масса сорбента, г

Удельную активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в растворах определяли прямым радиометрическим методом с использованием спектрометрического комплекса СКС-50М («Грин стар технолоджиз», г. Москва) с использованием гамма - и бета спектрометрического тракта соответственно. Пробы, содержащие ^{90}Sr , перед измерением выдерживали в течение не менее 14 суток для установления радиоактивного равновесия пары ^{90}Sr - ^{90}Y .

При сорбции ^{90}Sr из растворов солей кальция кроме значений K_d ^{90}Sr рассчитывали значения статической обменной емкости (СОЕ) по кальцию и коэффициента разделения пары Sr/Ca ($D_{\text{Sr/Ca}}$) по формулам 2 и 3 соответственно:

$$\text{COE} = (C_0 - C_p) \times V_p / m_c \quad (2)$$

$$D_{Sr/Ca} = (K_d \times C_p) / COE \quad (3)$$

где C_o , C_p - соответственно концентрация ионов Ca^{2+} в исходном растворе и в фильтрате, ммоль/см³;

K_d - коэффициент распределения ^{90}Sr , см³/г

Концентрацию ионов кальция в растворах определяли объемным комплексонометрическим методом.

Сорбция ^{137}Cs из раствора 0,1 и 1,0 моль/дм³ нитрата натрия

Эксперименты по сорбции радионуклида ^{137}Cs из растворов 0,1 и 1,0 моль/дм³ $NaNO_3$, pH=6,0 проводили при соотношении твердой и жидкой фаз (Т:Ж) = 1:200 и времени контакта 48 ч. Во всех случаях использовали фракции сорбентов с размером менее 0,2 мм. Полученные результаты приведены в табл. 3. Здесь и далее приведены средние значения K_d из двух-трех параллельных экспериментов.

Таблица 3

Значения коэффициента распределения (K_d) ^{137}Cs на различных образцах сорбентов при сорбции из раствора 0,1 и 1,0 моль/дм³ $NaNO_3$

Наименование образца	Значения K_d ^{137}Cs , см ³ /г при сорбции из раствора	
	0,1 моль/дм ³ $NaNO_3$	1,0 моль/дм ³ $NaNO_3$
КЛ(Бад)	±	131± 3
КЛ(Хол)	±	64± 3
КЛ (Шив)	±	81± 4
КЛ(Т-Г)	±	826± 4
КЛ(НТ)	±	106± 4
КЛ(БП)	±	127± 3
КЛ(Сок).	±	115± 9
ГЛ(Б)	13000±2000	365± 5
NaA	±	20± 2
ФНС	84000±2500	60000±2000

Представленные в таблице 3 результаты показывают, что среди исследованных образцов природных клиноптилолитов наилучшими сорбционными характеристиками по отношению к ^{137}Cs обладает клиноптилолит Талан-Гозагорского месторождения. Все остальные клиноптилолиты обладают примерно одинаковыми сорбционными характеристиками. Максимальной селективностью к цезию обладает синтетический ферроцианидный сорбент марки ФНС, значение K_d ^{137}Cs на котором на 2-3 порядка выше, по сравнению со всеми остальными исследованными сорбентами.

Зависимость сорбции ^{137}Cs от концентрации ионов натрия в растворе

Для определения зависимости сорбции ^{137}Cs от концентрации ионов натрия в растворе были выбраны следующие образцы: КЛ(Бад), КЛ(Т-Г) и ФНС. Сорбцию проводили из растворов NaNO_3 с концентрацией 0,1-1,6 моль/дм³, рН-6,0, Т:Ж = 1:200, время контакта 48 ч, фракции сорбентов-менее 0,2 мм. Полученные результаты приведены на рис. 1.

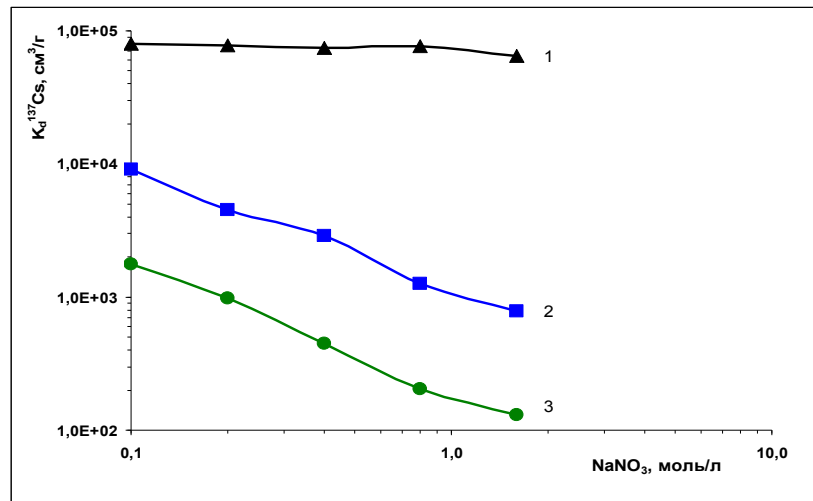


Рис. 1. Зависимость коэффициента распределения (K_d) ^{137}Cs от концентрации ионов Na^+ в растворе на различных сорбентах:
1 – ФНС; 2 – КЛ(Т-Г); 3 – КЛ(Бад)

Представленные результаты показывают, что значения K_d ^{137}Cs на образцах КЛ(Т-Г) и КЛ(Бад) закономерно снижаются при увеличении концентрации ионов Na^+ в растворе. При этом зависимости K_d ^{137}Cs от C_{Na^+} в билогарифмических координатах представляют прямые линии, что свидетельствует об ионообменном характере сорбции цезия. Значения K_d ^{137}Cs для образца КЛ(Т-Г) лежат выше, по сравнению с образцом КЛ(Бад) во всем исследованном диапазоне концентраций NaNO_3 , что подтверждает повышенную селективность клиноптилолита Талан-Гозагорского месторождения, по сравнению с цеолитами других месторождений.

Сорбция ^{137}Cs на сорбенте ФНС практически не зависит от концентраций NaNO_3 , что свидетельствует о селективном (цеолитном) механизме сорбции цезия.

Зависимость сорбции ^{137}Cs от размера гранул сорбента

Для определения зависимости сорбции ^{137}Cs от размера гранул сорбента был выбран образец КЛ(Т-Г) обладающий наилучшими, среди изученных при-

родных клиноптилолитов, сорбционными характеристиками по отношению к ^{137}Cs . Сорбцию проводили из раствора NaNO_3 с концентрацией $1,0 \text{ моль/дм}^3$, $\text{pH}=6,0$, $\text{T:Ж} = 1:100$. В экспериментах использовали следующие фракции сорбента КЛ(Т-Г): $-0,2$; $-0,5+0,2$; $-1+0,5$; $-2+1 \text{ мм}$. Для исключения влияния кинетических факторов время контакта в эксперименте составило 10 суток. Полученные результаты приведены в табл. 4 и на рис. 2.

Таблица 4

Значения коэффициента распределения (K_d) ^{137}Cs на образце КЛ(Т-Г) с различным гранулометрическим составом ($1,0 \text{ моль/дм}^3 \text{ NaNO}_3$, $\text{pH}=6,0$, $\text{T:Ж} = 1:100$, время контакта -10 суток)

Фракция сорбента, мм	-0,20	-0,5+0,2	-1+0,5	-2+1
Средний размер гранул, мм	0,20	0,35	0,75	1,50
K_d , $\text{см}^3/\text{г}$	187 ± 2	189 ± 5	220 ± 20	340 ± 25

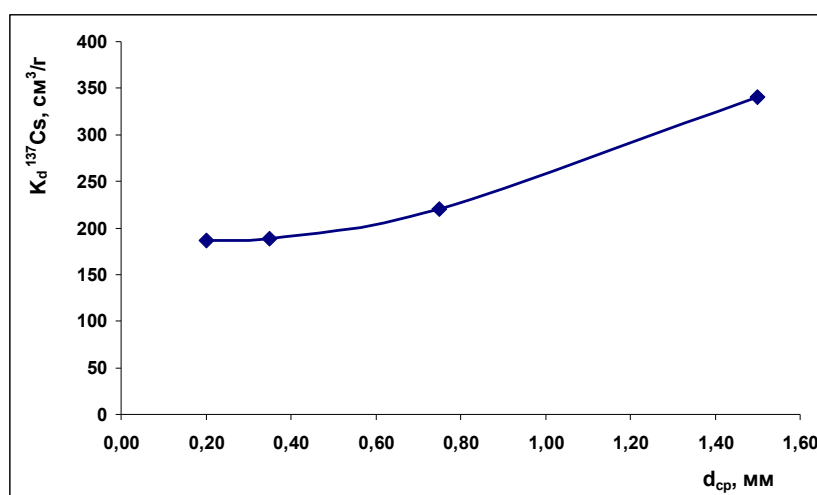


Рис. 2. Зависимость коэффициента распределения (K_d) ^{137}Cs на образце КЛ(Т-Г) от среднего размера гранул (d_{cp})

Представленные результаты показывают, что значения K_d ^{137}Cs на образце КЛ(Т-Г) имеют тенденцию к плавному повышению при увеличении размера гранул, что может быть связано с повышением доли сорбционно-активной фазы клиноптилолита в образце при увеличении размера гранул.

Сорбция радионуклида ^{90}Sr и ионов Ca^{2+}

При сорбции ^{90}Sr и ионов Ca^{2+} в качестве жидкой фазы использовали модельный раствор хлорида кальция с концентрацией $0,01 \text{ моль/дм}^3$, $\text{pH}=6,0$, в ко-

торый перед началом экспериментов вносили индикаторные количества радионуклида ^{90}Sr в количестве около 10^5 Бк/дм³.

Для получения сравнительных характеристик образцов в аналогичных условиях проводили сорбцию ^{90}Sr и Ca^{2+} на следующих сорбентах:

Полученные значения статической обменной емкости (СОЕ) по Ca^{2+} , коэффициента распределения (K_d) ^{90}Sr и коэффициента разделения пары Sr/Ca ($D_{\text{Sr}/\text{Ca}}$) на изученных образцах сорбентов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения статической обменной емкости (СОЕ) по Ca^{2+} , коэффициента распределения (K_d) ^{90}Sr и коэффициента разделения пары Sr/Ca ($D_{\text{Sr}/\text{Ca}}$) на различных образцах сорбентов (раствор 0,01 моль/дм³ CaCl_2 , рН=6,0, Т: Ж=1:200)

Наименование образца	СОЕ по Ca^{2+} , ммоль/г	K_d ^{90}Sr , см ³ /г	$D_{\text{Sr}/\text{Ca}}$
КЛ(Бад)	0,82	1120±50	9,0
КЛ(Хол)	0,74	185±5	1,8
КЛ(Шив)	0,43	205±5	4,2
КЛ(Т-Г)	0,45	65±4	1,3
КЛ(НТ)	<0,01	175±5	-
КЛ(БП)	0,038	530±10	49
КЛ(Сок).	0,24	360±10	14,4
ГЛ(Б)	<0,01	40±2	-
МДМ	0,96	8600±100	56
NaA	1,65	4400±50	4,7

Представленные в табл. 5 результаты показывают, что среди исследованных образцов природных клиноптилолитов наилучшими сорбционными характеристиками по отношению к ^{90}Sr (K_d ^{90}Sr = 1120 см³/г) обладает клиноптилолит Бадинского месторождения. Клиноптилолиты месторождений «Белый Пласт» (Болгария) и «Сокирница» (Украина) имеют значения K_d ^{90}Sr = 530 и 360 см³/г соответственно. Остальные образцы клиноптилолитов имеет значительно меньшие сорбционные характеристики (K_d ^{90}Sr = 65-205 см³/г). Природные клиноптилолиты по сорбционно-селективным характеристикам значительно уступают промышленным сорбентам МДМ и NaA превосходят по отношению к ^{90}Sr .

Таким образом, все изученные образцы природных цеолитов (клиноптилолитов) Забайкальского края обладают высокой сорбционной активностью по отношению к радионуклиду ^{137}Cs в малосолевых растворах и могут быть использованы как эффективные сорбенты для очистки от ^{137}Cs слабоминерализованных сточных и природных вод. Среди исследованных образцов природ-

ных клиноптилолитов наилучшими сорбционными характеристиками по отношению к ^{137}Cs обладает клиноптилолит Талан-Гозагорского месторождения Забайкальского края.

По отношению к ^{90}Sr наилучшими сорбционными характеристиками среди природных клиноптилолитов Забайкальского края обладает клиноптилолит Бадинского месторождения. Однако природные клиноптилолиты по своим сорбционно-селективным характеристикам по отношению к ^{90}Sr значительно уступают промышленным сорбентам на основе оксидов марганца – сорбент МДМ и синтетическому цеолиту NaA.

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117092750073-6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Франк М.И. Приоритеты использования атомных станций малой мощности на Востоке России // Атомная энергия. – 2011. – Т. 111, вып. 5. – С. 276–281.
2. Мельников Н.Н., Амосов П.В., Гусак С.А., Новожилова Н.В., Климин С.Г. Оценка теплового воздействия подземной атомной станции малой мощности на многолетнемерзлые горные породы // Арктика: экология и экономика. – 2014. – № 1 (13). – С. 30–37.
3. Мельников Н.Н., Амосов П.В., Климин С.Г., Новожилова Н.В. Атомные станции малой мощности для отдаленных районов страны: проблемы безопасности // Инженерная защита. – 2015. – №4 (9). С. 55–63
4. Кузнецов Ю.В., Щebetковский В.Н., Трусов А.Г. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. – М.: Атомиздат. 1974. 366 с.
5. Рябчиков Б.Е. Очистка жидких радиоактивных отходов. Москва: Дели принт. 2008. 516 с.
6. Милютин В.В., Гелис В.М., Пензин Р.А. Сорбционно-селективные характеристики неорганических сорбентов и ионообменных смол по отношению к цезию и стронцию // Радиохимия, 1993, Т. 35, № 3, С. 76–78.
7. Милютин В.В., Гелис В.М., Некрасова Н.А., Кононенко О.А и др. Исследование сорбции радионуклидов цезия, стронция, урана и плутония на природных и модифицированных глинах // Радиохимия. 2012. Т. 54. № 1. С. 71–74.
8. Павленко Ю.В. Цеолитовые месторождения Восточного Забайкалья. – Чита: ЧитГУ, 2000. – 101 с.
9. Хатькова А.Н., Размахнин К.К. Оценка возможности комплексной переработки цеолитсодержащего сырья // Разведка и охрана недр. – 2014. Вып. 6. С. 48–49
10. Шушков Д.А., Котова О.Б., Капитанов В.М., Игнатьев А.Н. Анальцимсодержащие породы Тимана как перспективный вид полезных ископаемых. – Сыктывкар, 2006. – 40 с. – (Науч. рекомендации – нар. хоз-ву / Коми науч. центр УрО РАН. – Вып. 123).
11. Юсупов Т.С. Способы концентрирования и выделения цеолитов из горных пород // Методы диагностики и количественного определения содержания цеолитов в горных породах. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1985. – С. 161–168.

© К. К. Размахнин, В. В. Милютин, А. Н. Хатькова, 2019