

УДК 544.726

## СИНТЕЗ ИЗ СОЛОМЫ РИСА И СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО АЛЮМОСИЛИКАТА НАТРИЯ

© 2019 г. С. Б. Ярусова<sup>1,2,\*</sup>, А. Е. Панасенко<sup>1,3</sup>, П. С. Гордиенко<sup>1</sup>,  
Л. А. Земнухова<sup>1,3</sup>, Ю. А. Азарова<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Россия, 690014 Владивосток, ул. Гоголя, 41

<sup>3</sup>Дальневосточный 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 м<sup>2</sup>/г из щелочного гидролизата рисовой соломы. Изучены его сорбционные свойства по отношению к ионам Cs<sup>+</sup> 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 (C<sub>12</sub>H<sub>28</sub>NBr). Образец цеолита с удельной поверхностью 397 м<sup>2</sup>/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 T : 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 м<sup>2</sup>/г, полученных из соломы риса, по отношению к ионам Cs<sup>+</sup>. Показано, что сорбционная емкость образцов достигает A<sub>max</sub> = 1.3 ммоль/г. Оценка кинетики сорбции ионов Cs<sup>+</sup> 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<sup>+</sup> установлено, что с повышением температуры от 20 до 60°C сорбционная емкость алюмосиликатов натрия не изменяется и степень извлечения ионов Cs<sup>+</sup> 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 иону  $\text{Cs}^+$  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  $\text{BaCl}_2$ ). Полученный осадок сушили при 105°C, выход твердого продукта – 12.2% от массы исходного сырья.

**Эксперименты по сорбции ионов  $\text{Cs}^+$ .** 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  $\text{Cs}^+$  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  $\text{Cs}^+$  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  $\text{Cs}^+$  и  $\text{Na}^+$ .

**Таблица 1.** Характеристики исходных растворов для исследования кинетики извлечения ионов  $\text{Cs}^+$

Тип раствора	pH раствора	Исходная концентрация ионов $\text{Cs}^+$ , ммоль/л
Морская вода	8.1	0.76
Дистиллированная вода	6.2	0.78
0.01 М $\text{NaNO}_3$	7.8	0.95
0.01 М $\text{KNO}_3$	7.7	0.8
0.01 М $\text{NH}_4\text{NO}_3$	7.7	0.78

Морскую воду, на основе которой были приготовлены растворы с различным содержанием ионов  $\text{Cs}^+$ , отбирали в Японском море в акватории Амурского залива (г. Владивосток), фильтровали через фильтр “белая лента”. Концентрация ионов в морской воде (мкг/мл):  $\text{Na}^+$  – 9443.8,  $\text{K}^+$  – 364.0,  $\text{Ca}^{2+}$  – 357.3,  $\text{Mg}^{2+}$  – 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  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  квалификации “ч.” при различных временных интервалах – от 1 до 60 мин. Исходная концентрация ионов  $\text{Cs}^+$  и pH исходных растворов приведены в табл. 1. Коэффициенты распределения  $K_d$  при сорбции ионов  $\text{Cs}^+$  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-

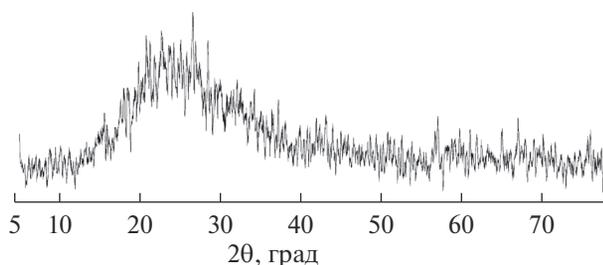


Рис. 1. Рентгенограмма исследованного образца алюмосиликата натрия.

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 РВ-11 с электродом РУ-Р11 (Германия).

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

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

где  $C_{исх}$  — 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  $Cs^+$  ( $\alpha$ , %) рассчитывали по формуле

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

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

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

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определение количественного элементного состава полученного образца показало следующие содержания элементов, мас. %: Si — 49.6, Al — 30.7, Na — 17.1, К — 2.1. Такой состав отвечает мольному соотношению элементов М : Si : 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 м<sup>2</sup>/г.

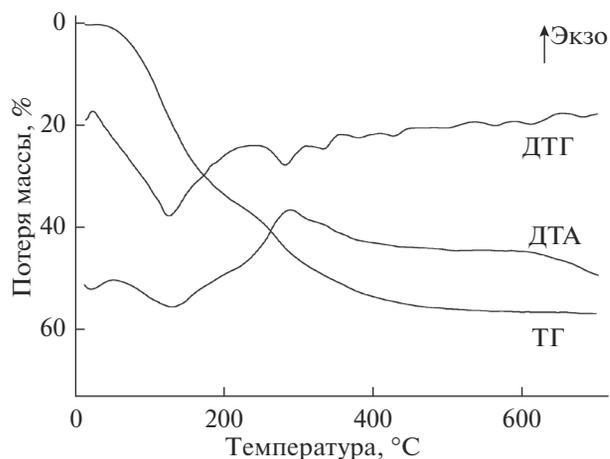


Рис. 2. Результаты термического анализа алюмосиликата натрия.

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:

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

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).

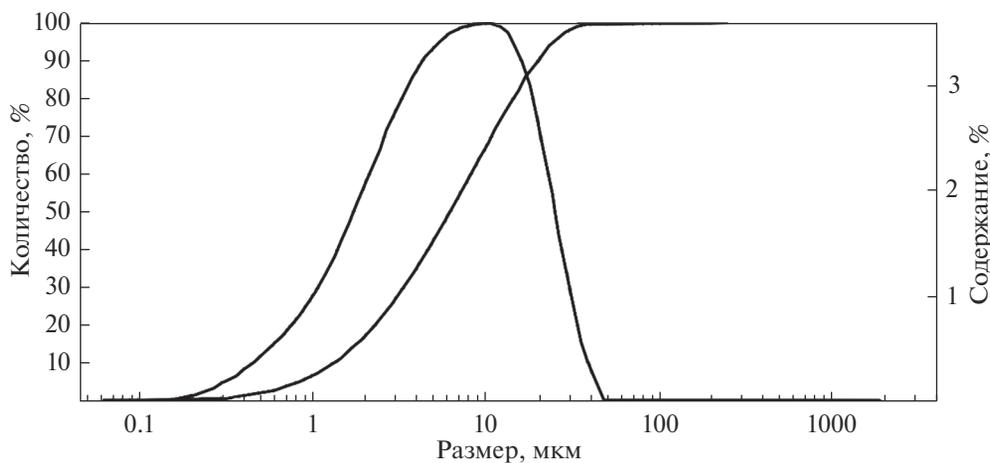


Рис. 3. Распределение частиц алюмосиликата натрия по размерам.

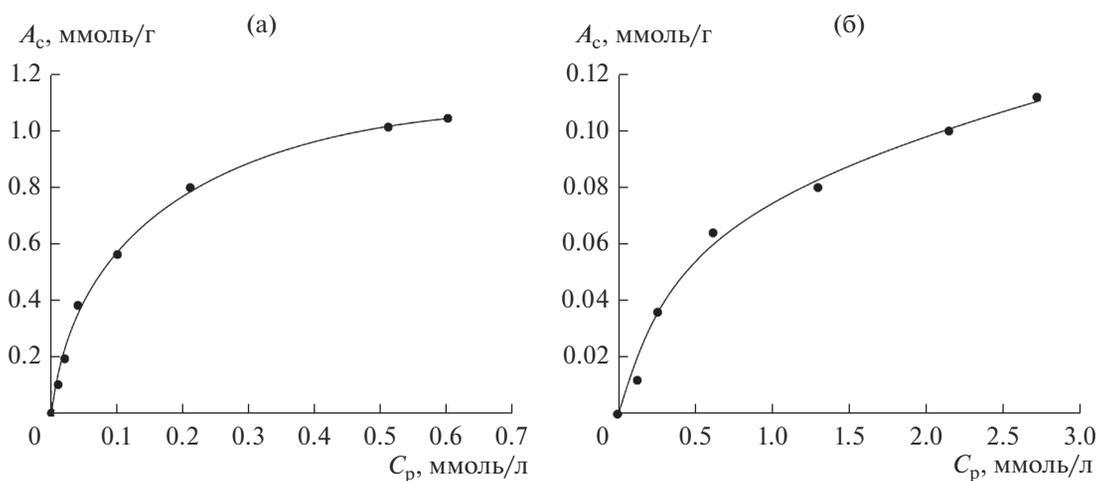


Рис. 4. Изотермы сорбции ионов  $Cs^+$  алюмосиликатом натрия из растворов на основе дистиллированной (а) и морской (б) воды.

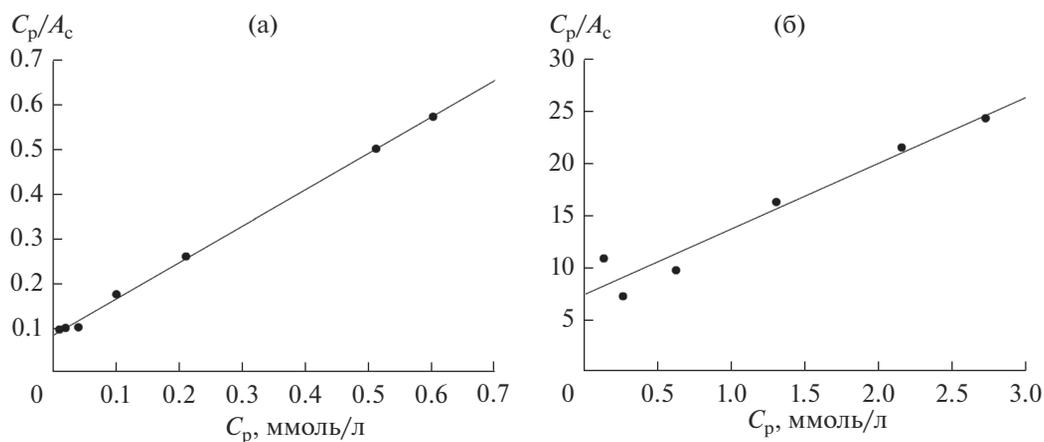


Рис. 5. Изотермы сорбции ионов  $Cs^+$  синтетическим алюмосиликатом натрия из растворов на основе дистиллированной (а) и морской (б) воды в координатах линейного уравнения Ленгмюра.

**Таблица 2.** Параметры уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха, полученные при анализе изотерм сорбции ионов Cs<sup>+</sup> синтетическим алюмосиликатом натрия

Тип раствора, содержащего Cs <sup>+</sup>	Дистиллированная вода	Морская вода
Уравнение Ленгмюра		
<i>k</i> , л/ммоль	9.5	0.875
<i>A</i> <sub>max</sub> , ммоль/г	1.2	0.16
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.9985	0.9427
Уравнение Фрейндлиха		
<i>K</i> <sub>F</sub> (ммоль/г) (л/ммоль) <sup>1/<i>n</i></sup>	1.7	14.9
1/ <i>n</i>	0.5521	14.9
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.9452	0.6589

**Таблица 3.** Зависимость коэффициента распределения *K*<sub>d</sub> цезия на алюмосиликате натрия при сорбции из раствора без солевого фона и морской воды

Т : Ж	<i>K</i> <sub>d</sub> , мл/г	
	дистиллированная вода (рН 6.2)	морская вода (рН 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	<i>K</i> <sub>d</sub> , мл/г (рН раствора)		
	NaNO <sub>3</sub>	KNO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>
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*<sub>F</sub> и *n*:

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

где *a* – величина адсорбции (ммоль/г); *K*<sub>F</sub> – 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<sup>+</sup> синтетическим алюмосиликатом натрия наиболее подходящей является модель Ленгмюра, о чем свидетельствуют соответствующие коэффициенты корреляции. Максимальная сорбционная емкость *A*<sub>max</sub> при сорбции ионов Cs<sup>+</sup> 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*<sub>d</sub> (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<sup>+</sup> 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<sup>+</sup> составляет в случае дистиллированной воды 96.4%, морской – 19.7%, NaNO<sub>3</sub> – 87.4%, KNO<sub>3</sub> – 70.0%, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> – 69.2%. Таким образом, сорбция цезия в морской воде значительно снижается по сравнению со всеми исследуемыми типами растворов. При сорбции ионов Cs<sup>+</sup> из 0.01 М растворов нитратов наибольшие значения степени извлечения наблюдаются при сорбции из 0.01 М раствора NaNO<sub>3</sub>. Аналогичные данные были получены авторами [15] при исследовании сорбционных свойств синтетического наноструктурированного алюмосиликата калия при извлечении <sup>137</sup>Cs из растворов нитратов натрия, калия и аммония.

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

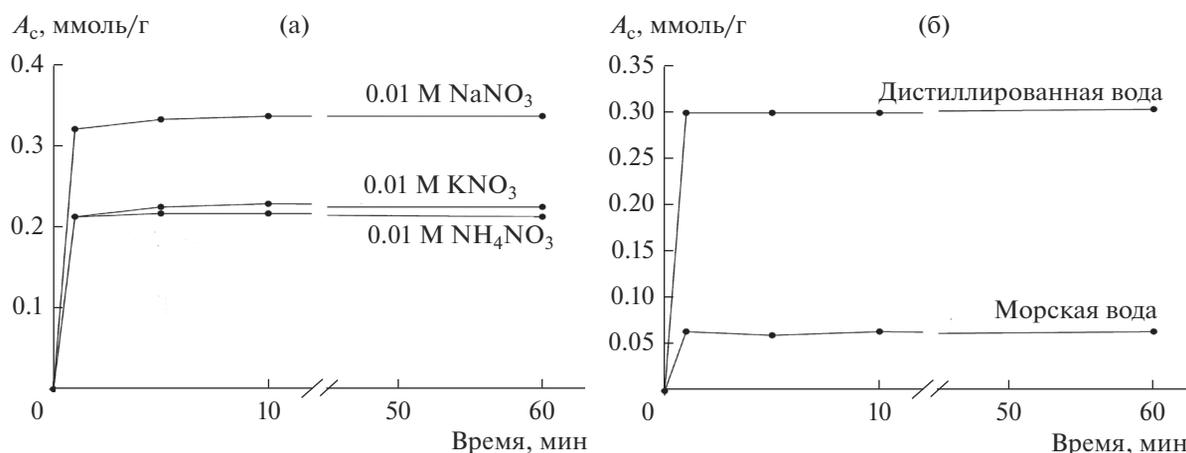


Рис. 6. Интегральные кинетические кривые сорбции цезия алюмосиликатом натрия из растворов различного солевого состава: а – 0.01 М нитраты натрия, калия и аммония; б – дистиллированная и морская вода.

центрации солей нитратов приведены в табл. 4. Видно, что наибольшие значения коэффициента распределения наблюдаются при сорбции цезия из растворов нитрата натрия. При сорбции ионов  $\text{Cs}^+$  из растворов нитрата калия и аммония коэффициент распределения уменьшается. С увеличением концентрации нитратов в растворе сорбция ионов  $\text{Cs}^+$  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  $\text{Cs}^+$  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  $\text{Cs}^+$  из растворов без солевого фона достигает 96.2%, а из морской воды – не превышает 25.7%. Показано, что для описания сорбции ионов  $\text{Cs}^+$  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  $A_{\text{max}}$  при сорбции ионов  $\text{Cs}^+$  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  $\text{Cs}^+$  составляет в случае дистиллированной воды 96.4%, морской воды – 19.7%,  $\text{NaNO}_3$  – 87.4%,  $\text{KNO}_3$  – 70.0%,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  – 69.2%. При сорбции ионов  $\text{Cs}^+$  из 0.01 М растворов нитратов наибольшие значения степени извлечения ионов  $\text{Cs}^+$  наблюдаются для раствора  $\text{NaNO}_3$ . Установлено, что наибольшие значения коэффициента распределения наблюдаются при сорбции цезия из растворов нитрата натрия. При сорбции ионов  $\text{Cs}^+$  из растворов нитрата калия и аммония коэффициент распределения существенно уменьшается. С увеличением концентрации нитратов в растворе сорбция ионов  $\text{Cs}^+$  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.hbrj.2016.10.001>.
12. *Гордиенко П.С., Ярусова С.Б., Земнухова Л.А., Чердниченко 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.