

# СОРБЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ $^{137}\text{Cs}$ , $^{90}\text{Sr}$ И $^{233}\text{U}$ НА РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ СОРБЕНТАХ

© 2021 г. В. В. Милютин<sup>а, \*</sup>, Н. А. Некрасова<sup>а, \*\*</sup>,  
П. Е. Белоусов<sup>б, \*\*\*</sup>, В. В. Крупская<sup>б, в, \*\*\*\*</sup>

<sup>а</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН,  
119071, Москва, Ленинский пр., д. 31, корп. 4

<sup>б</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35

<sup>в</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

e-mail: \*vmilyutin@mail.ru, \*\*nnekrassova@gmail.com,  
\*\*\*pitbl@mail.ru, \*\*\*\*krupskaya@ruclay.com

Поступила в редакцию 20.02.2020, после доработки 14.04.2020, принята к публикации 21.04.2020

Изучены сорбционные характеристики ряда природных материалов – диатомита, трепела и бентонитоподобной породы – по отношению к радионуклидам  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{233}\text{U}$ . Показано, что эффективность сорбции  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  прямо пропорциональна содержанию глинистой составляющей (минералов иллита и смектита) в образце и емкости катионного обмена (ЕКО), что свидетельствует об ионообменном механизме сорбции данных радионуклидов. Сорбционные характеристики исследованных образцов по отношению к  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  уменьшаются в ряду бентонитоподобная порода > диатомит > трепел. Коэффициенты распределения ( $K_d$ )  $^{137}\text{Cs}$  образцов бентонитовой породы и диатомита в диапазоне концентраций  $\text{NaNO}_3$  0.1–1.0 моль/дм<sup>3</sup> составляют более 10<sup>3</sup> см<sup>3</sup>/г, что свидетельствует о высоких сорбционно-селективных характеристиках данных пород по отношению к  $^{137}\text{Cs}$ . Значения  $K_d$   $^{90}\text{Sr}$  на всех исследованных сорбентах при сорбции из водопроводной воды на 1–2 порядка ниже по сравнению с сорбцией  $^{137}\text{Cs}$ , что связано с конкурентной сорбцией ионов кальция. Основным механизмом сорбции  $^{233}\text{U}$  является физическая адсорбция на поверхности минералов, которая пропорциональна величине удельной поверхности минералов. Значения  $K_d$   $^{233}\text{U}$  для всех исследованных сорбентов относительно невелики и находятся в пределах 48–160 см<sup>3</sup>/г. Показано, что природные сорбенты – бентонитоподобные глины и диатомиты – могут быть использованы в качестве эффективных геохимических барьеров для предотвращения миграции радионуклидов цезия и стронция из хранилищ радиоактивных отходов.

**Ключевые слова:** опал-кристаллитовые породы, глина, диатомит, трепел, природные сорбенты, сорбция, радионуклиды, цезий, стронций, уран

DOI: 10.31857/S0033831121060022

## ВВЕДЕНИЕ

В результате деятельности предприятий ядерного топливного цикла и выполнения программ оборонного значения образовалось значительное количество радиационно-опасных объектов: приповерхностные хранилища твердых радиоактивных отходов, водоемы-хранилища жидких радиоактивных отходов (ЖРО), конструктивно сложные объекты, например, промышленные уран-графитовые

реакторы (ПУГРы), технологические здания, лаборатории и т.п. Проблема многих объектов ядерного наследия – близость гидрографических сетей, что влечет необходимость создания надежных гидроизоляционных барьеров для предотвращения миграции радиоактивных веществ в окружающую среду. Одним из основных требований к надежности барьера является эффективная сорбция радионуклидов гидроизоляционными материалами. В настоящее время в качестве барьерных материалов при

подземном захоронении радиоактивных отходов наиболее часто используют бентонитовые глины, обладающие высокими сорбционными характеристиками по отношению к радионуклидам цезия [1–3].

Для успешного применения сорбентов любого типа требуется понимание не только их сорбционных свойств, но и детальное изучение их состава, структурных особенностей и механизмов сорбции. Данная работа посвящена изучению сорбции  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{233}\text{U}$  на осадочных кремнистых (диатомит, трепел) и глинистых породах. Основным отличием между диатомитом и трепелом является соотношение аморфного опала и кристобалита, а также степень их литификации. Диатомит представляет собой слаболитифицированные отложения панцирей диатомовых водорослей, состоящих из аморфного (биогенного) опала. За счет высокой пористости панцирей диатомей эта порода обладает высокой удельной поверхностью [4]. К трепелам принято относить кремнистые породы с более высоким содержанием кристобалита, образовавшегося за счет переотложения первичного биогенного опала.

Применение природного диатомита и трепела в качестве фильтров для очистки радиоактивно загрязненных вод рассматривалось рядом авторов при их очистке от радионуклидов Cs, Sr и некоторых других металлов [5–9]. Природные и модифицированные формы диатомита также изучали на предмет удаления органических соединений, ионов урана и радионуклидов из жидких отходов [5, 10–12].

Однако проблема исследования сорбционных свойств опал-кристобалитовых пород заключается в том, что для большинства осадочных месторождений характерно высокое содержание примеси глинистых минералов, как правило, иллита и смектита. Зачастую при изучении сорбции не уделяется должного внимания влиянию глинистых примесей в составе пород, что приводит к неверной интерпретации результатов исследований, а именно механизмов сорбции и реальных величин сорбции на опал-кристобалитовой минеральной фазе. Даже небольшая примесь глинистых минералов может значительно повлиять на результаты исследований за счет их высокой сорбционной способности. Таким образом, для лучшего понимания механизмов сорбции в данной работе была изучена сорбция радио-

нуклидов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{233}\text{U}$  как на опал-кристобалитовых, так и на глинистых породах.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Материалы и методы исследования.

Материалом для исследования служили образцы природного диатомита, трепела и бентонитоподобной породы: Д-исх – диатомит Инзенского месторождения (Ульяновская обл.); Д-обог – диатомит Инзенского месторождения отмытый от глинистой фракции <2 мкм; Тр – природный трепел (American Tripoli Ltd., США); Бент – бентонитоподобная порода Нелидовского месторождения (Белгородская обл.).

С целью выявления корреляции между сорбцией радионуклидов и минеральным составом в экспериментах использовался отмытый от глинистой фракции < 2 мкм образец диатомита (Д-обог). Обогащение проводили в водном столбе по формуле Стокса с соотношением твердой и жидкой фазы как 1 к 100. Суспензия отстаивалась 24 ч для достижения равновесия, после чего через заданное время, определяемое с помощью закона Стокса, с фиксированной глубины отбирали нужную гранулометрическую фракцию [13].

Минеральный состав определяли методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ULTIMA-IV (Rigaku, Япония). Рабочий режим – 40 кВ, 40 мА, медное излучение, никелевый фильтр, диапазон измерений  $2\theta$   $3^\circ$ – $65^\circ$ , полупроводниковый детектор нового поколения DTex/Ultra. Анализ результатов проводили согласно рекомендациям, описанным в работах [14, 15]. Количественный минеральный анализ осуществляли методом Ритвельда в программном пакете PROFEX GUI для BGMN.

Концентрацию порообразующих химических элементов в пробах определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) на спектрометре последовательного действия Axios Advanced (PANalytical, Нидерланды). Спектрометр снабжен рентгеновской трубкой мощностью 4 кВт с Rh анодом. Максимальное напряжение на трубке – 60 кВ, максимальный анодный ток – 160 мА. Потери при прокаливании определяли при  $1000^\circ\text{C}$  в атмосфере воздуха до установления постоянной массы образца.

**Таблица 1.** Минеральный состав изученных образцов

Название минерала	Содержание минерала, мас%, в образцах			
	Д-исх	Д-обог	Тр	Бент
Смектит	19.4	13.2	–	34.9
Иллит	6.7	8.9	–	12.8
Каолинит	–	–	–	5.3
Клиноптилолит	–	–	–	8.6
Кварц	10.1	26.5	9.3	22.1
Опал-кристобалит	62.0	46.4	88.5	–
Микроклин	1.4	3.6	0.3	4.3
Альбит	0.4	1.4	–	2.8
Ярозит	–	–	0.4	–
Анализ	–	–	0.6	–
Кальцит	–	–	–	9.2
Галит	–	–	0.9	–
Сумма	100	100	100	100

Площадь удельной поверхности определяли на установке Quadrasorb SI/Kr. Адсорбцию проводили при температуре жидкого азота (77.35 К). Адсорбентом служил азот с чистотой 99.999%, для калибровки объема измерительных ячеек использовали гелий марки 6.0 (99.9999%). Расчет поверхности проводили методом БЭТ по нескольким точкам изотермы в диапазоне  $P/P_s$  от 0.05 до 0.30. Образцы предварительно высушивали в вакуумной установке при 100°C в течение определенного времени (5–24 ч) в зависимости от свойств исходных образцов.

Сорбционные характеристики сорбентов определяли в статических условиях путем непрерывного перемешивания навески воздушно-сухого сорбента массой около 0.1 г, взвешенной с точностью 0.0001 г, с 20 см<sup>3</sup> раствора в течение 48 ч. Затем смесь фильтровали через бумажный фильтр «белая лента» и определяли в фильтрате удельную активность соответствующего радионуклида. По результатам анализов рассчитывали значения коэффициента распределения ( $K_d$ ) радионуклида по формуле

$$K_d = \frac{A_0 - A_p}{A_p} \times \frac{V_p}{m_c},$$

где  $A_0$ ,  $A_p$  – соответственно удельная активность радионуклида в исходном растворе и в фильтрате, Бк/дм<sup>3</sup>;  $V_p$  – объем жидкой фазы, см<sup>3</sup>;  $m_c$  – масса сорбента, г.

Удельную активность <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr и <sup>233</sup>U в растворах определяли прямым радиометрическим методом с использованием универсального спектрометрического комплекса СКС-50М («Грин стар технолоджиз», Москва) с использованием гамма-, бета- и альфа-спектрометрического тракта соответственно. Пробы, содержащие <sup>90</sup>Sr, перед измерением выдерживали в течение не менее 14 сут для установления радиоактивного равновесия пары <sup>90</sup>Sr–<sup>90</sup>Y. Перед началом экспериментов в воду вносили индикаторные количества (~10<sup>5</sup> Бк/дм<sup>3</sup>) радионуклидов и выдерживали в течение 5 сут для установления гидролитического равновесия между радиоактивными и неактивными компонентами раствора.

Емкость катионного обмена (ЕКО) определяли по сорбции метиленового голубого (МГ) в соответствии с ГОСТ 21283–93 «Глина бентонитовая для тонкой и строительной керамики». Методика предполагает титрование суспензии раствором МГ до его избытка в растворе.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Характеристики сорбентов.** Как видно из табл. 1, образец диатомита Инзенского месторождения на 62% состоит из опал-кристобалитовой фазы. Глинистые минералы представлены смектитом и иллитом, содержание которых составляет 19.4 и 7.6 мас% соответственно. Оставшиеся 11.9% приходятся на примеси (кварц и полевые шпаты), не влияющие на сорбционные характеристики образца.

Отмывка образца диатомита от фракции <2 мкм (Д-обог) не привела к полному удалению глинистых минералов. Содержание смектита и опал-кристобалитовой фазы уменьшилось до 13.2 и 46.4% соответственно, в то время как содержание иллита и кварца увеличилось до 8.9 и 26.5% соответственно. Содержание остальных минералов изменилось незначительно. Образец природного трепела (США) имеет довольно однородный состав, что является редкостью для осадочных месторождений; он состоит из опала и кристобалита на 88.5%. Основной примесью является кварц и в незначительных количествах галит, анатаз, ярозит и микроклин. Глинистая порода Белгородской обл.

**Таблица 2.** Химический состав образцов сорбентов

Название образца	ППП <sup>a</sup> , %	Содержание, %								
		Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Д-исх	9.12	0.27	0.87	6.03	79.18	1.34	0.4	0.38	0.006	2.15
Тр	2.2	0.27	<0.01	1.00	95.4	0.05	0.09	0.83	<0.01	0.08
Бент	22.1	2.129	1.26	16.5	41.6	0.95	11.7	0.77	0.125	2.75

<sup>a</sup>ППП – потери при прокаливании.

**Таблица 3.** Физико-химические свойства образцов сорбентов

Название образца	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	ЕКО, мг-экв/100 г
Д-исх	24 ± 2	15.0 ± 0.8
Д-обог	16 ± 1	6.7 ± 0.3
Тр	43 ± 3	<2
Бент	25 ± 2	22.5 ± 0.9

относится к бентонитоподобным глинам и содержит 34.9% смектита, 12.8% иллита и 5.8% каолинита. Помимо глинистых минералов, обладающих высокой емкостью катионного обмена (ЕКО), образец глины содержит 8.6% минералов группы цеолитов (клиноптилолит). Остальные примеси представлены кварцем, полевыми шпатами и кальцитом. Химический состав является характерным для всех исследуемых пород и представлен в табл. 2.

Значения емкости катионного обмена (ЕКО) представлены в табл. 3.

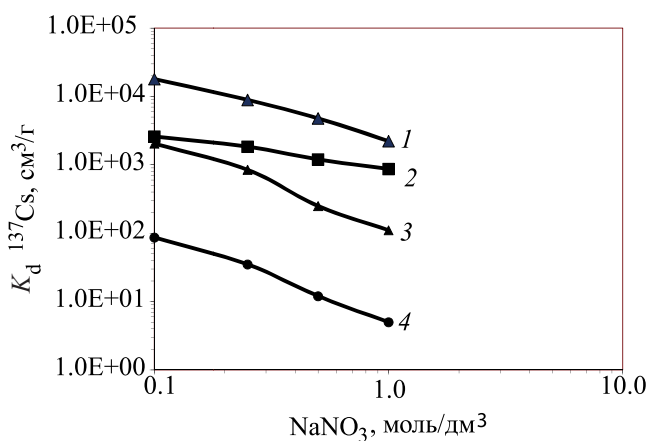
Максимальная емкость соответствует глинистой породе и составляет 22.5 мг-экв/100 г. Образец диатомита имеет значительно меньшую емкость – 15 мг-экв/100 г. Наименьшие величины ЕКО соответствует образцу трепела и составляют менее 2 мг-экв/100 г. Очевидно, что ЕКО образцов связано исключительно с содержанием глинистых минералов, в особенности смектита, что подтверждается результатами рентгенодифракционных исследований (табл. 1). Поскольку поверхность частиц опала, кристобалита и диатомей в кремнистых породах не имеют отрицательного заряда, связанного с изоморфными замещениями в структуре минералов, сорбция красителя МГ на поверхности минералов отсутствует.

Максимальная величина удельной поверхности (табл. 3) соответствует образцу трепела и состав-

ляет 43 м<sup>2</sup>/г. Образцы диатомита и глинистой породы имеют близкую удельную поверхность – 24 и 25 м<sup>2</sup>/г соответственно. Поскольку для минералов опал-кристобалитовой группы характерно широкое развитие микропористости, а глинистые минералы состоят из слоистых агрегатов микронной и субмикронной размерности, именно они и вносят основной вклад в величину удельной поверхности [4, 5, 14].

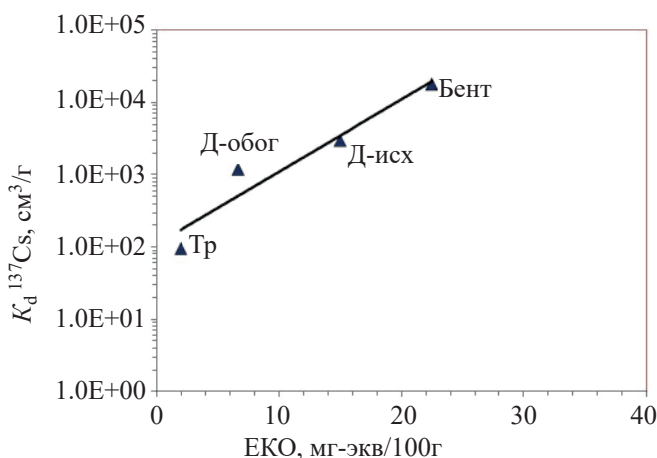
**Сорбция <sup>137</sup>Cs.** Сорбционные характеристики образцов по отношению к <sup>137</sup>Cs изучали путем определения зависимости коэффициента распределения ( $K_d$ ) от концентрации нитрата натрия в растворе в диапазоне концентраций 0.1–1.0 моль/дм<sup>3</sup>, рН 6.0. Полученные результаты приведены на рис. 1.

Представленные результаты показывают, что эффективность сорбции <sup>137</sup>Cs коррелирует с содержанием глинистой составляющей в образцах (табл. 1). Наибольшие значения  $K_d$  <sup>137</sup>Cs наблюдаются для бентонитовой глины, содержащей 47.7% смектита и иллита, а также 8.6% природно-



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента распределения ( $K_d$ ) <sup>137</sup>Cs от концентрации NaNO<sub>3</sub> в растворе на различных образцах сорбентов: 1 – Бент, 2 – Д-исх, 3 – Д-обог, 4 – Тр.





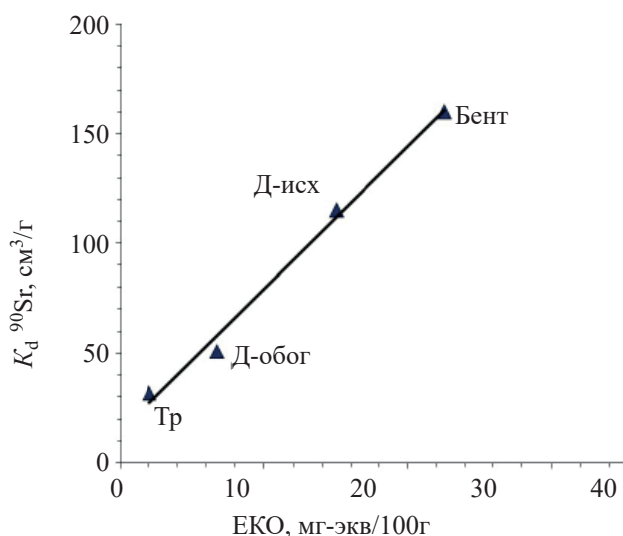
**Рис. 2.** Зависимость коэффициента распределения ( $K_d$ )  $^{137}\text{Cs}$  в 0.1 моль/дм<sup>3</sup>  $\text{NaNO}_3$  от емкости катионного обмена (ЕКО) для образцов Бент, Д-обог, Д-исх и Тр.

го цеолита (клиноптилолита), обладающего высокими сорбционно-селективными характеристиками по отношению к цезию. По мере снижения содержания глинистых минералов закономерно снижаются и сорбционные показатели образцов по отношению к  $^{137}\text{Cs}$  в следующем ряду: Бент > Д-исх > Д-обог > Тр.

Для всех изученных образцов значения  $K_d$   $^{137}\text{Cs}$  закономерно снижаются при увеличении концентрации  $\text{NaNO}_3$  в растворе, при этом полученные зависимости в билогарифмических координатах  $\lg C - \lg K_d$  представляют собой прямые линии, что свидетельствует об ионообменном характере сорбции цезия. Об этом же свидетельствует высокая корреляция между значениями  $K_d$   $^{137}\text{Cs}$  (в 0.1 моль/дм<sup>3</sup>  $\text{NaNO}_3$ ) и ЕКО (рис. 2).

Абсолютные значения  $K_d$   $^{137}\text{Cs}$  образцов бентонитоподобной глины и диатомита в диапазоне концентраций  $\text{NaNO}_3$  0.1–1.0 моль/дм<sup>3</sup> составляют более  $10^3$  см<sup>3</sup>/г, что свидетельствует о высокой селективности сорбции смектитов и иллитов, входящих в состав изученных пород, по отношению к  $^{137}\text{Cs}$ .

**Сорбция  $^{90}\text{Sr}$ .** При сорбции  $^{90}\text{Sr}$  в качестве жидкой фазы использовали водопроводную воду г. Москвы состава, мг/дм<sup>3</sup>:  $\text{Na}^+$  6–8,  $\text{K}^+$  4–5,  $\text{Mg}^{2+}$  15–17,  $\text{Ca}^{2+}$  52–56;  $\text{Cl}^-$  6–8,  $\text{SO}_4^{2-}$  36–38,  $\text{HCO}_3^-$  200–205; общее солесодержание 310–330, общая жесткость 3.6–3.8 мг-экв/дм<sup>3</sup>, pH 7.5–7.8. Полученные результаты приведены ниже.



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента распределения ( $K_d$ )  $^{90}\text{Sr}$  в водопроводной воде от емкости катионного обмена (ЕКО) для образцов Бент, Д-обог, Д-исх и Тр.

Значения коэффициента распределения ( $K_d$ )  $^{90}\text{Sr}$  на различных образцах сорбентов при сорбции из водопроводной воды

Сорбент	Бент	Д-исх	Д-обог	Тр
$K_d$ $^{90}\text{Sr}$ , см <sup>3</sup> /г	161 ± 3	114 ± 3	51 ± 2	32 ± 2

Приведенные результаты показывают, что, как и в случае сорбции  $^{137}\text{Cs}$ , эффективность поглощения  $^{90}\text{Sr}$  в целом коррелирует с содержанием глинистой составляющей и соответственно с величиной ЕКО (рис. 3).

Абсолютные значения  $K_d$  для  $^{90}\text{Sr}$  на всех исследованных сорбентах на 1–2 порядка ниже по сравнению с сорбцией  $^{137}\text{Cs}$ . Это связано с относительно низкой селективностью сорбции стронция в присутствии конкурирующего иона кальция, присутствующего в водопроводной воде [16].

Сорбция цезия и стронция на минералах группы смектита в основном проходит в межслоевом промежутке и на поверхности кристаллитов за счет замещения гидратированных катионов  $\text{Na}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$  [17]. Поведение цезия и стронция на иллите хорошо объясняется сорбционной моделью Comans [18], основанной на предположении о существовании сорбционных центров на поверхности иллита, связанных с высоким тетраэдрическим зарядом, а также о существовании так называемых FES позиций (frayed edge sites), образованных за счет крае-

вых дефектов глинистых частиц, что способствует селективному замещению калия одновалентными катионами. Подобная модель была подтверждена в последующих работах [19, 20]. Сорбция на цеолите заключается в замещении негидратированных катионов металлов во внутрикристаллических каналах.

Низкие показатели сорбции  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  на трепеле связаны с отсутствием заряда на поверхности опал-кристобалита. В этом случае незначительная сорбция может проходить только за счет физической адсорбции на поверхности минералов.

**Сорбция  $^{233}\text{U}$ .** При сорбции  $^{233}\text{U}$  в качестве жидкой фазы использовали водопроводную воду г. Москвы приведенного выше состава. Полученные значения  $K_d$   $^{233}\text{U}$  приведены ниже.

Значения коэффициента распределения ( $K_d$ )  $^{233}\text{U}$  на различных образцах сорбентов при сорбции из водопроводной воды

Сорбент	Бент	Д-исх	Д-обог	Тр
$K_d$ $^{233}\text{U}$ , см <sup>3</sup> /г	63 ± 2	57 ± 3	48 ± 2	160 ± 3

Приведенные результаты показывают, что значения  $K_d$  для  $^{233}\text{U}$  в отличие от сорбции  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  не зависят от содержания глинистой составляющей и величины ЕКО в образцах, что свидетельствует о различном механизме сорбции урана и цезия (стронция). Данное различие, возможно, связано с нахождением урана в водопроводной воде в виде отрицательно заряженных карбонатных комплексов, которые практически не сорбируются на катионообменных группах глинистых минералов. Можно предположить, что основным механизмом сорбции урана на изученных образцах является физическая адсорбция на поверхности минералов. Подтверждением этого служит приведенная на рис. 4 зависимость  $K_d$   $^{233}\text{U}$  от удельной поверхности ( $S_{уд}$ ) образцов Бент, Д-обог, Д-исх и Тр, которая оказывается линейной. Однако абсолютные значения  $K_d$   $^{233}\text{U}$  для всех исследованных сорбентов невелики, что связано с относительно небольшими значениями их удельной поверхности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами изучены сорбционные характеристики ряда природных материалов: диатомита (Д-исх), трепела (Тр) и бентонитоподобной породы (Бент)

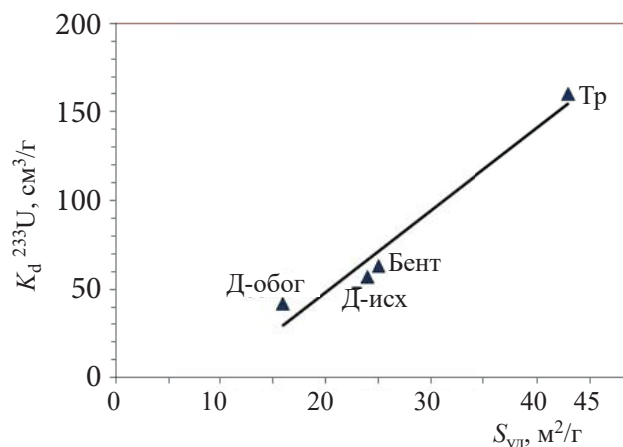


Рис. 4. Зависимость коэффициента распределения ( $K_d$ )  $^{233}\text{U}$  в водопроводной воде от удельной поверхности ( $S_{уд}$ ) для образцов Бент, Д-обог, Д-исх и Тр.

по отношению к радионуклидам  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{233}\text{U}$ . Показано, что эффективность сорбции  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  прямо пропорциональна содержанию в образцах глинистой составляющей (минералов группы смектита и иллита) и как следствие – величине емкости катионного обмена (ЕКО), что свидетельствует об ионообменном механизме сорбции данных радионуклидов. Сорбционные характеристики исследованных образцов по отношению к  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  уменьшаются в следующем ряду Бент > Д-исх > Тр. Значения коэффициентов распределения ( $K_d$ )  $^{137}\text{Cs}$  образцов бентонитоподобной глины и диатомита в диапазоне концентраций  $\text{NaNO}_3$  0.1–1.0 моль/дм<sup>3</sup> составляют более  $10^3$  см<sup>3</sup>/г, что свидетельствует о высоких сорбционно-селективных характеристиках данных минералов по отношению к  $^{137}\text{Cs}$ . Значения  $K_d$   $^{90}\text{Sr}$  на всех исследованных сорбентах при сорбции из водопроводной воды на 1–2 порядка ниже по сравнению с сорбцией  $^{137}\text{Cs}$ , что связано, вероятно, с относительно низкой селективностью сорбции стронция в присутствии ионов кальция, входящих в состав водопроводной воды. Основным механизмом сорбции радионуклида  $^{233}\text{U}$ , в отличие от сорбции  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , является физическая адсорбция на поверхности минералов. Абсолютные значения  $K_d$   $^{233}\text{U}$  (48–160 см<sup>3</sup>/г) для всех исследованных сорбентов невелики, что связано с относительно небольшими значениями удельной поверхности образцов. В целом природные сорбенты – бентонитоподобные глины и диатомит – могут быть использованы в качестве эффективных геохимических барьеров для предотвращения миграции радионуклидов цезия из

хранилищ радиоактивных отходов. Использование данных природных материалов для фиксации радионуклидов стронция и урана значительно менее эффективно.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Закусину С.В. за проведенные исследования минерального состава и Тюпиной Е.А. за проведенные измерения удельной поверхности.

### ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Аналитические работы по исследованию состава и свойств природных сорбентов проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-77-00015). Сорбционные эксперименты проведены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0067-2019-008).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Selin P., Leupin O.X.* // *Clays Clay Miner.* 2014. Vol. 61, N 6. P. 477–498.
2. *Крупская В.В., Бирюков Д.В., Белоусов П.Е., Лехов В.А., Романчук А. Ю., Калмыков С. Н.* // Радиоактивные отходы. 2018. № 2. С. 30–43.
3. *Захарова Е.В., Андрющенко Н.Д., Родыгина Н.И., Ермолаев В.М.* // Матер. V Рос. школы по глинистым минералам *Argilla Studium*. 2017. С. 50–54.
4. *Кононенко О.А., Гелис В.М., Милютин В.В.* // Атом. энергия. 2010. Т. 109, № 4. С. 222–227.
5. *Osmanlioglu A.E.* // *Appl. Radiat. Isot.* 2007. Vol. 65. P. 17–20.
6. *Nenadović S., Kljajević L., Marković S., Omerašević M., Jovanović U., Andrić V., Vukanac I.* // *Sci. Sinter.* 2015. Vol. 47. P. 299–309.
7. *Johan E., Yoshida K., Munthali M. W., Matsue Na., Itagaki Y., Aono H.* // *J. Ceram. Soc. Jpn.* 2015. Vol. 123, N 12. P. 1065–1072.
8. *Huang C., Lin T., Chiao L., Chen H.* // *J. Hazard. Mater.* 2012. Vol. 233–234. P. 140–147.
9. *Belousov P., Semenkov A., Egorova T., Romanchuk A., Zakusin S., Dorzhieva O., Tyupina E., Izosimova Y., Tolpeshta I., Chernov M., Krupskaya V.* // *Minerals.* 2019. Vol. 9. P. 1–17.
10. *Shenga G., Yanga P., Tanga Y., Hua Q., Lia H., Rend X., Hua B., Wang X., Huang Y.* // *Appl. Catal. B: Environmental.* 2016. Vol. 193. P. 189–197.
11. *Ayta S., Akyil S., Aslani M.A.A., Aytekin U.* // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 1999. Vol. 240, N 3. P. 973–976.
12. *Sprynsky M., Kowalkowski T., Hlanganani T.E.M., Buszewski B.* // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2015. Vol. 465. P. 159–167.
13. *Бугров Я.С., Никольский С.М.* Дифференциальные уравнения. Кратные интегралы. Ряды. Функции комплексного переменного: Учеб. для вузов. М.: Дрофа, 2004. Т. 3. 512 с.
14. *Дриц В.А., Коссовская А.Г.* Глинистые минералы: смектиты, смешанослойные минералы. М.: Наука, 1990. 214 с.
15. *Moore D.M., Reynolds R.C., Jr.* *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals.* Oxford Univ. Press. 1997. 2nd ed. P. 378.
16. *Милютин В.В., Гелис В.М.* // *ЖПХ.* 1994. Т. 67, № 11. С. 1776–1779.
17. *Semenkova A.S., Evsiunina M.V., Verma P.K., Mohapatra P.K., Petrov V.G., Seregina I.F., Bolshov M.A., Comans N.J., Haller R., De Preter M.P.* // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1991. Vol. 55. P. 433–440.
18. *Bradbury M.H., Baeyens B.A.* // *J. Contam. Hydrol.* 2000. Vol. 42. P. 141–163.