

УДК 544.726

СИНТЕЗ ИЗ СОЛОМЫ РИСА И СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО АЛЮМОСИЛИКАТА НАТРИЯ

© 2019 г. С. Б. Ярусова^{1, 2, *}, А. Е. Панасенко^{1, 3}, П. С. Гордиенко¹,
Л. А. Земнухова^{1, 3}, Ю. А. Азарова¹

¹Институт химии ДВО Российской академии наук, Россия, 690022 Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159 Д

²Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Россия, 690014 Владивосток, ул. Гоголя, 41

³Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690091 Владивосток, ул. Суханова, 8

*e-mail: yarusova_10@mail.ru

Поступила в редакцию 17.08.2018 г.

После доработки 07.09.2018 г.

Принята к публикации 15.10.2018 г.

Показана возможность получения наноструктурированного рентгеноаморфного алюмосиликата натрия с удельной поверхностью 364 м²/г из щелочного гидролизата рисовой соломы. Изучены его сорбционные свойства по отношению к ионам Cs⁺ в статических условиях при сорбции из растворов различного солевого состава (морской воды и растворов на основе нитратов).

Ключевые слова: наноструктурированный алюмосиликат натрия, синтез, рисовая солома, сорбционные свойства

DOI: 10.1134/S0002337X19030163

ВВЕДЕНИЕ

Отходы растительного производства все чаще рассматриваются в качестве сырья для получения ряда функциональных материалов, в том числе цеолитов различного состава и структуры, различных композиционных сорбентов. Большое количество работ в этой области посвящено автоклавному синтезу цеолитов из золы рисовой шелухи [1–6]. При этом при производстве риса в качестве отходов образуется большое количество кремнийсодержащей соломы, в несколько раз превышающее количество шелухи. Однако работ, связанных с синтезом, модификацией и исследованием свойств алюмосиликатов из рисовой соломы, сравнительно немного [7, 8].

Известны работы [9–11] по получению сорбентов для извлечения ионов тяжелых металлов путем термической и химической модификации рисовой соломы. В работе [7] исследован процесс автоклавного синтеза (до 160°C) цеолита ZSM-5 с использованием кремнийсодержащего компонента из рисовой соломы и в качестве темплатных агентов, лигнина и бромид тетрапропиламмония (C₁₂H₂₈NBr). Образец цеолита с удельной поверхностью 397 м²/г, полученный с использованием лигнина при температуре 160°C, дополнительно модифицировали различным количеством бромид тетрапропиламмония и исследовали процесс извлечения Cr(VI) из водных

растворов хромата калия при комнатной температуре, соотношении Т : Ж = 500 и pH 5. Показано, что модифицированный цеолит характеризуется лучшими сорбционными характеристиками по сравнению с немодифицированным.

Позднее авторы [8] предложили модифицировать на этапе синтеза с использованием соломы риса цеолит ZSM-5 ферроцианидными комплексами с получением прусского синего пигмента (берлинской лазури).

Ранее в Институте химии ДВО РАН была показана возможность получения силикатов кальция [12] и алюмосиликатов натрия и калия [13] из щелочных растворов, образующихся при щелочном гидролизе соломы риса. Были исследованы сорбционные свойства алюмосиликатов натрия с удельной поверхностью 69–134 м²/г, полученных из соломы риса, по отношению к ионам Cs⁺. Показано, что сорбционная емкость образцов достигает A_{max} = 1.3 ммоль/г. Оценка кинетики сорбции ионов Cs⁺ в интервале времени от 1 до 60 мин показала, что кинетическая кривая выходит на плато уже через 5–10 мин, и в дальнейшем величина сорбции не изменяется. При исследовании влияния температуры на кинетику извлечения ионов Cs⁺ установлено, что с повышением температуры от 20 до 60°C сорбционная емкость алюмосиликатов натрия не изменяется и степень извлечения ионов Cs⁺ при 20°C составляет 82.6–88.6% [14].

При выработке практических рекомендаций по использованию сорбентов важны данные по влиянию ионного состава солевого фона на процесс извлечения соответствующих ионов из водных растворов, в том числе и на его кинетические параметры.

Целью данной работы является синтез наноструктурированного алюмосиликата натрия из щелочного гидролизата рисовой соломы и изучение его сорбционных свойств по отношению к ионам Cs^+ при сорбции из растворов различного солевого состава (морской воды и нитратов).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез алюмосиликата натрия. В качестве кремнийсодержащего сырья использовали солому риса (*Oryza sativa*) сорта дальневосточной селекции “Луговой”, отобранную в п. Тимирязевский Приморского края (урожай 2008–2017 гг.). Солому измельчали на части длиной 5–10 мм, промывали водой и сушили на воздухе. Навеску соломы обрабатывали 1 М раствором NaOH при 90°C в течение 1 ч (соотношение Т : Ж = 1 : 13). Нерастворившийся твердый остаток представляет собой волокнистый целлюлозный материал, который может быть использован в качестве сырья для целлюлозно-бумажной промышленности. Раствор, содержащий силикат-ион, отделяли фильтрованием, при комнатной температуре добавляли к нему при интенсивном перемешивании насыщенный раствор сульфата алюминия до достижения pH 7. Выпавший осадок выдерживали до его полного отстаивания (не менее 5 ч), отделяли на фильтре и промывали водой до полного удаления сульфат-ионов (контроль промывных вод по реакции с BaCl_2). Полученный осадок сушили при 105°C, выход твердого продукта – 12.2% от массы исходного сырья.

Эксперименты по сорбции ионов Cs^+ . Опыты по сорбции проводили в статических условиях при соотношении твердой и жидкой фаз (Т : Ж), равном 1 : 400, и температуре 20°C из водных растворов хлорида цезия на основе дистиллированной или морской воды с различными начальными концентрациями ионов Cs^+ в диапазоне от 0.16 до 3.2 ммоль/л при перемешивании на магнитной мешалке в течение 3 ч. Коэффициенты распределения K_d при сорбции ионов Cs^+ из дистиллированной и морской воды определяли при соотношениях Т : Ж, равных 1 : 100; 1 : 400; 1 : 1000; 1 : 2000.

В качестве контрольного опыта навески сорбента помещали в пробирки с дистиллированной и морской водой и перемешивали параллельно с исследуемыми пробами. Затем растворы отделяли от сорбента фильтрованием (бумажный фильтр “синяя лента”) и определяли в нем концентрации ионов Cs^+ и Na^+ .

Таблица 1. Характеристики исходных растворов для исследования кинетики извлечения ионов Cs^+

Тип раствора	pH раствора	Исходная концентрация ионов Cs^+ , ммоль/л
Морская вода	8.1	0.76
Дистиллированная вода	6.2	0.78
0.01 М NaNO_3	7.8	0.95
0.01 М KNO_3	7.7	0.8
0.01 М NH_4NO_3	7.7	0.78

Морскую воду, на основе которой были приготовлены растворы с различным содержанием ионов Cs^+ , отбирали в Японском море в акватории Амурского залива (г. Владивосток), фильтровали через фильтр “белая лента”. Концентрация ионов в морской воде (мкг/мл): Na^+ – 9443.8, K^+ – 364.0, Ca^{2+} – 357.3, Mg^{2+} – 1246.2.

Опыты по кинетике сорбции проводили в статических условиях при соотношении твердой и жидкой фаз, равном 1 : 400, и температуре 20°C из водных растворов хлорида цезия на основе дистиллированной или морской воды и 0.01 М NaNO_3 , KNO_3 , NH_4NO_3 квалификации “ч.” при различных временных интервалах – от 1 до 60 мин. Исходная концентрация ионов Cs^+ и pH исходных растворов приведены в табл. 1. Коэффициенты распределения K_d при сорбции ионов Cs^+ из растворов вышеуказанных нитратов с концентрациями 0.01, 0.1 и 0.5 М определяли при соотношении твердой и жидкой фаз, равном 1 : 400 (время сорбции 3 ч).

Методы анализа. Элементный анализ выполняли методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре Shimadzu EDX 800 HS (Япония). Анализ проводили без учета легких элементов с использованием программного обеспечения спектрометра. Относительная погрешность определения не превышала $\pm 2\%$. Рентгеновские дифрактограммы записывали на дифрактометре Bruker D8 Advance (Германия) в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении. Удельную поверхность образцов определяли методом низкотемпературной адсорбции азота с использованием прибора “Сорбтометр-М” (Россия). Термический анализ выполняли на дериватографе MOM Q-1000 (скорость нагрева 5 К/мин). Распределение частиц по размерам находили с использованием лазерного анализатора размеров частиц Fritsch ANALYSETTE 22 Micro Tec plus (Германия).

Содержание ионов цезия и натрия в растворах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на двухлучевом спектрометре So-

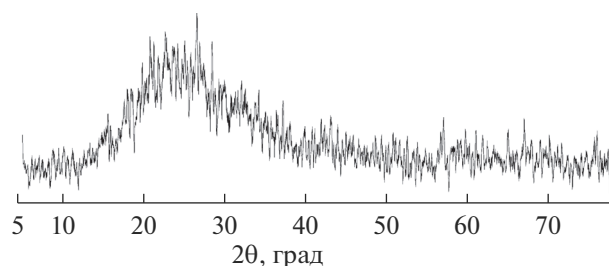


Рис. 1. Рентгенограмма исследованного образца алюмосиликата натрия.

laar M6 (Thermo Scientific, США) по аналитическим линиям 852.1 и 586.6 нм соответственно. Предел обнаружения ионов цезия в водных растворах составляет 0.01 мкг/мл, натрия — 0.0002 мкг/мл. Относительная ошибка определения указанных ионов методом ААС составляет 15%.

Концентрацию ионов водорода во всех опытах контролировали с помощью рН-метра Sartorius PB-11 с электродом PY-P11 (Германия).

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

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

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

Степень извлечения ионов Cs^+ (α , %) рассчитывали по формуле

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

Коэффициент межфазного распределения (K_d , мл/г) рассчитывали по формуле

$$K_d = \frac{(C_{\text{исх}} - C_p)V}{C_p m}. \quad (3)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определение количественного элементного состава полученного образца показало следующие содержания элементов, мас. %: Si — 49.6, Al — 30.7, Na — 17.1, K — 2.1. Такой состав отвечает мольному соотношению элементов $\text{M} : \text{Si} : \text{Al} = 0.45 : 1 : 0.64$.

Согласно данным рентгенофазового анализа, полученный образец является рентгеноаморфным. На дифрактограмме (рис. 1) наблюдается гало с максимумом, соответствующим межплоскостному расстоянию 3.21–3.28 Å.

Удельная поверхность алюмосиликата натрия составляет 364 м²/г.

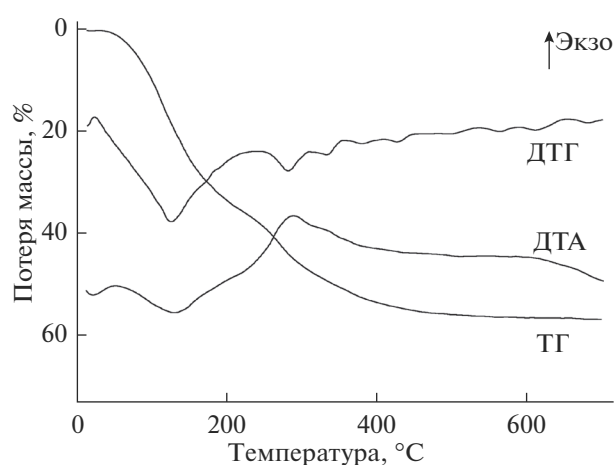


Рис. 2. Результаты термического анализа алюмосиликата натрия.

Термогравиметрический анализ образца (рис. 2) показал, что удаление воды начинается примерно при 40°C и заканчивается к 220°C. Потеря массы составляет 15.3%. Выше 220°C начинается окисление органического компонента, сопровождающееся экзотермическим эффектом на кривой ДТА с максимумом при 280°C, что соответствует окислению некристаллической или слабо кристаллизованной целлюлозы. Небольшой максимум на кривой ДТА в районе 600–620°C связан с окислением карбонизированного остатка. Потери при прокаливании до 1000°C составляют 31.7%.

Размер частиц образца составляет от 0.2 до 50 мкм, максимум распределения приходится на 10 мкм (рис. 3).

На основании полученных экспериментальных данных по сорбции ионов Cs^+ исследуемым сорбентом построены изотермы сорбции (рис. 4).

Как видно из рис. 4, при сорбции ионов Cs^+ из морской воды наблюдается существенное снижение сорбционной емкости алюмосиликата натрия. Найдено, что степень извлечения ионов Cs^+ из растворов без солевого фона достигает 96.2%, а из морской воды — не превышает 25.7%.

Для оценки сорбционных свойств полученные изотермы анализировали в координатах уравнения Ленгмюра:

$$\frac{C_p}{A_c} = \frac{1}{A_{\text{max}} k} + \frac{C_p}{A_{\text{max}}},$$

где C_p — равновесная концентрация ионов Cs^+ в растворе, A_{max} — 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 (рис. 5).

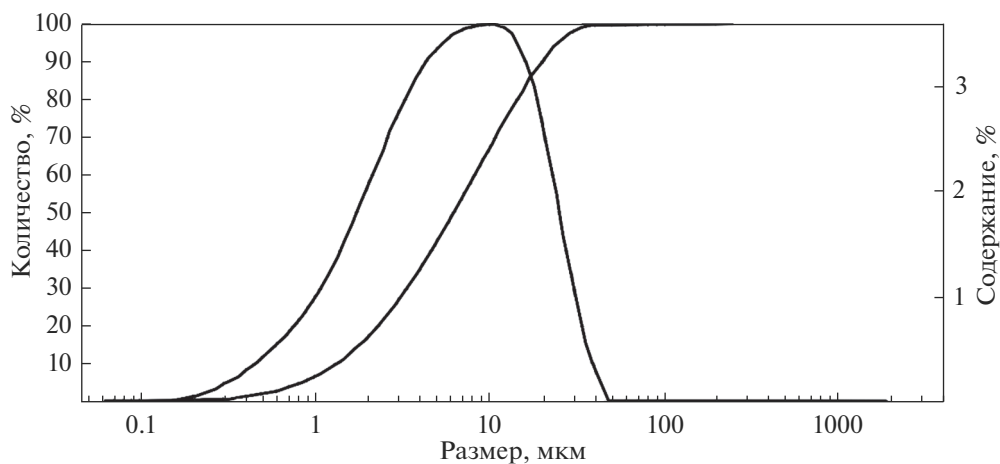


Рис. 3. Распределение частиц алюмосиликата натрия по размерам.

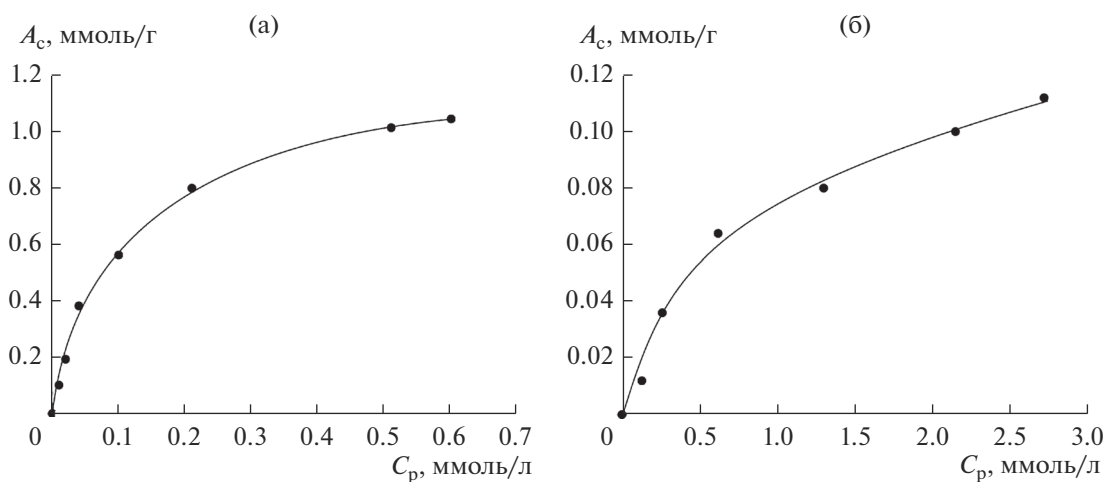
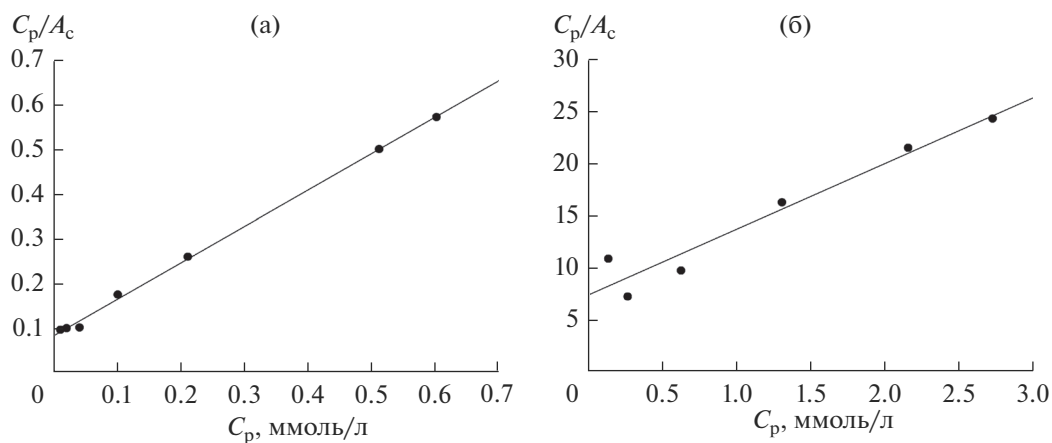

 Рис. 4. Изотермы сорбции ионов Cs^+ алюмосиликатом натрия из растворов на основе дистиллированной (а) и морской (б) воды.

 Рис. 5. Изотермы сорбции ионов Cs^+ синтетическим алюмосиликатом натрия из растворов на основе дистиллированной (а) и морской (б) воды в координатах линейного уравнения Ленгмюра.

Таблица 2. Параметры уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха, полученные при анализе изотерм сорбции ионов Cs^+ синтетическим алюмосиликатом натрия

Тип раствора, содержащего Cs^+	Дистиллированная вода	Морская вода
Уравнение Ленгмюра		
k , л/ммоль	9.5	0.875
$A_{\max}$, ммоль/г	1.2	0.16
R^2	0.9985	0.9427
Уравнение Фрейндлиха		
K_F (ммоль/г) (л/ммоль) $^{1/n}$	1.7	14.9
$1/n$	0.5521	14.9
R^2	0.9452	0.6589

Таблица 3. Зависимость коэффициента распределения K_d цезия на алюмосиликате натрия при сорбции из раствора без солевого фона и морской воды

Т : Ж	K_d , мл/г	
	дистиллированная вода (pH 6.2)	морская вода (pH 8.1)
1 : 100	8567	111
1 : 400	7400	107
1 : 1000	8750	86
1 : 2000	11000	82

Таблица 4. Зависимость коэффициента распределения цезия на алюмосиликате натрия от концентрации солей нитратов (Т : Ж = 1 : 400)

Концентрация соли, моль/л	K_d , мл/г (pH раствора)		
	NaNO_3	KNO_3	NH_4NO_3
0.5	81 (7.7)	13 (7.3)	11 (6.4)
0.1	360 (7.5)	97 (7.5)	230 (7.0)
0.01	3055 (7.8)	933 (7.7.)	917 (7.7)

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

$$\ln a = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_p,$$

где a — величина адсорбции (ммоль/г); 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. 2. Из табл. 2 видно, что для описания сорбции ионов Cs^+ синтетическим алюмосиликатом натрия наиболее подходящей является модель Ленгмюра, о чем свидетельствуют соответствующие коэффициенты корреляции. Максимальная сорбционная емкость $A_{\max}$ при сорбции ионов Cs^+ из растворов без солевого фона и из морской воды составляет 1.2 и 0.16 ммоль/г соответственно.

Значения коэффициента распределения цезия на алюмосиликате натрия при сорбции из раствора без солевого фона (дистиллированной воды) и морской воды приведены в табл. 3. Видно, что высокие значения коэффициента распределения наблюдаются при сорбции цезия из растворов без солевого фона при всех соотношениях твердой и жидкой фаз, при этом максимальное значение K_d (11000 мл/г) наблюдается при соотношении Т : Ж, равном 2000. В случае морской воды сорбция цезия при всех выбранных соотношениях твердой и жидкой фаз существенно снижается.

На рис. 6 представлены интегральные кинетические кривые сорбции ионов Cs^+ из растворов различного солевого состава исследуемым сорбентом. Во всех рассматриваемых случаях кинетические кривые выходят на плато уже в течение 5 мин и в дальнейшем величина сорбции не изменяется. Через указанный интервал времени степень извлечения ионов Cs^+ составляет в случае дистиллированной воды 96.4%, морской — 19.7%, NaNO_3 — 87.4%, KNO_3 — 70.0%, NH_4NO_3 — 69.2%. Таким образом, сорбция цезия в морской воде значительно снижается по сравнению со всеми исследуемыми типами растворов. При сорбции ионов Cs^+ из 0.01 М растворов нитратов наибольшие значения степени извлечения наблюдаются при сорбции из 0.01 М раствора NaNO_3 . Аналогичные данные были получены авторами [15] при исследовании сорбционных свойств синтетического наноструктурированного алюмосиликата калия при извлечении ^{137}Cs из растворов нитратов натрия, калия и аммония.

Значения коэффициента распределения цезия на алюмосиликате натрия в зависимости от кон-

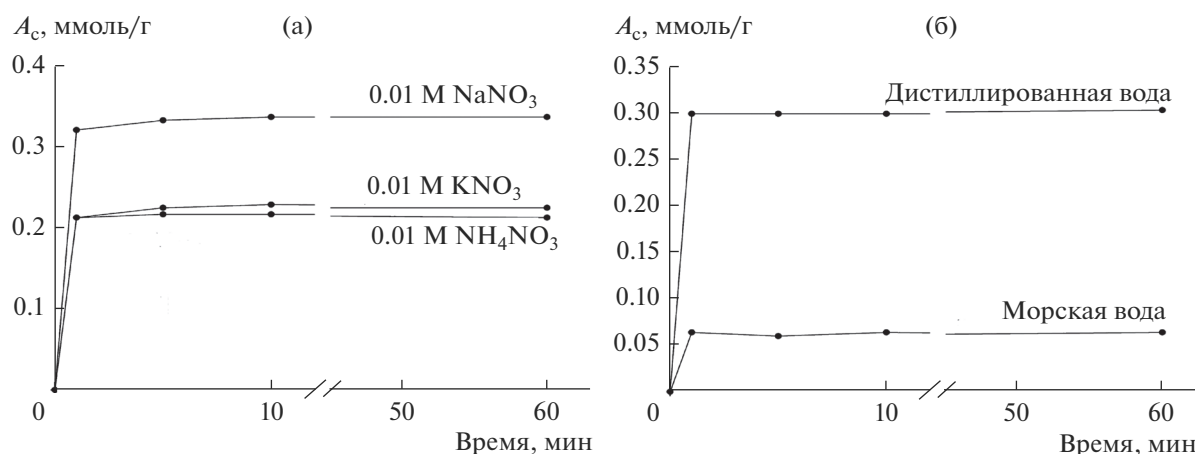


Рис. 6. Интегральные кинетические кривые сорбции цезия алюмосиликатом натрия из растворов различного солевого состава: а – 0.01 М нитраты натрия, калия и аммония; б – дистиллированная и морская вода.

центрации солей нитратов приведены в табл. 4. Видно, что наибольшие значения коэффициента распределения наблюдаются при сорбции цезия из растворов нитрата натрия. При сорбции ионов Cs^+ из растворов нитрата калия и аммония коэффициент распределения уменьшается. С увеличением концентрации нитратов в растворе сорбция ионов Cs^+ снижается во всех случаях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из щелочного гидролизата рисовой соломы синтезирован наноструктурированный рентгеноаморфный алюмосиликат натрия с удельной поверхностью $364 \text{ м}^2/\text{г}$. Изучены его сорбционные свойства по отношению к ионам Cs^+ при сорбции из растворов различного солевого состава (морской воды и растворов на основе нитратов).

Установлено, что в случае морской воды наблюдается существенное снижение сорбционной емкости исследуемого соединения. Найдено, что степень извлечения ионов Cs^+ из растворов без солевого фона достигает 96.2%, а из морской воды – не превышает 25.7%. Показано, что для описания сорбции ионов Cs^+ синтетическим алюмосиликатом натрия из растворов без солевого фона и из морской воды наиболее подходящей является модель Ленгмюра, о чем свидетельствуют соответствующие коэффициенты корреляции. Максимальная сорбционная емкость A_{max} при сорбции ионов Cs^+ из растворов без солевого фона и из морской воды составляет 1.2 и 0.16 ммоль/г соответственно. Установлено, что высокие значения коэффициента распределения наблюдаются при сорбции цезия из растворов без солевого фона при всех соотношениях твердой и жидкой фаз, при этом максимальное значение коэффициента

распределения K_d (11000 мл/г) наблюдается при соотношении Т : Ж, равном 2000. При сорбции из морской воды при всех выбранных соотношениях твердой и жидкой фаз значения коэффициента распределения существенно снижаются.

При исследовании кинетики сорбции из исследуемых типов растворов найдено, что кинетические кривые выходят на плато уже в течение 5 мин и в дальнейшем величина сорбции не изменяется. Через указанный интервал времени степень извлечения ионов Cs^+ составляет в случае дистиллированной воды 96.4%, морской воды – 19.7%, NaNO_3 – 87.4%, KNO_3 – 70.0%, NH_4NO_3 – 69.2%. При сорбции ионов Cs^+ из 0.01 М растворов нитратов наибольшие значения степени извлечения ионов Cs^+ наблюдаются для раствора NaNO_3 . Установлено, что наибольшие значения коэффициента распределения наблюдаются при сорбции цезия из растворов нитрата натрия. При сорбции ионов Cs^+ из растворов нитрата калия и аммония коэффициент распределения существенно уменьшается. С увеличением концентрации нитратов в растворе сорбция ионов Cs^+ снижается во всех случаях.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-2884.2017.3 и проекта 4.5913.2017/8.9 в рамках базовой части государственного задания образовательных организаций высшего образования, находящихся в ведении Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tan W.-C., Yap S.-Y., Matsumoto A., Othman R., Yeoh F.-Y.* Synthesis and Characterization of Zeolites NaA and NaY from Rice Husk Ash // *Adsorption*. 2011. V. 17. P. 863–868.
2. *Thuadajj P., Nuntiya A.* Preparation and Characterization of Faujasite using Fly Ash and Amorphous Silica from Rice Husk Ash // *Proc. Eng.* 2012. V. 32. P. 1026–1032.
3. *Bohra S., Kundu D., Naskar M.K.* One-Pot Synthesis of NaA and NaP Zeolite Powders Using Agro-Waste Material and Other Low Cost Organic-Free Precursors // *Ceram. Int.* 2014. V. 40. P. 1229–1234.
4. *Mohamed R.M., Mkhallid I.A., Barakat M.A.* Rice Husk Ash as a Renewable Source for the Production of Zeolite NaY and Its Characterization // *Arab. J. Chem.* 2015. V. 8. № 1. P. 48–53.
5. *Ng E.-P., Awala H., Tan K.-H., Adama F., Retoux R., Mintova S.* EMT-type Zeolite Nanocrystals Synthesized from Rice Husk // *Micropor. Mesopor. Mater.* 2015. V. 204. P. 204–209.
6. *Prasara A.J., Gheewala S.H.* Sustainable Utilization of Rice Husk Ash from Power Plants: A Review // *J. Cleaner Production*. 2017. V. 167. P. 1020–1028.
7. *Ali I.O., Thabet M.S., El-Nasser K.S., Hassan A.M., Salama T.M.* Synthesis of Nanosized ZSM-5 Zeolite from Rice Straw Using Lignin as a Template: Surface-Modified Zeolite with Quaternary Ammonium Cation for Removal of Chromium from Aqueous Solution // *Micropor. Mesopor. Mater.* 2012. V. 160. P. 97–105.
8. *Ali I.O., Salama T.M., Thabet M.S., El-Nasser K.S., Hassan A.M.* Encapsulation of Ferro- and Ferricyanide Complexes Inside ZSM-5 Zeolite Synthesized from Rice Straw: Implications for Synthesis of Prussian Blue Pigment // *Mater. Chem. Phys.* 2013. V. 140. P. 81–88.
9. *Tan G., Wu Y., Liu Y., Xiao D.* Removal of Pb(II) Ions from Aqueous Solution by Manganese Oxide Coated Rice Straw Biochar – A Low-Cost and Highly Effective Sorbent // *J. Taiwan Institute Chem. Eng.* 2018. V. 84. P. 85–92.
10. *Lin C., Luo W., Luo T., Zhou Q., Li H., Jing L.* A Study on Adsorption of Cr(VI) by Modified Rice Straw: Characteristics, Performances and Mechanism // *J. Cleaner Production*. 2018. V. 196. P. 626–634.
11. *Swelam A.A., Awad M.B., Salem A.M.A., El-Feky A.S.* An Economically Viable Method for the Removal of Cobalt Ions from Aqueous Solution Using Raw and Modified Rice Straw // *HBRC J.* 2016. Article in press. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2016.10.001>.
12. *Гордиенко П.С., Ярусова С.Б., Земнухова Л.А., Чередниченко А.И.* Синтез силикатов кальция из щелочных экстрактов соломы риса // Тез. докл. VI Междунар. конф. “Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследование, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий”, 20–24 сентября Большая Ялта, Понизовка, 2010. С. 370.
13. *Земнухова Л.А., Федорищева Г.А., Цой Е.А., Арефьева О.Д.* Способ получения алюмосиликатов натрия или калия из кремнийсодержащего растительного сырья: Пат. 2557607 РФ. № 2014113045/05; Б.И. № 21.
14. *Panasenko A.E., Yarusova S.B., Zemnukhova L.A., Gordienko P.S.* Kinetics of Cesium Sorption by Aluminosilicate Sorbents Prepared from Rice Straw // *Book of Abstracts of the International Conference “Renewable Plant Resources: Chemistry, Technology, Medicine”*, Saint Petersburg, (September 18–22) 2017. P. 63.
15. *Гордиенко П.С., Ярусова С.Б., Шабалин И.А., Железнов В.В., Зарубина Н.В., Буланова С.Б.* Сорбционные свойства наноструктурированного алюмосиликата калия // *Радиохимия*. 2014. Т. 56. № 6. С. 518–523.