

МЕТОД МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВЕРМИКУЛИТА ФЕРРОЦИАНИДОМ МЕДИ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ^{137}Cs ИЗ ЖИДКИХ СОЛЕВЫХ СРЕД

© 2021 г. Н. П. Шапкин^{а,*}, И. Г. Хальченко^а, А. И. Мацкевич^а, И. Г. Тананаев^{а,б,в}

^а Дальневосточный федеральный университет, 690091, Владивосток, ул. Суханова, д. 8

^б Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН,
119991, Москва, Ленинский пр., д. 31, корп. 4

^в Озерский технологический институт НИЯУ МИФИ,
456783, Озерск Челябинской обл., пр. Победы, д. 48

*e-mail: npshapkin@gmail.com

Получена 21.11.2019, после доработки 14.01.2020, принята к публикации 21.01.2020

Получены композитные материалы на основе вермикулита, модифицированного ферроцианидом меди с последующей обработкой хитозаном. Предварительно вермикулит обрабатывали соляной кислотой, затем целлюлозой с последующим осаждением всех солей, перешедших в раствор при помощи аммиака. Далее образец модифицировали ферроцианидом меди с последующим нанесением хитозана. Состав и свойства образцов вермикулита исследованы с помощью энергодисперсионного метода анализа, ИК спектроскопии, позитронно-аннигиляционной спектроскопии (ПАС), дифрактометрии, а также с помощью адсорбции азота при низкой температуре и адсорбции метиленового синего. Найдены удельная поверхность и внутренний объем образцов, которые измельчали в соответствии со стадией модификации. На основании данных ПАС рассчитаны удельные объемы аннигиляций позитрона и позитрония, которые коррелировали с данными низкотемпературной адсорбции азота. На модельных растворах исследованы сорбционные свойства модифицированных вермикулитов по отношению к ^{137}Cs в солевых растворах. На основании изотерм сорбции рассчитана предельная сорбционная емкость материалов. Для образцов, модифицированных ферроцианидом меди и хитозаном, она достигает 280 и 660 мг/г соответственно.

Ключевые слова: вермикулит, ферроцианид меди, хитозан, радионуклиды цезия, сорбция.

DOI: 10.31857/S0033831121030096

ВВЕДЕНИЕ

Сорбционное извлечение ^{137}Cs из технологических отходов и загрязненных природных вод является важнейшей радиоэкологической и технологической задачей [1, 2]. Для ее решения используют как природные материалы – цеолит (K_p до 5×10^3 мл/г) [3], клиноптилолит, морденит и шабазит (K_p до 0.52×10^3 мл/г) [3, 4], так и модифицированные сорбенты на их основе, содержащие ферроцианиды металлов $\text{KNi}_x[\text{Fe}(\text{CN})_6]_y$ (K_p до 72×10^3 мл/г) [5], $\text{Ti}_x[\text{Fe}(\text{CN})_6]_y$ (K_p до 0.6×10^3 мл/г)

[6, 7], $\text{Sn}_x[\text{Fe}(\text{CN})_6]_y$ (K_p до 0.3×10^3 мл/г) [6] или органические реагенты, например, бис-2,3-нафто-краун-6 на шабазите (K_p до 27.7×10^3 мл/г) [4]. Из солесодержащих растворов и морской воды для концентрирования ^{137}Cs используют также органические иониты, например, резорцинформальдегидную смолу (K_p до 5×10^3 мл/г) [8].

Анализ литературных данных по выбору сорбционных материалов для извлечения ^{137}Cs из водных сред указывает на перспективу использования таких эффективных и дешевых материалов, как цеолиты и сорбенты на их основе [9–11]. Положи-

тельными факторами при их использовании является высокая ионообменная емкость (до 3.7 мгэкв/г) и возможность надежного перевода извлеченных радионуклидов в твердую недиспергируемую форму путем прокаливании сорбента. Полученная таким образом керамическая матрица обеспечивает надежную иммобилизацию опасного радионуклида с последующим возможным захоронением.

Не меньший интерес вызывает использование для концентрирования ^{137}Cs сорбентов, которые в отличие от цеолитов обладают слоистой структурой. В качестве примера приводят фосфат олова(IV) $\text{Sn}(\text{NH}_4\text{PO}_4)(\text{HPO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (или $\beta\text{-Sn-P-NH}_4$, в протонной форме $\beta\text{-Sn-P-H}$) [12, 13], который легко интеркалируется алкиламинами от C_4NH_2 до C_{10}NH_2 с изменением межслоевого расстояния (d_{100}) от 20.3 до 32.6 Å соответственно. Данный сорбент обладает высокими величинами ионообменной емкости по ^{137}Cs – до 200 мг/г. Основным же положительным фактором при использовании данных сорбентов является их высокая эффективность (K_p до 200×10^3 мл/г) [4, 12, 14, 15].

В настоящей работе нами синтезирован и изучен сорбент нового поколения, сочетающий перечисленные выше преимущества известных сорбционных материалов: природный слоистый алюмосиликат – вермикулит, модифицированный ферроцианидом меди либо хитозаном.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходного материала был взят природный вермикулит Ковдорского месторождения, имеющий следующий вещественный состав, %: SiO_2 42.73, Al_2O_3 11.78, MgO 29.47, Fe_2O_3 8.72, CaO 5.75, TiO_2 0.85, K_2O 0.14. Вермикулит обладает слоистой структурой (рис. 1), межплоскостное расстояние которого равно 14.3 Å.

Используемые HCl , NH_4OH , CsCl , NaNO_3 , CuCl_2 (производства фирмы «Реахим») имели квалификацию ч.д.а.

Природный полисахарид хитозан имеет молекулярную массу не более 200000 Да, содержание в нем углеводов составляет 41.8, азота – 7.5, воды – 8.8%; степень дезацетилирования равна 84.0%; вязкость его 1%-ного раствора в 2%-ной

CH_3COOH равна 88.0 ммг/с проверить размерность. Брутто-формула природного полисахарида $(\text{C}_6\text{O}_4\text{H}_7\text{NH}_2)_n$.

Дифрактограммы регистрировали на приборе Advance-D8 (Bruker), используя CuK_α -излучение в диапазоне углов $2^\circ < 2\theta < 90^\circ$ в режиме сканирования по точкам.

ИК спектры образцов сорбентов записывали на спектрометре Spectrum-1000 (Perkin Elmer), используя таблетки из KBr.

Количественный элементный анализ образцов проводили с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра EDX-800-HS. Элементный состав поверхности образцов определяли с использованием сканирующего (растрового) электронного микроскопа Hitachi TM 3000 (Япония), включающего блок энергодисперсионного микроанализа Bruker. Ускоряющее напряжение ионной пушки 15 кВ для обратно-рассеянных (отраженных) электронов; пространственное разрешение при сканировании ионным пучком 50 нм.

Сорбцию красителя (метиленового голубого) проводили при 25°C из водного 0.1%-ного раствора; оптическую плотность растворов до и после сорбции определяли на спектрометре Uniko (концентрация красителя 1 г/л, объем раствора красителя от 100 до 500 мл). Анализ поверхности образцом методом физической адсорбции азота осуществляли на анализаторе ASAP 2020 MP (Micrometrics GmbH). Размер пор и их объем определяли с помощью ртутного поромера Autopore-4 методом БЭТ по изотерме адсорбции. Средний размер частиц рассчитывали по формуле $d = 6/(\rho S_{\text{уд}})$, где ρ – плотность материала, $S_{\text{уд}}$ – удельная поверхность. Плотность образцов определяли пикнометрически в гексане.

Времена жизни и интенсивности аннигиляций позитронов измеряли на спектрометре быстро-быстрых задержанных совпадений при помощи сцинтилляционных пластических детекторов размером 25×15 мм и ФЭУ-87 на базе анализатора Nokia LP 4840. Временное разрешение спектрометра $2\tau_0$ составляет 270 пс для источника ^{60}Co при 30%-ной ширине энергетического «окна». Для измерения времен жизни позитронов в исследуемых объектах использовался циклотронный источник ^{44}Ti с активностью 10–15 мКи. Обработку временных спектров проводили с помощью программы PALEIT.

Для нахождения концентрации дефектов и связанного с ними свободного объема (V_f) применимо уравнение:

$$V_f(e^+, ps) = \frac{V(e^+, ps)R^2(e^+, ps)}{3D}, \quad (1)$$

где $V(e^+, ps)$ – объемы «ловушек» e^+ и ps , $\text{\AA}^3$, R (м, ps) – радиусы «ловушек» e^+ и ps , $\text{\AA}^3$, D – диаметр e^+ и ps , $\text{\AA}^3$.

С помощью уравнения (1) можно рассчитать долю объема образцов, приходящую на свободный объем и объем матрицы ($\text{\AA}^3$):

$$V_{уд.} = \frac{V_{ps, e^+}}{(V_{ps} + V_{e^+}) \cdot N_{ps, e^+}}. \quad (2)$$

Морфологию поверхности изучали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на приборе Hitachi TM 3000 (Япония).

Общий метод модифицирования вермикулита целлюлозой: 100 г вещества (образец № 1) перемешивали в 200 мл 12%-ной HCl. В раствор вводили 10 г бумажной целлюлозы и диспергировали кавитатором при частоте 100 Гц в течение 2 ч. Суспензию осаждали аммиачным раствором до нейтральной реакции с последующим фильтрованием и высушиванием с последующим прогревом при 500–600°C (образец № 2).

Модифицирование вермикулита ферроцианидом меди проводили в 2 стадии: на первой стадии об-

разец № 2 обрабатывали насыщенным раствором CuCl_2 , промывали до полного удаления хлорид-иона (тест с ионами серебра); на второй стадии полученную суспензию обрабатывали насыщенным раствором ферроцианида калия. Суспензию промывали на фильтре, сушили до постоянной массы (образец № 3).

Модифицирование образца № 3 1.5%-ным раствором хитозана в 2%-ной CH_3COOH проводили в химическом стакане при интенсивном перемешивании. Для полного осаждения хитозана на поверхности композита после 30 мин перемешивания смесь подщелачивали раствором аммиака до pH 8–9. Затем суспензию отфильтровывали, промывали дистиллированной водой и высушивали до постоянной массы при 70°C в течении 4 ч (образец № 4).

Оценку сорбционных свойств вермикулита разнотипной модификации проводили с использованием модельных растворов, имеющих следующий состав: 1.0 моль/л по NaCl; щелочной раствор 1.25 моль/л по NaNO_3 и 0.75 моль/л по NaOH. Сорбционную емкость ферроцианидных сорбентов оценивали по изотермам сорбции, которые получали, приводя в контакт образцы с серией модельных растворов, содержащих заданное количество стабильного изотопа ^{133}Cs , при непрерывном перемешивании. Соотношение $m/V = 0.001$ г/мл, масса навески сорбента 0.05 г, зернение 0.1–0.2 мм. После окончания перемешивания, в растворах, отделенных от силиката фильтрованием, определяли равновесную концентрацию Cs. Эффективность сорбции ^{137}Cs рассчитывали по уравнению (3)

$$\text{Степень сорбции } \% = \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) \times 100. \quad (3)$$

Коэффициент распределения ^{137}Cs рассчитывали по формуле

$$K_p = \frac{A_0 - A_1}{A_1} \times \frac{V}{m}, \quad (4)$$

где A_0 – исходная активность раствора, Бк/л; A_1 – равновесная активность раствора, Бк/л; V – объем раствора, мл; m – масса навески, г.

Предельную сорбцию рассчитывали по стандартному уравнению Ленгмюра, используя программу SigmaPlot.

Кинетические характеристики ионообменного процесса оценивали с использованием модельного

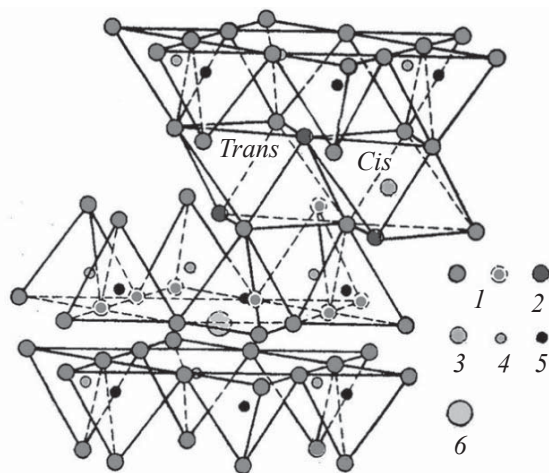


Рис. 1. Структура природного вермикулита. 1 – атомы О тетраэдров, 2 – группы OH октаэдрических сеток, 3 – Al, 4 – Si в ближних и дальних (пустой) тетраэдрах. 5 – Fe, 6 – Mg/Ca.

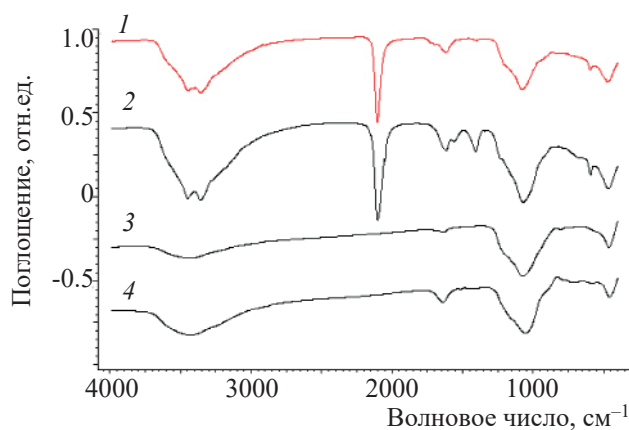


Рис. 2. ИК спектры образцов: 1 – № 1, 2 – № 2, 3 – № 3, 4 – № 4.

раствора, меченного радионуклидом ^{137}Cs (500–1000 Бк/мл). Ферроцианидные сорбенты приводили в контакт с модельным раствором при непрерывном перемешивании на орбитальном шейкере с амплитудой 10 мм и скоростью вращения 120 об/мин, $m/V = 0.001$ г/мл. Через определенные промежутки времени отбирали аликвоты раствора и определяли остаточную активность.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что введение целлюлозы улучшает сорбционные характеристики исходного вермикулита за счет появления новых слоев в структуре модифицированного материала, а кислотная его обработка увеличивает удельную поверхность в десятки раз [16, 17].

Первичную модификацию природного вермикулита (образец № 1) проводили 12%-ной HCl , целлюлозой с последующим осаждением 15%-ным NH_4OH . Был получен нейтральный сорбент № 2 с количественным выходом.

Сорбент № 2 обрабатывали раствором CuCl_2 и ферроцианидом калия, получали сорбент № 3.

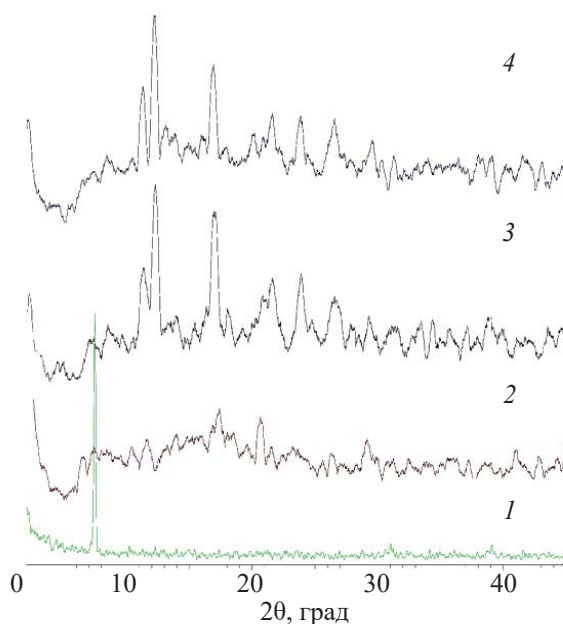


Рис. 3. Дифрактограммы: 1 – природный вермикулит, 2 – сорбент № 2, 3 – сорбент № 3, 4 – сорбент № 4.

Сорбент № 3 с ферроцианидом меди обрабатывали 1.5% раствором хитозана в 2% уксусной кислоте и получали сорбент № 4. Данные элементного анализа полученных сорбентов приведены в табл. 1.

После обработки ферроцианидом общее содержание углерода возрастает на 5.3%, что соответствует комплексному соединению $\text{Cu}_x[\text{Fe}(\text{CN})_6]_y$, где $x = 1.5$, $y = 1.0$, в количестве 0.19 ммоль/г. После обработки хитозаном содержание углерода возрастает на 3.3%, что отвечает содержанию в продукте $\text{C}_6\text{O}_4\text{H}_7\text{NH}_2 + \text{Cu}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ при количестве хитозана, также равном 0.19 ммоль/г. Образование комплекса подтверждается данными ИК спектроскопии и дифрактометрии (рис. 2).

На ИК спектрах всех образцов (рис. 2, 1–4) наблюдаются полосы, отвечающие валентным колебаниям связи Si-O-Si в области $1000\text{--}1100\text{ см}^{-1}$, деформационные колебания связи Si-O в области

Таблица 1. Данные вещественного анализа исходных и модифицированных сорбентов

Номер образца	Образец	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	C	CuO
1	Природный вермикулит	42.73	11.78	8.72	0.14	29.47	–	–
2	Сорбент № 1 + HCl + целлюлоза + NH_3	56.9	5.18	8.34	0.36	26.0	1.8	–
3	Сорбент № 2 + $\text{Cu}_x[\text{Fe}(\text{CN})_6]_y$	48.5	10.1	7.91	0.85	22.7	7.1	4.5
4	Сорбент № 3 + хитозан	45.3	9.2	5.8	0.64	22.3	10.4	4.0

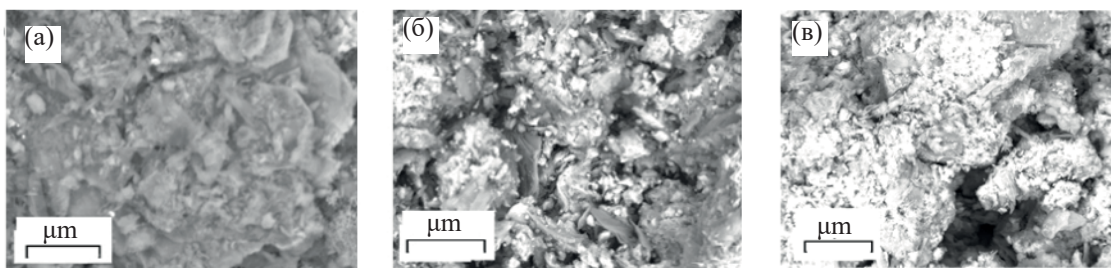


Рис. 4. Растровая электронная микроскопия. Образец: (а) № 2, (б) № 3, (в) № 4.

400–480 см^{-1} , широкие полосы поглощения в области 3387–3450 см^{-1} указывают на наличие валентных колебаний связей Н–О– в составе силанольных групп или ассоциированных молекул воды. Деформационные колебания связей Н–О проявляются в области 1600–1650 см^{-1} . На ИК спектрах образцов 3 и 4 (рис. 2, 3, 4) наблюдаются полосы поглощения, отвечающие валентным колебаниям связи $\text{C}\equiv\text{N}$ в области 2102–2014 см^{-1} и деформационным колебаниям связей $\text{Fe}-\text{C}\equiv\text{N}$ в области 592–589 см^{-1} .

На ИК спектре образца 4, модифицированного хитозаном (рис. 2, 4), появляются полосы поглощения, отвечающие валентным колебаниям связи $\text{N}-\text{H}$ в области 3276 см^{-1} , также наблюдаются полосы при 1405 (колебания связи $\text{C}-\text{N}$) и 1560 см^{-1} (деформационные колебания связи $\text{N}-\text{H}$ в полисахариде).

На дифрактограмме образца № 1 (рис. 3, 1) наблюдаются четкие отражения, отвечающие структуре природного вермикулита. При обработке кислотой с последующим осаждением (образец 2), на дифрактограмме (рис. 3, 3) наблюдаются два раз-

личных гало, которые отвечают межплоскостному расстоянию и внутрицепному фрагменту $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ соответственно.

Наличие размытых гало свидетельствует о значительном разрушении структуры природного вермикулита. При модификации ферроцианидом меди происходит разрушение первичной слоистой структуры на поверхности вермикулита с образованием хлопьевидных наслоений (эксфолиация) и наблюдается отражение для ферроцианида (рис. 3, 3), при нанесении хитозана (рис. 3, 4) картина остается такой же.

По формуле Шеррера были рассчитаны размеры (D) областей когерентного рассеивания ($V_{\text{ОКР}}$) для всех образцов (табл. 2)

$$D = \frac{0.89\lambda}{\cos Q \times \text{FWHM}}, \quad (5)$$

где λ – длина волны излучения, нм; $\cos Q$ – угол рассеяния, $\text{\AA}$; FWHM – ширина на полувысоте, рад.

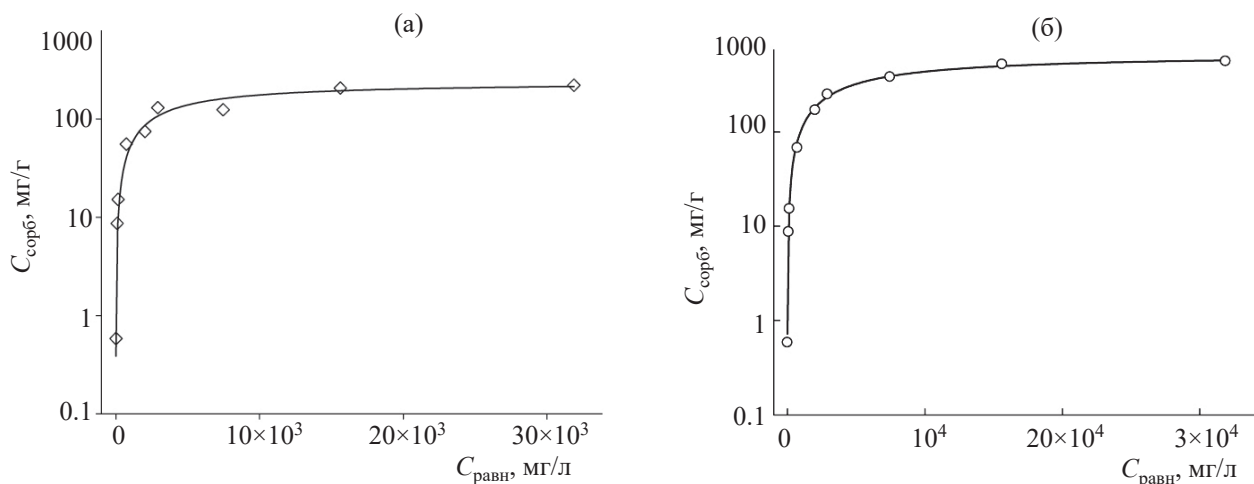


Рис. 5. Изотерма сорбции: (а) образец № 3, (б) образец № 4.

Таблица 2. Физико-химические характеристики сорбентов №№ 1–4, рассчитанные из данных ПАС. [$L(D)$ (Å) – размер области когерентного рассеяния в композите]

Номер образца	$L(D)$, Å	Площадь сечения ОКР S , Å ²	Объем ОКР, Å ³
1	1785.0	143.0	255055.0
2	55.8	24.9	1389.0
3	14.5	189.0	2741.0
4	29.7	293.0	8702.0

Также были рассчитаны площади поперечного сечения (S) по уравнению Миллера–Бойера [18] (табл. 2).

Из полученных данных рассчитывали объем области когерентного рассеяния

$$\text{ОКР} = L(D)S. \quad (6)$$

Согласно полученным данным, природный вермикулит представляет собой микрокристаллит, средний размер которого равен 0,18 мкм. Это предположение подтверждается данными работы [19]. В то же время модифицированные образцы имеют средний размер ОКР (равный размеру кристаллита) от 3 до 8 мкм.

Таким образом, при воздействии кислоты резко уменьшается размер и объем области когерентного рассеивания, это объясняется эксфолиацией слоистого силиката (сорбент № 2). При этом наблюда-

ется закономерность, когда с увеличением объема и кристалличности модификатора увеличивается объем ОКР и площадь поперечного сечения ОКР с появлением новой фазы на поверхности сорбента (сорбент № 3). Для установления химической природы поверхности сорбентов и их морфологии образцы 2–4 исследовали с помощью растровой электронной микроскопии (рис. 4, а, б, в; табл. 3).

На поверхности образца № 2 наблюдаются частично обугленные волокна целлюлозы. Эти частицы равномерно покрыты ферроцианидом меди на поверхности образца № 3. На поверхности образца № 4 наблюдается увеличенное содержание углерода, азота, что связано с появлением полимерной пленки хитозана. Однако соотношение атомов углерода к атомам кремния изменяется: № 2 – 45.8, № 3 – 13.6, № 4 – 72.6. Таким образом, на стадии обработки ферроцианидом меди, несмотря на увеличение числа атомов углерода в виде цианид-иона, эти соотношения резко уменьшаются. Это свидетельствует о том, что ферроцианид меди равномерно распределяется по всему объему зерна вермикулита, уменьшая внутренний удельный объем (табл. 4). В то же время при обработке хитозаном образуется пленка, преимущественно на поверхности, снижая тем самым содержание на поверхности других элементов и увеличивая внутренний удель-

Таблица 3. Результаты определения элементного состава сорбентов № 2–4 методом ЭДС при растровой электронной микроскопии

Номер сорбента	Содержание, %								
	Fe	Al	Mg	Si	$C_{\text{внутр}}$	$C_{\text{пов-ти}}$	Fe/C	Al/Fe	Mg/Al
2	0.02	0.17	0.12	0.39	1.78	17.86	0.7	7.2	0.74
3	0.06	0.25	0.14	0.87	7.09	11.76	0.5	4.11	0.56
4	0.05	0.11	0.08	0.31	10.47	22.5	0.3	2.2	0.75

Таблица 4. Физико-химические характеристики сорбентов № 1–4, рассчитанные из данных ПАС, БЭТ, изотермы сорбции ($S_{\text{уд}}$ – удельная площадь поверхности; $d_{\text{пор}}$ – диаметр пор; $V_{\text{уд}}$ – удельный внутренний объем; $V_{\text{ps}+}$ – удельный объем аннигиляции позитрона; $V_{\text{e}+}$ – удельный объем ловушки матрицы; G_{maxCs} – полная кинетическая сорбционная емкость).

Номер сорбента	$S_{\text{уд}}$, м ² /г (БЭТ)	$V_{\text{уд}}$, см ³ /г (БЭТ)	$d_{\text{пор}}$, нм (БЭТ)	$V_{\text{ps}+}$, Å ³ (ПАС)	$V_{\text{e}+}$, Å ³ (ПАС)	Адсорбция, мг/г (БЭТ)	G_{maxCs} , мг/г
1	8.6	0.013	8.0	292.5	265.6	3.6	0.1
2	225.0	0.225	4–4.8	314.0	243.0	120.1	12.0
3	161.5	0.148	3–4.0	459.3	468.6	105.0	247.0
4	76.9	0.330	5–11.0	1318.6	1230.0	115.0	669.0

Таблица 5. Сорбция ^{137}Cs на сорбентах № 1–4 в статических условиях

Параметр	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Раствор NaCl (0.1 моль/л)				
Степень сорбции, %	61.4	65.6	99.7	99.8
K_p , мл/г	1.6×10^3	1.9×10^3	3.9×10^5	5.8×10^5
Щелочной раствор ^a				
Степень сорбции, %	12.4	23.4	98.4	99.7
K_p , мл/г	1.1×10^3	0.3×10^3	6.4×10^3	3.4×10^3

^a 1.25 моль/л NaNO_3 + 0.75 моль/л NaOH .

ный объем (табл. 4). Первый образец исключается из этой зависимости, так как он является кристаллическим.

Определение адсорбционных характеристик при низкотемпературной адсорбции азота (табл. 4) показало, что происходит увеличение удельного внутреннего объема сорбентов в ряду № 2 < № 4 < № 3. В то же время уменьшение удельной площади поверхности ($S_{\text{уд}}$, м²/г) согласуется с уменьшением числа аннигиляций (или активных адсорбционных центров) позитрона и позитрония (табл. 4).

Была изучена адсорбция ^{137}Cs при различной концентрации иона натрия (табл. 5). Показано значительное отличие коэффициентов распределения для образцов 1 и 2 от таковых для образцов 3 и 4, что связано с наличием сорбционной фазы – ферроцианида меди. Осажденный на поверхности композитного материала хитозан (образец 4) препятствует растворению ферроцианида меди и частичной десорбции ^{137}Cs в раствор.

При исследовании сорбции цезия в статических условиях были получены изотермы (рис. 5), на основе которых была вычислена максимальная величина адсорбции цезия, для образца № 4 равная 669 мг/г, что в 2.3 раза выше, чем полученная для образца № 3.

В образце сорбента № 4 концентрации ионов цезия достигает 67% (табл. 5) по отношению к массе навески, при этом предельное значение сорбционной емкости сорбента № 4 равно 5.0 ммоль/г.

Таким образом, модифицирование слоистого силиката вермикулита ферроцианидом меди позволя-

ет получить эффективный сорбент для извлечения ^{137}Cs из водных стоков, загрязненных радиоактивным Cs. При этом распределение ферроцианидной фазы происходит во всем объеме сорбента, это подтверждается прямой зависимостью объема ловушки матрицы ($V_{\text{е+}}$, Å³) от объема когерентного рассеяния ($V_{\text{окр}}$, Å³) для сорбентов, последовательно модифицированных кислотой, ферроцианидом меди и осаждением хитозана с помощью аммиачного раствора.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Раздел работы, связанной с изучением сорбционных характеристик синтезированных сорбентов, выполнялся в Центре общего пользования ОТИ НИЯУ МИФИ сотрудником Фёдоровой О.В.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзадания № 4.8063.2017/8.9

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kershaw P.J., Mac Cubbin D., Leonard K.S. // Sci. Total Environ. 1999. Vol. 237–238. P. 119–132.
2. Robertson H.A., Falconer J.R. // Nature. 1959. Vol. 184. P. 1699–1702.
3. Osmanoglu A. E. // J. Hazard. Mater. 2006. Vol. 137. P. 332–335
4. Borai E.H., Harjula R., Malinen L., Paajanen A. // J. Hazard. Mater. 2009. Vol. 172. P. 416–422.
5. Nalchi A., Aashi H., Javid A.H., Saberi R. // Appl. Radiat. Isot. 2007. Vol. 65. P. 482–487.
6. Zakaria E.S., Ali J.M., Aly H.F. // Adsorption. 2004. Vol. 10, N 3. P. 237–244.
7. Duff M.C., Hanter D.B., Hobbs D.T., Fink S.D., Dai Z., Bradey J.P. // Environ. Sci. Technol. 2004. Vol. 38. P. 5201–5207.
8. Faver-Reguillin A., Dunjic B., Lemaire M., Chonzel R. //

- Solvent Extr. Ion Exch. 2001. Vol. 19, N 1. P. 181–191.
9. Bosch P., Canuto D., Liguori B., Calella C. // J. Nucl. Mater. 2004. Vol. 324. P. 183–188.
10. de Gennaro B., Colella A., Cappelletti P., Pansini M., de Gemiaro M., Coulla C. // Stud. Surf. Sci. Catal. 2005. Vol. 158. P. 1153–1160.
11. Cappelletti P., Parisardo G., de Gennaro B., Collella A., Langella A., Graziano S.F., Leebich D., de Gennaro M. // J. Nucl. Mater. 2011. Vol. 414. P. 451–457.
12. Bortum A.I., Khainakov S.A., Bortuz L.N., Jamez E., Garcia J.A., Clearbiel A. // Mater. Res. Bull. 1999. Vol. 34, N 6. P. 921–932.
13. Clayden N.J., Dobson C.M. // J. Chem. Soc., Dalton Trans. 1989. N 5. P. 843–847.
14. Xing Hong Fang, Fang F., Chin Hai Lu, Zheng K. // Nucl. Eng. Technol. 2017. Vol. 49. P. 556–561.
15. Nishiyana Y., Hanabusa T., Mashita J.Y., Yamamoto Y. // J. Radianal. Nucl. Chem. 2016. Vol. 307. P. 1279–1285.
16. Shapkin N.P., Maiorov V.I., Leont'ev L.B., Shkuratov A.L., Shapkin V.Ya., Khal'chenko I.G. // Colloid J. 2014. Vol. 76. P. 746–752.
17. Shapkin N.P., Khal'chenko I.G., Panasenko A.E., Leont'ev L.B., Razov V.I. // J. Inorg. Mat. 2018. Vol. 54, N 9. P. 965–969.
18. Miller R.L., Boier R.F. // J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed. 1984. Vol. 22. P. 2043–2050.
19. Jsobe H., Hattori Y., Hayano T., Kanoh H., Yamamoto K.N., Kaneko K. // J. Colloid Interface Sci. 2006. Vol. 295. P. 482–489.