

СОРБЦИЯ Cs(I) НА ГЛИНАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МАРКОВСКОЕ (БЕЛАРУСЬ) И 10-й ХУТОР (ХАКАСИЯ, РОССИЯ)

© 2022 г. А. А. Баклай^{а, *}, Н. А. Маковская^а, Т. Г. Леонтьева^а,
Д. А. Кузьмук^а, Л. Н. Москальчук^{а, б}

^а Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси,
220109, Минск, а/я 119

^б Белорусский государственный технологический университет,
220006, Минск, ул. Свердлова, д. 13а

*e-mail: a.baklay@tut.by

Поступила в редакцию 05.04.2021, после доработки 19.06.2021, принята к публикации 22.11.2021

Изучены минеральный состав и сорбционные характеристики образцов природных глин месторождений Марковское (Беларусь) и 10-й Хутор (Хакасия, Россия). Содержание основных глинистых минералов в образцах глин данных месторождений составляет, мас%: Марковское – монтмориллонит 37.6, иллит 3.6, каолинит 14.7; 10-й Хутор – монтмориллонит 58.8. Время установления сорбционного равновесия для изученных образцов глин при концентрации Cs⁺ в растворе 3.5×10^{-9} и 10^{-3} моль/дм³ составляет около 24 ч. Установлено, что pH раствора в диапазоне значений 4.0–10.5 практически не влияет на сорбцию Cs⁺ глинами. Определено, что глины имеют два типа сорбционных центров – T₁ и T₂, различающихся своей селективностью и емкостью по отношению к Cs⁺. Сорбционные емкости центров типа T₁ и T₂ глин месторождений по отношению к Cs⁺ составляют соответственно: Марковское – 3.2×10^{-5} и 0.03 моль/кг, 10-й Хутор – 2.5×10^{-6} и 0.07 моль/кг. Установлено, что сорбция ¹³⁷Cs из растворов с удельной активностью не более 1.3×10^{10} Бк/дм³ выше на глине месторождения Марковское по сравнению с глиной месторождения 10-й Хутор. Сделан вывод о возможности ее использования в составе подстилающего экрана пункта захоронения низко- и среднеактивных радиоактивных отходов Белорусской АЭС.

Ключевые слова: природная глина, монтмориллонит, иллит, цезий, сорбция, сорбционные центры, радиоактивные отходы.

DOI: 10.31857/S0033831122020113, **EDN:** FPIGYW

В 2020 г. в Беларуси введен в эксплуатацию первый энергоблок Белорусской АЭС. В этой связи особую актуальность приобретает проблема долговременного безопасного захоронения в геологической среде радиоактивных отходов (РАО) различного состава, которые будут образовываться и накапливаться на Белорусской АЭС. Согласно постановлению Совета Министров Республики Беларусь от 02.06.2015 № 460 «Об утверждении стратегии обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции» долговременная безопасность захоронения РАО должна обеспечиваться

реализацией принципа многобарьерности, основанного на применении системы барьеров (естественных и инженерных) на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду. Исходя из вышеизложенного для решения проблемы изоляции РАО Белорусской АЭС от окружающей среды планируется строительство приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) с использованием многобарьерной защитной системы, представляющей собой совокупность естественных и инженерных барьеров. Буферная засыпка, подстилающий

Таблица 1. Образцы природной глины, отобранные для исследований

Шифр образца	Наименование образца	Наименование месторождения (место отбора образца)
ГМ	Глина	Марковское (Гомельская обл., Беларусь)
ГХ	Глина	10-й Хутор (Хакасия, Россия)

и покрывающий экраны являются элементами системы инженерных барьеров приповерхностного ПЗРО [1], для создания которых требуется большое количество глинистых материалов. Исходя из принципа МАГАТЭ для стран, эксплуатирующих АЭС, рекомендовано использовать местные глинистые материалы для снижения стоимости строительства ПЗРО [2].

Целью данной работы является изучение сорбционных характеристик природных глин, залегающих на территориях Беларуси и России, и оценка возможности использования белорусской глины в составе подстилающего экрана ПЗРО Белорусской АЭС.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследований использовали образцы природной глины, представленные в табл. 1.

Выбор природной глины месторождения Марковское обусловлен тем, что по сравнению с ранее исследованными образцами глин, отобранными из 7 месторождений Беларуси [3], находящихся в промышленной эксплуатации, она обладает наилучшими сорбционными характеристиками по отношению к цезию. Выбор глины месторождения 10-й Хутор связан с тем, что в России она рассматривается в качестве перспективного глинистого материала для создания барьеров безопасности при изоляции РАО [4]. Образец данной природной глины, основным глинистым минералом в которой является монтмориллонит, предоставило для исследований ООО «Компания Бентонит» (Россия). Характеристики образца: содержание монтмориллонита 58.8 мас%, емкость катионного обмена 45.6 мг-экв/100 г.

Исследования природных глин проводили в следующей последовательности: минеральный состав–удельная поверхность–сорбционные свойства. Минеральный состав образца природной глины месторождения Марковское определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) на рентгеновском дифрактометре Ultima-IV, Rigaku (Япония)

с использованием CuK_α -излучения в диапазоне съемки $2\theta = 2^\circ\text{--}70^\circ$. Для расшифровки ренттограмм использовали программу Jade 6.5 (MDI) с порошковой базой данных PDF-2. Количественный минеральный состав данного образца глины определяли методом Ритвельда [5] в программном пакете PROFEX GUI для BGMN [6]. Соотношение глинистых минералов в тонкой фракции (менее 2 мкм) образца глины месторождения Марковское рассчитывали методом математического моделирования рентгеновских дифракционных картин от ориентированных препаратов в воздушно-сухом и насыщенном этиленгликолем состояниях в программном пакете Sybilla (Sevcon).

Удельную поверхность образцов природных глин определяли методом низкотемпературной адсорбции азота (метод БЭТ) с использованием прибора ASAP-2010 (Micromeritics, США). Емкость катионного обмена (ЕКО) определяли по адсорбции метиленового голубого согласно ГОСТ 21283–93 [7].

Сорбционные характеристики образцов природных глин определяли с использованием радиоактивного и стабильного цезия [8]. Перед проведением исследований образцы глин высушивали в сушильном шкафу при температуре $105 \pm 5^\circ\text{C}$ до постоянной массы, затем растирали в ступке и просеивали через сито с размером ячеек 1 мм. Модельные радиоактивные растворы готовили путем добавления радиоактивной метки ^{137}Cs в дистиллированную воду. Удельная активность растворов составляла 1.5×10^6 Бк/дм³. Ионную силу растворов (0.01 моль/дм³) устанавливали с использованием NaClO_4 марки ч.д.а.

Эксперименты по изучению сорбции цезия (Cs) из растворов проводили в статических условиях при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ путем периодического перемешивания образца глины фракции менее 0.63 мм с аликвотой раствора [9]. Время, необходимое для установления сорбционного равновесия в системе глина–модельный раствор, определяли на основании изучения кинетики сорбции цезия с использованием ^{137}Cs в качестве

радиоактивной метки. Кинетические эксперименты проводили при pH 6.5 с концентрацией Cs, равной 3.5×10^{-9} (низкая) и 10^{-3} моль/дм³ (высокая). По результатам экспериментов рассчитывали степень сорбции (S , %) и коэффициент распределения (K_d , дм³/кг) Cs по формулам:

$$S = \frac{A_0 - A_p}{A_0} \times 100\%, \quad (1)$$

$$K_d = \frac{A_0 - A_p}{A_p} \times \frac{V}{m}, \quad (2)$$

где A_0 , A_p – соответственно удельная активность радионуклида в исходном растворе и в фильтрате после сорбции соответствующего радионуклида, Бк/дм³; V – объем жидкой фазы, дм³; m – масса сорбента, кг.

Зависимость сорбции Cs образцами глин от pH раствора изучали при изменении значений pH в интервале от 2 до 11, которые регулировали растворами HCl и NaOH с концентрацией 1.0 и 0.1 моль/дм³ соответственно.

Изотермы сорбции Cs получали при заданном значении pH от 6 до 7 и концентрации NaClO₄, равной 0.01 моль/дм³, изменяя концентрацию цезия в растворе от 10^{-10} до 10^{-2} моль/дм³. Для экспериментов с высокой концентрацией Cs (более 10^{-7} моль/дм³) к радиоактивной метке добавляли необходимое количество стабильного CsNO₃ марки х.ч. Содержание цезия в растворе (C_p , моль/дм³) и твердой фазе образца глины (C_t , моль/кг) рассчитывали по формулам

$$C_p = \frac{C_0}{(1 + K_d \times \frac{m}{V})}, \quad (3)$$

$$C_t = (C_0 - C_p) \times \frac{V}{m}, \quad (4)$$

где C_0 и C_p – исходная и равновесная концентрация цезия в растворе, моль/дм³.

Емкость селективной сорбции определяли по изотермам сорбции цезия в координатах $\lg C_t - \lg C_p$. Для оценки влияния концентрации калия (C_K , моль/дм³) в растворе на сорбцию ¹³⁷Cs образцами природных глин строили зависимость коэффициента распределения ¹³⁷Cs (K_d , дм³/кг) от C_K в координатах $\lg K_d - \lg C_K$. Концентрацию калия в растворе регулировали добавлением KNO₃ марки х.ч.

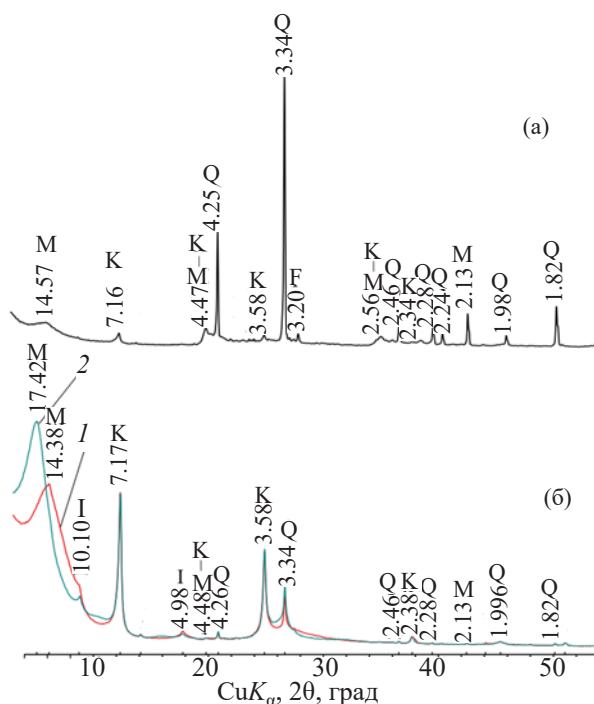


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы валового образца глины ГМ (а) и его глинистой фракции (б). Межплоскостные расстояния даны в ангстремах. Красная линия (1) – воздушно-сухой препарат, зеленая линия (2) – препарат, насыщенный этиленгликолем. Обозначения рефлексов отдельных минеральных фаз: I – иллит, К – каолинит, Q – кварц, F – полевые шпаты.

Отношение твердой и жидкой фаз во всех экспериментах составляло 10 г/дм³. Жидкую и твердую фазу разделяли центрифугированием при 8000 об/мин в течение 30 мин. В полученном фильтрате определяли удельную активность ¹³⁷Cs прямым спектрометрическим методом по линии $E_\gamma = 662$ кэВ с использованием универсального спектрометрического комплекса РУС-91М.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика образцов исследуемых глин.

Исследование минерального состава природной глины месторождения Марковское (ГМ) методом РФА для оценки возможности ее использования в составе подстилающего экрана ПЗРО показало, что в валовом образце содержатся следующие минеральные фазы: монтмориллонит, каолинит, кварц, микроклин, а также следовые количества альбита и анатаза (рис. 1).

Таблица 2. Характеристика образцов глин месторождений Марковское и 10-й Хутор

Шифр образца	Месторождение	Удельная поверхность, м ² /г	ЕКО, мг-экв/100 г	Содержание монтмориллонита, мас%
ГМ	Марковское	42.7 ± 2.4	24.2 ± 0.8	37.6 ± 2.0
ГХ	10-й Хутор	48.9 ± 1.5	45.6 ^a	58.8 ^a

^a Данные предоставлены ООО «Компания Бентонит» (Россия).

Положение рефлекса (d_{001}) на рис. 1, а для образца ГМ составляет 14.57 Å и указывает на то, что монтмориллонит в межпакетных позициях содержит преимущественно катионы кальция и магния [10]. При исследовании валового образца ГМ следовые количества такой минеральной фазы, как иллит, не установлены. Дополнительные исследования ориентированных препаратов глинистой фракции с размером частиц менее 2 мкм, выделенной из образца глины ГМ (рис. 1, б), показали, что монтмориллонитовая фаза состоит из переслаивающихся смешанных иллит-монтмориллонитовых слоев [11, 12], среди которых 9% составляют иллитовые слои. По результатам исследований установлен минеральный состав образца глины месторождения Марковское, мас%: монтмориллонит 37.6, иллит 3.6, каолинит 14.7, кварц 34.3, микроклин 6.7, альбит 2.3 и анатаз 0.8.

В работах [13–15] показано, что сорбционные свойства природных глин по отношению к ¹³⁷Cs зависят в основном от их удельной поверхности, содержания глинистых минералов монтмориллонита, иллита, каолинита и конкурирующих ионов в растворе. По данным работы [15], глины с высоким содержанием монтмориллонита являются наилучшими для создания противомиграционных и противотриационных барьеров для обеспечения безопасности приповерхностного ПЗРО. Результаты исследований удельной поверхности, ЕКО и содержания глинистого минерала монтмориллонита приведены в табл. 2.

Согласно данным табл. 2 и работ [13–15], сорбция цезия из растворов должна быть выше для образца глины из месторождения 10-й Хутор (Россия).

Изучение сорбции Cs(I) образцами глин. Одна из основных функций слоя глины в составе подстилающего экрана ПЗРО – препятствовать выходу радионуклидов за его пределы в случае разгерметизации емкостей с РАО. В работе [16] показано, что цезий в условиях окружающей среды присутствует в форме моновалентного катиона Cs⁺, и это обуслов-

ливает его высокую растворимость и миграционную подвижность. Радионуклид ¹³⁷Cs образуется при делении топлива АЭС на основе урана и является основным компонентом низко-, средне- и высокоактивных РАО, удельная активность которых составляет соответственно 10⁶–10⁷, 10⁷–10¹⁰ и более 10¹⁰ Бк/кг. В связи с этим эксперименты по изучению кинетики сорбции Cs⁺ на образцах глин ГМ и ГХ выполняли при концентрациях Cs⁺ в растворе 3.5 × 10⁻⁹ (низкая) и 10⁻³ моль/дм³ (высокая), что соответствует удельной активности ¹³⁷Cs, равной 1.5 × 10⁶ и 4.4 × 10¹¹ Бк/дм³. На рис. 2 представлены зависимости степени сорбции ¹³⁷Cs (*S*, %) изучаемыми образцами глин от времени контакта с радиоактивным раствором.

Как видно из рис. 2, при вышеуказанных концентрациях Cs⁺ в растворе его сорбция на образцах исследуемых глин (ГМ и ГХ) имеет схожий характер. Наиболее быстро сорбция протекает в начальный период времени. Форма кинетической кривой показывает, что сорбция Cs⁺ за первые 7 ч взаимодействия образца глины с раствором возрастает, чему соответствует резкий подъем кривой. Затем сорбция замедляется, и в течение 24 ч устанавливается сорбционное равновесие Cs⁺ в системе глина–раствор. Установлено, что при низкой концентрации максимальная степень сорбции Cs⁺ на образцах глин ГМ и ГХ составляет соответственно 99.1 и 94.1% (рис. 2, а), а при высокой – 68.8 и 91.1% (рис. 2, б). Здесь и далее приведены средние значения соответствующих величин 3-х параллельных экспериментов. Максимальное стандартное отклонение величины степени сорбции ¹³⁷Cs (*S*, %) составляло не более 1.5% (рис. 2 и 3). На основании полученных результатов дальнейшие сорбционные эксперименты выполняли при времени контакта образца глины с раствором 72 ч.

Известно [9], что pH водного раствора является одним из параметров, влияющим на сорбцию радионуклидов. На рис. 3 приведены зависимости сорбции Cs⁺ от pH для образцов глин ГМ и ГХ при его низкой и высокой концентрациях в растворе.

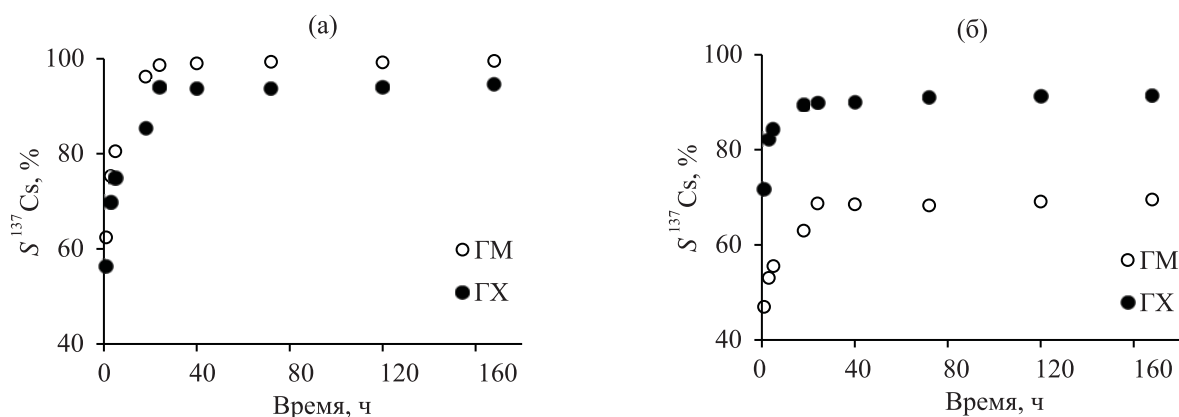


Рис. 2. Кинетика сорбции Cs^+ при концентрации 3.5×10^{-9} (а) и 10^{-3} моль/дм³ (б) на образцах глин ГМ и ГХ. рН 6.5 ± 0.1 , $I(\text{NaClO}_4) = 0.01$ моль/дм³, $m/V = 10$ г/дм³; то же на рис. 3–5.

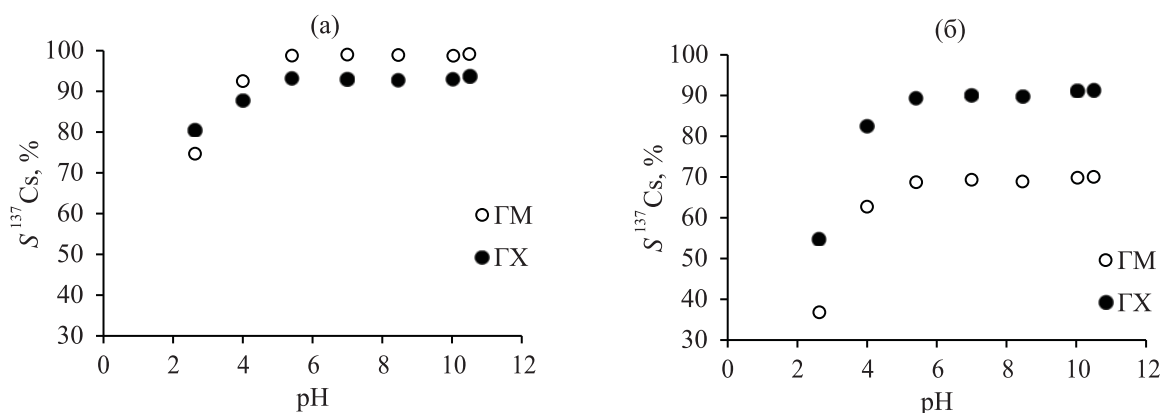


Рис. 3. Зависимость сорбции Cs^+ от рН раствора на образцах глин ГМ и ГХ при $[\text{Cs}^+] = 3.5 \times 10^{-9}$ (а) и 10^{-3} моль/дм³ (б).

Из рис. 3 видно, что для обеих концентраций Cs^+ в растворе степень его сорбции на образцах глин в диапазоне рН 4–10.5 практически не изменяется и снижается при рН < 4. В работе [17] показано, что при рН < 4 или рН > 10 может иметь место значительное растворение глинистых минералов, входящих в состав глин. Поэтому снижение сорбции Cs^+ на образцах глин при рН < 4 может быть связано с его конкуренцией как с высвобождающимися ионами при частичном растворении глинистых минералов, так и с H^+ .

На рис. 4 представлены изотермы сорбции цезия для образцов глин ГМ и ГХ в виде зависимостей концентрации цезия в твердой фазе образца глины (C_T , моль/кг) и коэффициента распределения цезия (K_d , дм³/кг) от его равновесной концентрации в растворе (C_p , моль/дм³) в билигарифмических координатах.

Приведенные на рис. 4 данные позволяют определить емкости сорбции различных сорбционных центров из линейных участков и сравнивать значения величин коэффициента распределения цезия для образцов глин. Если сорбция Cs на образце глины линейна, то изотерма в координатах $\lg C_T - \lg C_p$ будет выглядеть как прямая линия с наклоном, равным единице. Обработку экспериментальных результатов проводили методом наименьших квадратов с использованием уравнения линейной регрессии

$$\lg C_T = A \lg C_p + B, \quad (5)$$

где A , B – константы.

Установлено (рис. 4, а), что сорбция Cs^+ на образцах глин отклоняется от линейной, так как тангенс угла наклона (параметр A) уравнения линейной регрессии (5) для образцов ГМ и ГХ значительно отличается от единицы. Уравнения линейной регрес-

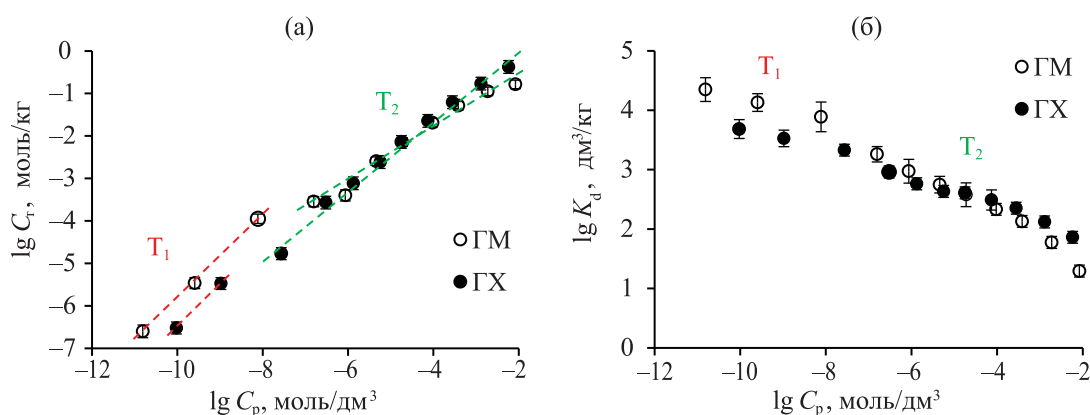


Рис. 4. (а) изотермы сорбции Cs на образцах глин ГМ и GX (красная линия – сорбционные центры типа T_1 , зеленая линия – сорбционные центры типа T_2), (б) зависимость коэффициента распределения Cs от его равновесной концентрации в растворе.

сии для образцов ГМ и GX имеют соответственно следующий вид:

$$\lg C_T = 0.65 \lg C_p + 0.83, \quad (6)$$

$$\lg C_T = 0.78 \lg C_p + 1.50. \quad (7)$$

При этом на изотермах сорбции (рис. 4, а) можно выделить два линейных участка, для которых тангенс угла наклона близок к единице. Уравнения линейной регрессии в диапазонах равновесных концентраций цезия 1.5×10^{-11} – 7.7×10^{-9} и 8.6×10^{-7} – 1.9×10^{-5} моль/дм³ для образца ГМ (8), (9) и 9.5×10^{-11} – 1.0×10^{-9} и 8.6×10^{-7} – 9.5×10^{-5} моль/дм³ для образца GX (10), (11) имеют следующий вид:

$$\lg C_T = 0.98 \lg C_p + 4.01, \quad (8)$$

$$\lg C_T = 0.94 \lg C_p + 2.34, \quad (9)$$

$$\lg C_T = 0.99 \lg C_p + 3.53, \quad (10)$$

$$\lg C_T = 0.92 \lg C_p + 2.31. \quad (11)$$

Перегибы на изотермах сорбции Cs свидетельствуют о существовании в образцах глин ГМ и GX двух типов сорбционных центров (T_1 и T_2). До насыщения сорбционных центров T_1 сорбция цезия является линейной (участок постоянного значения K_d в пределах ошибки эксперимента, рис. 4, б). После насыщения центров T_1 наблюдается другой участок линейной сорбции с постоянным значением K_d (рис. 4, б). Это соответствует наличию сорбционных центров второго типа (T_2). Величины K_d больше для сорбционных центров T_1 , чем для T_2 (рис. 4, б).

Согласно данным работ [16, 18], глинистые минералы монтмориллонит и каолинит имеют один тип сорбционных центров, а иллит – несколько типов сорбционных центров. Появление в образцах глин ГМ и GX двух сорбционных центров, различающихся селективностью и емкостью, связано, по-видимому, с присутствием смешанных иллит-монтмориллонитовых слоев, которые могут структурно приводить к существованию в монтмориллоните таких же селективных сорбционных центров, как в иллите [16]. Сорбционная емкость по цезию сорбционных центров типа T_1 и T_2 образцов глин ГМ и GX определяли из прямолинейных участков изотерм сорбции (рис. 4, а). Для образцов глин ГМ и GX величины емкости сорбции по цезию центров типа T_1 составляют соответственно 3.2×10^{-5} и 2.5×10^{-6} моль/кг, а центров T_2 – 0.03 и 0.07 моль/кг.

Согласно данным работы [19], необходимая масса природной глины для предотвращения выхода ^{137}Cs за пределы ПЗРО в случае разгерметизации емкостей с РАО обратно пропорциональна K_d ^{137}Cs для данной глины. Из рис. 4, б видно, что для образца глины GX значения K_d ^{137}Cs для центров типа T_1 меньше, а для центров типа T_2 больше по сравнению с образцом глины ГМ. Установлено, что при концентрации Cs^+ в растворе не более 3×10^{-5} моль/дм³, что эквивалентно удельной активности ^{137}Cs 1.3×10^{10} Бк/дм³, значения K_d ^{137}Cs для образца глины ГМ больше, чем для образца глины GX.

В работах [9, 20] показано, что катион K^+ , являясь аналогом цезия, среди конкурирующих катионов Na^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} в грунтовой воде ока-

зывает наибольшее влияние на K_d ^{137}Cs в глинах. Концентрация калия в грунтовых водах может меняться в достаточно широких пределах: от 0.5 до 25 ммоль/дм³ [21]. При эксплуатации ПЗРО возможен контакт грунтовых вод с его подстилающим экраном. В связи с этим изучено влияние концентрации иона K^+ в растворе на коэффициент распределения ^{137}Cs для образцов глин ГМ и ГХ. В процессе изучения сорбции ^{137}Cs образцами глин из солевого раствора KNO_3 изменения pH не наблюдалось. На рис. 5 приведены зависимости значений K_d ^{137}Cs для образцов глин ГМ и ГХ от исходной концентрации иона K^+ в растворе.

Представленные на рис. 5 результаты свидетельствуют о том, что образцы глин ГМ и ГХ селективно сорбируют ^{137}Cs из раствора при концентрации иона K^+ менее 2 и 1 ммоль/дм³ соответственно. Значения K_d ^{137}Cs для изученных образцов глин закономерно снижаются при дальнейшем увеличении концентрации K^+ в растворе. Кроме того, из рис. 5 видно, что значения K_d ^{137}Cs для образца глины ГМ во всем диапазоне изменения концентрации K^+ в растворе от 0.5 до 100 ммоль/дм³ больше, чем для образца глины ГХ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что образцы глин месторождений Марковское (ГМ) Гомельской обл. Беларуси и 10-й Хутор (ГХ) Хакасии, Россия имеют два типа сорбционных центров T_1 и T_2 , которые отличаются своей селективностью и емкостью. Емкость сорбционных центров типа T_1 образца глины ГМ (3.2×10^{-5} моль/кг) больше в 12.8 раз, чем образца глины ГХ (2.5×10^{-6} моль/кг). При концентрации цезия в растворе не более 3×10^{-5} моль/дм³ (эквивалентно удельной активности ^{137}Cs , равной 1.3×10^{10} Бк/дм³) сорбция Cs^+ образцом глины ГМ выше по сравнению с образцом глины ГХ, что, по-видимому, связано с тем, что данный процесс контролируется в основном сорбционными центрами типа T_1 .

Следовательно, глину месторождения Марковское (Гомельская обл., Беларусь) можно использовать в качестве компонента подстилающего экрана при строительстве пункта захоронения низко- и среднеактивных радиоактивных отходов Белорус-

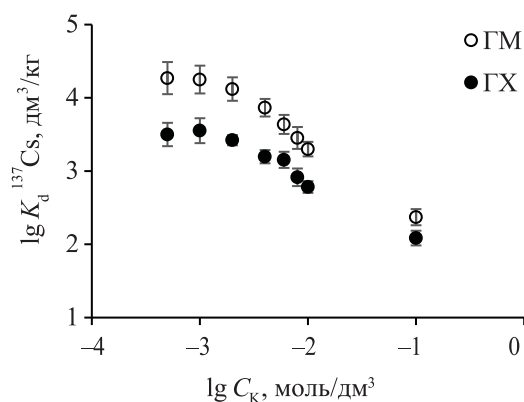


Рис. 5. Зависимость K_d ^{137}Cs от концентрации иона K^+ в растворе на образцах глин ГМ и ГХ при $[\text{Cs}] = 3.5 \times 10^{-9}$ моль/дм³.

ской АЭС. Показано, что в составе подстилающего экрана глина данного месторождения способна существенно снизить миграцию ^{137}Cs за пределы ПЗРО.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Ильиной О.А. (ООО «Компания Бентонит», Россия) за предоставление образца глины месторождения 10-й Хутор и Крупской В.В. за помощь в проведении минералогических исследований глины в ИГЕМ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варлакова Г.А., Осташкина Е.Е., Голубева З.И. // Радиохимия. 2013. Т. 55, № 6. С. 549.
2. Procedures and techniques for closure of near surface disposal facilities for radioactive waste: IAEA-TECDOC-1260. Vienna: IAEA, 2001. 96 p.
3. Маковская Н.А., Баклай А.А., Леонтьева Т.Г. // Докл. VIII Междунар. конф. «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века». Минск, 23–26 июня 2020. Минск: Право и экономика, 2020. С. 161.
4. Семенкова А.С. Сорбция Cs(I), Eu(III), Np(V) на глинах различного минерального состава: Автореф. дис. ... к.х.н. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2019. 22 с.

5. *Post J.E., Bish D.L.* // *Rev. Mineral. Geochem.* 1989. Vol. 20. P. 277.
6. *Doebelin N., Kleeberg R.* // *J. Appl. Crystallogr.* 2015. Vol. 48. P. 1573.
7. ГОСТ 21283–93: Глина бентонитовая для тонкой и строительной керамики. Методы определения показателя адсорбции и емкости катионного обмена. М.: Госстандарт России, 1993. 8 с.
8. *Леонтьева Т.Г., Москальчук Л.Н., Баклай А.А., Маковская Н.А.* // Сорбционные и хроматографические процессы. 2018. № 5. С. 726.
9. *Москальчук Л.Н., Баклай А.А., Леонтьева Т.Г., Маковская Н.А.* // *Радиохимия.* 2019. Т. 61. № 4. С. 334.
10. *Белоусов П.Е., Бочарникова Ю.И., Боева Н.М.* // *Вестн. РУДН. Сер.: Инженерные исследования.* 2015. Т. 16, № 4. С. 94.
11. *Осипов В.И., Соколов В.Н.* Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М: ГЕОС, 2013. 578 с.
12. *Fernandez A.M., Baeyens B., Bradbuty M., Rivas P.* // *Phys. Chem. Earth.* 2004. Vol. 29. P. 105.
13. *Прядко А.В., Жаркова В.О., Еришова Я.Ю., Тюпина Е.А., Крупская В.В.* // *Успехи в химии и хим. технологии.* 2017. Т. 31, № 10. С. 19.
14. *Галыш В.В.* // *Поверхность.* 2015. Вып. 7(22). С. 94.
15. *Крупская В.В., Бирюков Д.В., Белоусов П.Е., Лехов В.А., Романчук А.Ю., Калмыков С.Н.* // *Радиоактивные отходы.* 2018. № 2(3). С. 30.
16. *Missana T., García-Gutiérrez M., Benedicto A., Ayora C., De-Pourcq K.* // *Appl. Geochem.* 2014. Vol. 47. P. 177.
17. *Siroux B., Wissocq A., Beaucaire C., Latrille Ch., Petcut C., Calvaire J., Tabarant M., Benedetti M.F., Reiller P.E.* // *Appl. Geochem.* 2018. Vol. 99. P. 65.
18. *Missana T., Benedicto A., García-Gutiérrez M., Alonso U.* // *Geochem. Cosmochim. Acta.* 2014. Vol. 128. P. 266.
19. *Мартынов К.В., Коневник Ю.В., Захарова Е.В.* // *Тр. ВЕСЭМПГ-2020 / Отв. ред. О.А. Луканин.* М.: ГЕОХИ РАН, 2020. С. 307.
20. *Robin V., Tertre E., Beaufort D., Regnault O., Sardini P., Descostes M.* // *Appl. Geochem.* 2015. Vol. 59. P. 74.
21. *Снакин В.В., Присяжная А.А., Рухович О.В.* Состав жидкой фазы почв. М.: РЭФИА, 1997. 325 с.