

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 546.04+544.726

ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИИ СТРОНЦИЯ АМОРФНЫМ
СИЛИКАТОМ КАЛЬЦИЯ

© 2022 г. С. Б. Ярусова^{a, b, *}, П. С. Гордиенко^a, О. О. Шичалин^c, Е. К. Папынов^c,
Е. А. Нехлюдова^{a, b}, А. В. Перфильев^b, С. Ю. Будницкий^d, Н. В. Зарубина^d, Ю. А. Паротькина^a,
А. Н. Драньков^a, С. Б. Буланова^a, Н. В. Иваненко^b

^aИнститут химии ДВО РАН, пр-т 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, 690022 Россия

^bВладивостокский государственный университет экономики и сервиса, ул. Гоголя, 41, Владивосток, 690014 Россия

^cДальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, 690922 Россия

^dДальневосточный геологический ДВО РАН, пр-т 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, 690022 Россия

*e-mail: yarusova_10@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2022 г.

После доработки 28.03.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

Представлены данные по сорбционным характеристикам синтетического рентгеноаморфного силиката кальция, полученного в модельной многокомпонентной системе $\text{CaCl}_2\text{--Na}_2\text{SiO}_3\text{--H}_2\text{O}$. Приведены изотермы сорбции ионов Sr^{2+} из водных растворов без солевого фона с концентрацией ионов Sr^{2+} от 0.016 до 1.22 ммоль/л при температурах 20, 40 и 60°C и соотношении твердой и жидкой фаз $t : ж = 1 : 400$. Определены максимальная сорбционная емкость синтетического рентгеноаморфного силиката кальция и степень извлечения ионов Sr^{2+} при различных соотношениях $t : ж$ из растворов без солевого фона и из растворов, имитирующих определенный состав пресной воды. Впервые исследована кинетика сорбции ионов Sr^{2+} при различных температурах, определена энергия активации процесса сорбции. Полученные данные могут быть использованы при выработке практических рекомендаций по получению и применению исследуемого материала в процессах сорбции и иммобилизации стронция.

Ключевые слова: гидросиликат кальция, модельная система, сорбция, стронций, изотермы, кинетика, энергия активации

DOI: 10.31857/S0044457X22090197

ВВЕДЕНИЕ

Из радиоактивных изотопов стронция наибольший вклад в загрязнение окружающей среды вносят ^{89}Sr и ^{90}Sr . Короткоживущий изотоп ^{89}Sr ($\tau \sim 50.5$ сут) прослеживается в окружающей среде на начальном этапе техногенной аварии [1, 2]. ^{90}Sr является β -излучателем с высокой удельной активностью, характеризуется большим периодом полураспада ($\tau \sim 28$ лет), т.е. является одним из основных компонентов радиоактивного загрязнения в первые десятилетия после аварии, в связи с чем представляет опасность для природных экосистем и биосферы в целом. Через биоаккумуляцию радионуклиды накапливаются в конечных звеньях пищевых цепей, представляя опасность для здоровья организмов и вызывая изменения в структуре популяций видов. Остеотропный ^{90}Sr прочно удерживается в основном в костях скелета человека и животных (особенно при недостатке кальция). Биологическое действие радиоактивного стронция в районах радио-

активного загрязнения многообразно и связано с его химической формой, путем поступления, распределением поступившего в организм нуклида и формируемых доз — у высших животных и человека проявляются острые и хронические лучевые поражения с соответствующими гематологическими нарушениями, развитием лейкозов и костных опухолей [3–5].

В научной литературе проблеме выделения и иммобилизации стронция посвящено большое число работ. Среди многообразия неорганических сорбентов, предлагаемых для извлечения стронция из водных сред, природные и синтетические силикаты, а также композиционные материалы на их основе представляют определенный научно-практический интерес [6–10]. В работе российских ученых приведен подробный обзор и собственные исследования по материалам, разработанным для извлечения стронция из природных сред, в том числе из морской воды [11].

При исследовании сорбции стронция силикаты и алюмосиликаты щелочноземельных металлов выделяют в перспективный класс сорбентов [12–18].

Так, исследованию сорбционных свойств силикатов кальция по отношению к ионам Sr^{2+} посвящен ряд отечественных и зарубежных работ [16–19]. Исследуются такие силикаты кальция, как 11 Å тоберморит, тобермориты с различным содержанием Al^{3+} , ксонотлит, волластонит. Значения максимальной сорбционной емкости варьируют в диапазоне 0.017–1.8 ммоль/г в зависимости от условий сорбции (температура, соотношение твердой и жидкой фаз, pH, солевой фон).

Цель работы – исследование сорбционных свойств материала на основе гидросиликата кальция, полученного в модельной многокомпонентной системе $\text{CaCl}_2\text{--Na}_2\text{SiO}_3\text{--H}_2\text{O}$, по отношению к ионам Sr^{2+} , в том числе из раствора сложного солевого состава.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез сорбента. Для синтеза гидросиликата кальция в модельной системе $\text{CaCl}_2\text{--Na}_2\text{SiO}_3\text{--H}_2\text{O}$ использовали силикат натрия квалификации “х. ч.” с содержанием кремния 22.4% (силикатный модуль $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1$) и кальций хлористый двухводный $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ТУ 2152-069-00206457-2003, содержание $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ не менее 98.3%). Компоненты смешивали в водной среде в открытых емкостях, руководствуясь рекомендациями работы [20]. Полученный объемный осадок белого цвета тщательно промывали, отфильтровывали через фильтр “синяя лента” и сушили при 85°C.

Опыты по сорбции. Опыты по сорбции проводили в статических условиях при соотношении твердой и жидкой фаз, равном 1 : 400, и температуре 20, 40 и 60°C из водных растворов хлорида стронция ($\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) без солевого фона с различными начальными концентрациями ионов Sr^{2+} в диапазоне от 0.016 до 1.22 ммоль/л при перемешивании на магнитной мешалке RT 15 power (Ika Werke, ФРГ) в течение 3 ч. Для получения кинетических кривых сорбции при аналогичных условиях в серию пробирок помещали навески сорбента, заливали их водным раствором $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ с начальной концентрацией ионов Sr^{2+} 1.22 ммоль/л и встряхивали от 1 до 180 мин.

Проведены опыты по сорбции ионов Sr^{2+} из растворов, имитирующих состав пресной воды, используемой в работе [21] (далее ИПВ), мг/л: Sr^{2+} – 10–12; Ca^{2+} – 100; Mg^{2+} – 75; Na^+ – 132; K^+ – 15; Cl^- – 82; SO_4^{2-} – 650 (pH раствора 7.6). Соотношения твердой и жидкой фаз $t : ж = 1 : 40, 1 : 100, 1 : 400, 1 : 1000, 1 : 2000$.

При приготовлении раствора ИПВ использовали сульфат калия K_2SO_4 (ос. ч.), сульфат натрия Na_2SO_4 (о. с. ч.), сульфат магния $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (ч. д. а.), хлорид кальция CaCl_2 (х. ч.), хлорид стронция $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (х. ч.).

Методы анализа. Рентгенограммы осадков снимали на автоматическом дифрактометре D8 Advance (Германия) с вращением образца в CuK_α -излучении. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили с использованием программы поиска EVA с банком порошковых данных PDF-2.

Удельную поверхность образцов определяли методом низкотемпературной адсорбции азота с использованием прибора Сорбтометр-М (Россия).

Измерения pH раствора производили на pH-метре/иономере Мультитест ИПЛ-102 со стеклянным электродом ЭСК-10601/7 (Россия), стандартизированным по буферным растворам.

Содержание ионов Sr^{2+} в исходных растворах и фильтратах после сорбции определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на двухлучевом спектрометре SOLAAR M6 (Thermo Scientific, США) по аналитической линии 460.7 нм. Предел обнаружения ионов стронция в водных растворах составляет 0.002 мкг/мл, кальция – 0.0005 мкг/мл. Погрешность определения стронция в растворах в диапазоне концентраций 0.001–10 мг/л составляет 20%.

Часть проб на содержание ионов Sr^{2+} была проанализирована методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 8800 (Agilent Techn., США).

Сорбционную емкость (A_c , ммоль/г) исследуемых образцов рассчитывали по формуле:

$$A_c = \frac{(C_{\text{исх}} - C_p)}{m} V, \quad (1)$$

где $C_{\text{исх}}$ – исходная концентрация ионов Sr^{2+} в растворе, ммоль/л; C_p – равновесная концентрация ионов Sr^{2+} в растворе, ммоль/л; V – объем раствора, л; m – масса сорбента, г.

Степень извлечения ионов Sr^{2+} (α , %) рассчитывали по формуле:

$$\alpha = \frac{(C_{\text{исх}} - C_p)}{C_{\text{исх}}} \times 100\%. \quad (2)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

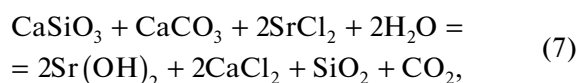
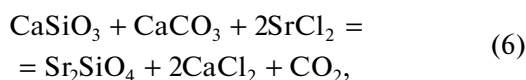
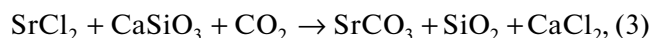
Характеристика сорбента

В табл. 1 приведены данные по фазовому составу и удельной поверхности осадка, полученного в исследуемой многокомпонентной системе. Более подробно данные по составу, морфологии и термическому поведению продукта в исследуемой системе приведены в работе [22].

Таблица 1. Фазовый состав продуктов синтеза в системе $\text{CaCl}_2\text{--Na}_2\text{SiO}_3\text{--H}_2\text{O}$

Образец	Фазовый состав	Удельная поверхность, м ² /г
После сушки при 85°C	Аморфная фаза, кальцит CaCO_3	105.9
После обжига при 900°C	Волластонит CaSiO_3 , оксид кальция CaO	8.2

Как видно из табл. 1, состав полученного осадка свидетельствует о том, что в рассматриваемой системе необходимо учитывать следующие реакции:



Реакция катионного обмена ионов Ca^{2+} и Sr^{2+} в исследуемой системе возможна по уравнениям (3) и (7), $\Delta G_{\text{x.p.}}^\circ$ составляет -63.3 и -86.7 кДж соответственно. Расчет значения $\Delta G_{\text{x.p.}}^\circ$ для реакции (3), возможной в рассматриваемых условиях, ранее был подтвержден авторами с помощью данных рентгенофазового анализа, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния [18].

Однако, учитывая значения произведения растворимости (справочные и расчетные данные) для соединений, участвующих в реакциях в данной многокомпонентной системе, возможно образование метасиликата и ортосиликата стронция (табл. 2).

На рис. 1 приведены изотермы сорбции ионов Sr^{2+} из растворов хлорида стронция без солевого фона при температурах 20, 40 и 60°C. Видно, что с повышением температуры сорбционная емкость исследуемого сорбента возрастает. Наибольшее увеличение сорбционной емкости наблюдается при температуре 60°C. При 20 и 40°C различия в изотермах практически не наблюдаются в пределах ошибки определения ионов Sr^{2+} методом ААС.

Для оценки сорбционных свойств полученные изотермы анализировали в координатах уравнения Ленгмюра и эмпирического уравнения Фрейндлиха.

Уравнение Ленгмюра:

$$\frac{C_p}{A_c} = \frac{1}{A_m k} + \frac{C_p}{A_m}, \quad (9)$$

где C_p – равновесная концентрация ионов Sr^{2+} в растворе, A_m – максимальная сорбционная емкость, k – константа Ленгмюра.

Константы уравнения были рассчитаны из наклона и пересечения прямых на графике в соответствующих координатах линейного уравнения C_p/A_c от C_p .

Логарифмическую форму уравнения Фрейндлиха применяли для построения линейной зависимости $\ln A_c - \ln C_p$ и графического определения параметров K_F и n :

$$\ln a = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e, \quad (10)$$

где K_F – константа равновесия уравнения Фрейндлиха, относящаяся к сорбционной емкости; $1/n$ – параметр, указывающий на интенсивность взаимодействия сорбент–сорбат.

Найденные графическим способом параметры уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха представлены в табл. 3.

Из представленной таблицы видно, что процесс сорбции ионов Sr^{2+} силикатом кальция наилучшим образом описывается уравнением Фрейндлиха, о чем свидетельствуют соответствующие коэффициенты корреляции. Величина максимальной сорбционной емкости A_m , рассчитанная по уравнению Ленгмюра, возрастает с увеличением температуры от 0.28 до 0.41 ммоль/г.

Таблица 2. Произведения растворимости исходных соединений и продуктов реакции в системе $\text{CaSiO}_3\text{--CaCO}_3\text{--SiO}_2\text{--SrCl}_2$

Соединение	Произведение растворимости
Исходные соединения	
CaCO_3	3.8×10^{-9}
CaSiO_3	7.4×10^{-11}
Продукты реакции	
SrCO_3	1.1×10^{-10}
Sr_2SiO_4	5.1×10^{-7}
SrSiO_3	1.0×10^{-13}
$\text{Sr}(\text{OH})_2$	3.2×10^{-4}

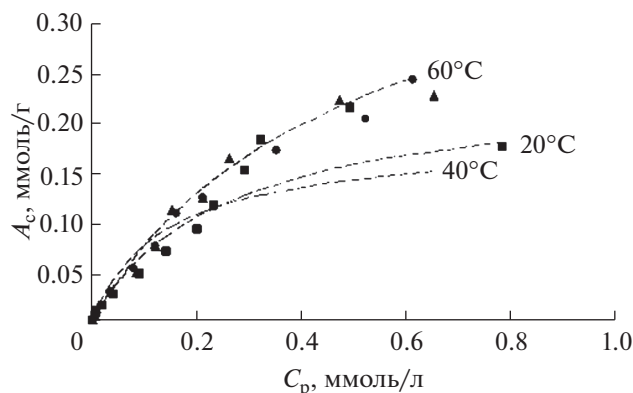


Рис. 1. Изотермы сорбции ионов Sr^{2+} силикатом кальция.

На рис. 2 приведены кинетические кривые сорбции ионов Sr^{2+} силикатом кальция при температурах 20, 40 и 60°C.

Как видно из представленных на рис. 2 зависимостей, при различных температурах значительных изменений в кинетике извлечения Sr^{2+} не наблюдается, поэтому кинетические кривые разделены на два графика.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные по кинетике сорбции в виде логарифмических зависимостей в соответствии с уравнением Колмогорова–Ерофеева после двойного логарифмирования:

$$\ln(-\ln(1 - \alpha)) = \ln k + n \ln \tau \quad (11)$$

Линейные зависимости, наблюдаемые в логарифмических координатах, указывают на постоянство n в приведенных интервалах времени. Обработанные по обобщенному топохимическому уравнению кинетические данные приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, для анализируемого температурного диапазона порядок реакции n сорбции ионов Sr^{2+} меньше единицы, что характерно для реакций, сопровождаемых диффузионными процессами.

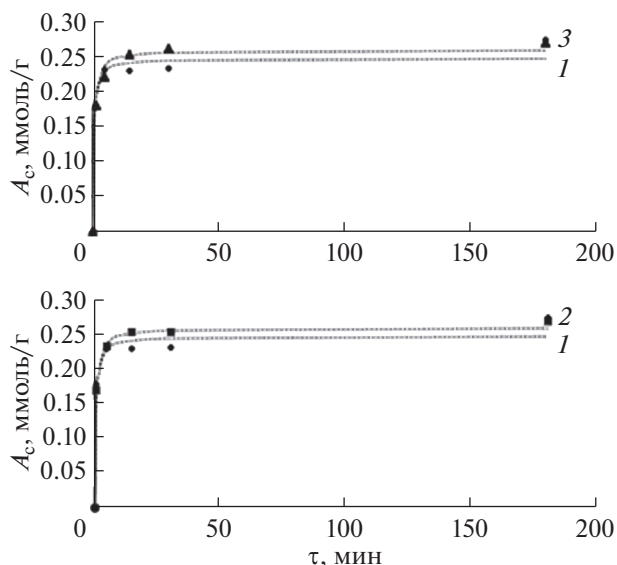


Рис. 2. Кинетические зависимости сорбции ионов Sr^{2+} силикатом кальция при различных температурах: 1 – 20, 2 – 40, 3 – 60°C.

По найденным из температурных зависимостей величинам $\ln k$, согласно уравнению Аррениуса, в логарифмической форме:

$$\ln k = \ln A - Q/RT, \quad (12)$$

где Q – энергия активации; R – газовая постоянная (8.3145 Дж/(моль К)); T – температура, графически определена энергия активации процесса сорбции ионов Sr^{2+} .

Энергия активации процесса сорбции, рассчитанная по экспериментальным данным, равна 0.44 кДж/моль. Это довольно низкая величина, и характерной особенностью таких процессов является незначительное изменение скорости реакции катионного обмена с изменением температуры, что и подтверждено экспериментами.

Полученные кинетические данные анализировали в соответствии с уравнением кинетики, предложенным в работе [23]:

$$\alpha_\tau = \alpha_m K \tau \left[\frac{1}{1 + k\tau} \right], \quad (13)$$

Таблица 3. Параметры уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха при сорбции ионов Sr^{2+} силикатом кальция

Температура, °C	Параметры уравнения Ленгмюра			Параметры уравнения Фрейндлиха		
	A_m , ммоль/г	k , л/ммоль	R^2	K_F , (ммоль/г) (л/ммоль) $^{1/n}$	$1/n$	R^2
20	0.28	3.07	0.8123	2.997	0.78	0.973
40	0.37	2.71	0.8591	2.48	0.7759	0.9902
60	0.41	2.1	0.9589	2.43	0.8214	0.9933

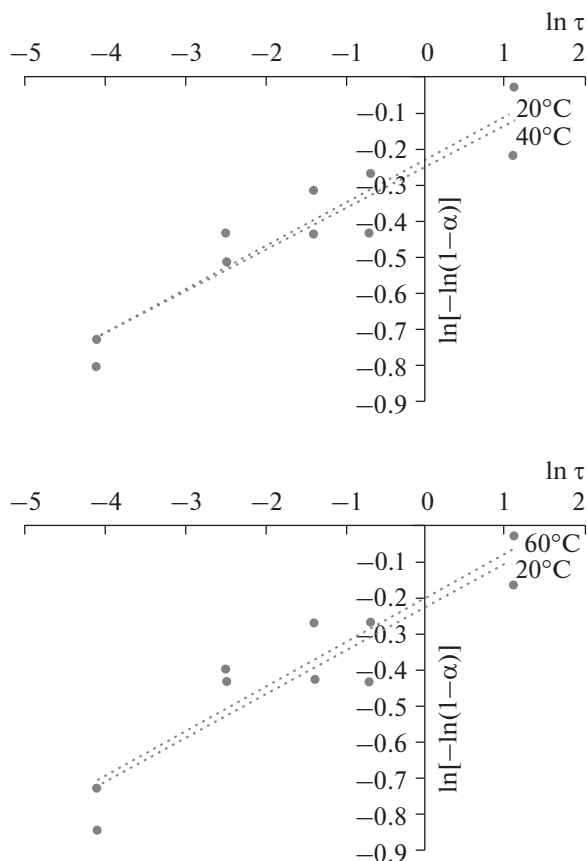


Рис. 3. Логарифмические зависимости $\ln[-\ln(1-\alpha)]$ от времени $\ln \tau$ при различных температурах.

где k – константа (время⁻¹), α_τ – степень прохождения реакции в момент времени τ , α_m – максимальная величина степени прохождения реакции, τ – время реакции.

Примененное уравнение кинетики топохимических реакций с минимальными отклонениями описывает процессы сорбции ионов металлов сорбентами, механизм сорбции для которых связан с ионным обменом, кинетику реакции получения гидросиликатов кальция, кинетику сорбции микроорганизмов [24, 25].

В табл. 5 приведены параметры, полученные графически при представлении экспериментальных данных по кинетике в виде зависимостей обратной величины степени прохождения реакции (в данном случае степени извлечения стронция) от обратной величины времени процесса. Видно, что предложенное уравнение подходит для описания кинетики исследуемых процессов, о чем свидетельствуют соответствующие коэффициенты корреляции.

Для определения энергии активации экспериментальные данные величин $\ln k$ представлены в виде зависимости от обратной абсолютной температуры ($1/T$) (рис. 4), которая описывается

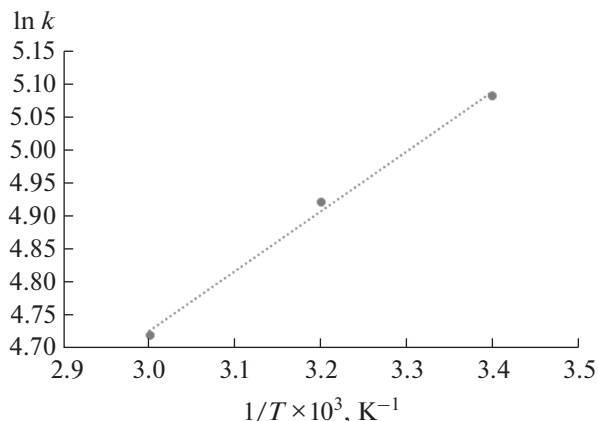


Рис. 4. Температурная зависимость логарифма константы скорости реакции $\ln k$ от обратной абсолютной температуры при извлечении ионов Sr^{2+} .

уравнением прямой $y = 0.9x + 2.0267$ с коэффициентом корреляции $R^2 = 0.9959$.

Энергия активации процесса сорбции, рассчитанная по экспериментальным данным в соответствии с предложенным уравнением, составляет 7.5 кДж/моль. Это значение более достоверно, поскольку коэффициенты корреляции, полученные при анализе экспериментальных данных, выше, чем в соответствии с уравнением Колмогорова–Ерофеева.

В табл. 6 приведены значения степени извлечения стронция при сорбции из раствора без солевого фона (дистиллированной воды) и из раствора ИПВ при различном соотношении твердой и жидкой фаз.

Как видно из представленной таблицы, степень очистки водного раствора на основе дистиллированной воды при соотношениях твердой и жидкой фаз, равных 1 : 40, 1 : 100 и 1 : 400, составляет 96.8, 90.6 и 86.0% соответственно, что говорит об эффективности используемого силикатного сорбента в данных условиях. Степень очистки из раствора ИПВ ниже, чем из раствора на основе дистиллированной воды. При соотношениях твердой и жидкой фаз, равных 1 : 40, 1 : 100 и 1 : 400, степень очистки составляет 70.4, 48.1, 55.6% соответ-

Таблица 4. Порядок реакции (n) и константа скорости (k), полученные при анализе кинетических данных в соответствии с уравнением Колмогорова–Ерофеева

Температура, °C	Параметры уравнения		
	n	$\ln k$	R^2
20	0.1204	0.2282	0.8828
40	0.1143	0.2494	0.8689
60	0.1231	0.2042	0.817

Таблица 5. Данные по кинетике процесса сорбции ионов Sr^{2+} силикатом кальция

Температура, °C	Уравнение и его параметры		
	$Y = ax + b (R^2)$	$k, \text{мин}^{-n}$	$A_m, \text{ммоль/г}$
20	$y = 0.0252x + 4.0677 (0.8875)$	161.42	0.25
40	$y = 0.0283x + 3.8775 (0.9373)$	137.01	0.26
60	$y = 0.0341x + 3.817 (0.9919)$	111.9	0.262

Таблица 6. Значения степени извлечения стронция при сорбции из раствора без солевого фона (дистиллированной воды) и из раствора ИПВ

г : ж	Раствор без солевого фона		Раствор ИПВ	
	$\text{Sr}^{2+}, \text{мкг/мл}$	степень извлечения ионов $\text{Sr}^{2+} (\alpha, \%)$	$\text{Sr}^{2+}, \text{мкг/мл}$	степень извлечения ионов $\text{Sr}^{2+} (\alpha, \%)$
Исходный раствор	10.86	—	10.8	—
1 : 40	0.35	96.8	3.2	70.4
1 : 100	1.02	90.6	5.6	48.1
1 : 400	1.52	86.0	4.8	55.6
1 : 1000	2.9	73.3	6.9	36.1
1 : 2000	3.5	67.8	7.55	30.1

ственно, что говорит о влиянии солевого фона на процесс сорбции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены сорбционные свойства материала на основе гидросиликата кальция, содержащего карбонат кальция, с удельной поверхностью $105.9 \text{ м}^2/\text{г}$, полученного в модельной многокомпонентной системе $\text{CaCl}_2\text{—Na}_2\text{SiO}_3\text{—H}_2\text{O}$, по отношению к ионам Sr^{2+} , в том числе из раствора сложного солевого состава.

Выявлено, что с повышением температуры сорбционная емкость исследуемого сорбента возрастает. Наибольшее увеличение сорбционной емкости наблюдается при температуре 60°C .

Показано, что процесс сорбции ионов Sr^{2+} силикатом кальция наилучшим образом описывается уравнением Фрейндлиха, о чем свидетельствуют соответствующие коэффициенты корреляции. Величина максимальной сорбционной емкости A_m , рассчитанная по уравнению Ленгмюра, возрастает с увеличением температуры от 0.28 до 0.41 ммоль/г.

Установлено, что с увеличением температуры значительных изменений в кинетике извлечения Sr^{2+} не наблюдается.

Энергия активации процесса сорбции, рассчитанная по экспериментальным данным, характеризуется довольно низким значением (до 7.5 кДж/моль), что говорит о незначительном из-

менении скорости реакции катионного обмена с изменением температуры, это подтверждено и экспериментальными данными.

Показано, что степень очистки водного раствора на основе дистиллированной воды при соотношениях твердой и жидкой фаз, равных 1 : 40, 1 : 100 и 1 : 400, составляет 96.8, 90.6 и 86.0%. Степень очистки из раствора ИПВ ниже, чем из раствора на основе дистиллированной воды, и не превышает 70.4%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института химии ДВО РАН, № FWFN(0205)-2022-0002, тема 2, раздел 3.

Анализ растворов на содержание ионов Sr^{2+} выполнен на оборудовании ЦКП Дальневосточный центр структурных исследований ИХ ДВО РАН и частично на оборудовании ЦКП Приморский центр локального, элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ АВТОРОВ

Авторы С.Б. Ярусова, П.С. Гордиенко придумали и разработали эксперимент, авторы Е.А. Нехлюдова, А.В. Перфильев, А.Н. Драньков синтезировали образ-

цы. Авторы О.О. Шичалин, Е.К. Папынов участвовали в обработке данных. Авторы С.Ю. Будницкий, Н.В. Зарубина, Ю.А. Паротькина провели исследования методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и атомно-абсорбционной спектрометрии. С.Б. Булановой выполнены теоретические расчеты. Автор Н.В. Иваненко участвовал в написании текста статьи. Все авторы участвовали в обсуждении результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Casacuberta N., Masque P., Garcia-Orellana J. et al. // Biogeosciences Discuss. 2013. V. 10. P. 3649. <https://doi.org/10.5194/bg-10-3649-2013>*
2. *Василенко И.Я., Василенко О.И. // Энергия: экономика, техника, экология. 2002. № 4. С. 26.*
3. *Strontium Contamination in the Environment // The Handbook of Environmental Chemistry / Eds. Pathak P., Gupta D.K. Springer, 2020. V. 88. 250 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15314-4>*
4. *Бахвалов А.В., Лаврентьева Г.В., Сынзыныс Б.И. // Биосфера. 2012. Т. 4. № 2. С. 206.*
5. *Алейникова М.Л., Клименко И.А. // Лабораторные и технологические исследования и обогащение минерального сырья. М.: ВИЭМС, 1980. 23 с.*
6. *Voronina A.V., Noskova A.Yu., Semenishchev V.S. et al. // J. Environ. Radioact. 2020. V. 217. Art. 106210. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106210>*
7. *Shubair T., Eljamal O., Tahara A. et al. // J. Mol. Liq. 2019. V. 288. P. 111026. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111026>*
8. *Freire C.B., Tello C.C.O. // Rev. Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento. 2008. № 1. P. 1.*
9. *Milyutin V.V., Nekrasova N.A., Yanicheva N.Yu. et al. // Radiochem. 2017. V. 59. № 1. P. 65. <https://doi.org/10.1134/S1066362217010088>*
10. *Рябухина В.Г., Воронина А.В. // X Рос. конф. с международным участием "Радиохимия 2018": Сб. тез. Санкт-Петербург, 17–21 сент. 2018 г. Санкт-Петербург, 2018. С. 249.*
11. *Bezhin N.A., Dovhyi I.I., Kapranov S.V. et al. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2021. V. 328. P. 1199. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07718-8>*
12. *Сокольницкая Т.А., Авраменко В.А., Бурков И.С. и др. // Журн. физ. химии. 2004. Т. 78. № 3. С. 497.*
13. *Тананаев И.Г., Авраменко В.А. // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2017. № 4. С. 33.*
14. *Gordienko P.S., Shabalin I.A., Yarusova S.B. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. V. 64. № 12. P. 1579. [Гордиенко П.С., Шабалин И.А., Ярусова С.Б. и др. // Журн. неорган. химии. 2019. Т. 64. № 12. С. 1326.] <https://doi.org/10.1134/S0036023619120052>*
15. *Gordienko P.S., Shabalin I.A., Suponina A.P. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2016. V. 61. № 8. P. 946. [Гордиенко П.С., Шабалин И.А., Супонина А.П. и др. // Журн. неорган. химии. 2016. Т. 61. № 8. С. 993.] <https://doi.org/10.1134/S003602361608009X>*
16. *Coleman N.J., Brassington D.S., Raza A. et al. // Waste Manage. 2006. V. 26. P. 260. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.01.019>*
17. *Shrivastava O.P., Shrivastava R. // Cem. Concr. Res. 2001. V. 31. P. 1251.*
18. *Гордиенко П.С., Ярусова С.Б., Крысенко Г.Ф. и др. // Техника и технология силикатов. 2012. Т. 19. № 1. С. 2.*
19. *Акатьева Л.В. Синтез и физико-химические свойства ксонотлита и волластонита. Дис. ... канд. хим. наук. М., 2003. 233 с.*
20. *Лотов В.А., Верещагин В.И., Косинцев В.И. и др. // Пат. РФ № 2133218. Оpubл. 20.07.99. Бюл. № 20.*
21. *Баранова О.Ю. Защита водных объектов от техногенных радионуклидов сорбентами на основе опалкристобалитовых пород. Автореф. ... канд. тех. наук. Екатеринбург, 2006. 19 с.*
22. *Ярусова С.Б., Гордиенко П.С., Охлопкова А.А. и др. // Хим. технология. 2019. Т. 20. № 14. С. 661. <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2019-20-14-661-666>*
23. *Gordienko P.S., Shabalin I.A., Yarusova S.B. et al. // Russ. J. Phys. Chem. A. 2019. V. 93. № 11. P. 2284. [Гордиенко П.С., Шабалин И.А., Ярусова С.Б. и др. // Журн. физ. химии. 2019. Т. 93. № 11. С. 1724.] <https://doi.org/10.1134/S0036024419110116>*
24. *Gordienko P.S., Yarusova S.B., Buravlev I.Yu. et al. // Russ. J. Phys. Chem. A. 2021. V. 95. № 1. P. 38. [Гордиенко П.С., Ярусова С.Б., Буравлев И.Ю. и др. // Журн. физ. химии. 2021. Т. 95. № 1. С. 23.] <https://doi.org/10.1134/S003602442101009X>*
25. *Yarusova S.B., Somova S.N., Kharchenko U.V. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 8. P. 1135. [Ярусова С.Б., Сомова С.Н., Харченко У.В. и др. // Журн. неорган. химии. 2021. Т. 66. № 8. С. 1025.] <https://doi.org/10.1134/S0036023621080313>*