

ИММОБИЛИЗАЦИЯ РЕНИЯ КАК ИМИТАТОРА ТЕХНЕЦИЯ В АЛЮМОЖЕЛЕЗОФОСФАТНОЕ СТЕКЛО

© 2020 г. С. С. Данилов^{a,*}, А. В. Фролова^a, С. А. Куликова^a, С. Е. Винокуров^a,
К. И. Маслаков^b, А. Ю. Тетерин^c, Ю. А. Тетерин^{b,c}, Б. Ф. Мясоедов^{a,d}

^a Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, д. 19

^b Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Воробьевы горы, д. 1

^c НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

^d Межведомственный центр аналитических исследований по проблемам в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН, 117342, Москва, Профсоюзная ул., д. 65, стр. 6

*e-mail: danilov070992@gmail.com

Получена 08.04.2020, после доработки 30.08.2020, принята к публикации 06.09.2020

Синтезированы образцы натрийалюможелезофосфатного стекла, содержащего рений в качестве имитатора технеция радиоактивных отходов. Исследованы фазовый состав, структура и водоустойчивость полученных стекол. Показано, что образцы с включением оксида рения до 2.88 мас% рентгеноаморфны и однородны, а их анионный мотив соответствует стеклообразному. Установлено, что степень окисления рения в полученных стеклах – Re(VII), а 97% железа находится в виде Fe(III) и 3% в виде Fe(II). Установлена высокая устойчивость стекла к выщелачиванию при 90°C. Скорость выщелачивания Re из стекол в соответствии со статическим тестом РСТ и полудинамическим тестом ГОСТ Р 52126–2003 составляет не более 6×10^{-6} и 3×10^{-6} г/(см²·сут) соответственно.

Ключевые слова: иммобилизация, остекловывание, алюможелезофосфатное стекло, рений, технеций

DOI: 10.31857/S0033831120060076

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной задачей развивающейся атомной энергетики является решение вопроса безопасного захоронения отвержденных высокоактивных отходов (ВАО). Единственной промышленной формой для иммобилизации ВАО является алюмофосфатное и боросиликатное стекло.

Радионуклид ⁹⁹Tc – один из продуктов деления, содержащийся в существенном количестве в образующихся ВАО, – имеет период полураспада 213 тысяч лет и представляет высокую опасность для окружающей среды. При этом летучесть большинства соединений Tc(VII) значительно осложняет его эффективную иммобилизацию в стекло и другие высокотемпературные матрицы [1]. Например, согласно данным работы [2], более 90% ⁹⁹Tc улетучивается в течение синтеза боросиликатного стекла при 1150–1250°C. В этой связи количество литературных данных исследований по иммобилизации технеция крайне ограничено.

Ранее нами было разработано натрийалюможелезофосфатное (НАЖФ) стекло пирофосфат-

ной структуры с высокой кристаллизационной и гидролитической устойчивостью следующего состава, мол%: 40Na₂O–10Al₂O₃–10Fe₂O₃–40P₂O₅ [3–8]. Кроме того, НАЖФ стекло имеет более низкую температуру синтеза – около 900–1000°C, что может сократить потери при включении технеция.

Настоящая работа посвящена исследованию образцов НАЖФ стекла, содержащего рений как имитатор технеция из ВАО, в том числе изучению их фазового состава, структуры и устойчивости к выщелачиванию при повышенной температуре.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез НАЖФ стекол проводили путем плавления шихты из смеси порошков NaPO₃, Al₂O₃ и Fe₂O₃ в количестве, соответствующем вышеуказанному оптимальному составу НАЖФ стекла, а также добавок KReO₄ при 950°C в течение 60 мин в высокотемпературной лабораторной электропечи SNOL 30/1300 (AB UMEGA, Литва). Для исследования влияния содержания рения на состав и

свойства НАЖФ стекла готовили образцы стекла, состав которых рассчитывали из теоретического содержания Re в стеклах 1, 3 и 6 мас%; полученные стекла далее обозначены как образцы 1, 2 и 3 соответственно. Полученные расплавы выливали на поддон из нержавеющей стали для закаливания стекол.

Степень включения рения в стекла определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на спектрометре Axios Advanced PW 4400/04 (PANalytical B.V., Нидерланды) с программным обеспечением Philips Super Quantitative & IQ Software 2001.

Фазовый состав синтезированных стекол определяли методом рентгеновской дифрактометрии (РД) с использованием дифрактометра Ultima-IV (Rigaku, Япония). Полученные данные расшифровывали при помощи программного пакета Jade 6.5 (MDI, США) с порошковой базой данных PDF-2. Структуру образцов стекла изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе Cameca SX100.

Строение анионной матрицы образцов определяли методом инфракрасной (ИК) спектроскопии на ИК-Фурье спектрометре Nicolet IR 200 FT-IR (Thermo Scientific, Великобритания) в диапазоне длин волн 4000–400 см⁻¹. Компьютерное разложение выполнено в программе Origin 7.0 по методу, предложенному в работе [9] при обработке ИК спектров боросиликатных стекол.

Степень окисления рения в НАЖФ стеклах зависит от температуры и окислительно-восстановительных условий варки стекла, в частности от присутствия других поливалентных элементов, прежде всего Fe. Степень окисления рения и железа в стеклах определяли методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на спектрометре Kratos Axis Ultra DLD с использованием монокроматического AlK_α-излучения ($h\nu = 1486.7$ эВ) при мощности рентгеновской трубки 150 Вт и давлении 1.3×10^{-7} Па при комнатной температуре. Энергии связи (E_b) измеряли относительно $E_b(C 1s)$ электронов углеводородов, адсорбированных на поверхности образца, которая была принята равной 285.0 эВ. Фон, связанный с вторично рассеянными электронами, вычитали по методу Ширли [10].

Водоустойчивость стекол определяли в соответствии с стандартными тестами РСТ [11] и

Таблица 1. Химический состав синтезированных образцов НАЖФ стекла

Компоненты	Содержание в образце, мас%		
	1	2	3
Na ₂ O	21.31	19.91	20.17
Al ₂ O ₃	7.99	8.15	8.15
SiO ₂	1.17	2.12	0.59
P ₂ O ₅	49.59	47.75	48.00
K ₂ O	0.63	1.00	1.39
Fe ₂ O ₃	18.63	18.20	17.68
Re ₂ O ₇ ^a	0.69 (53)	2.88 (74)	4.01 (52)

^a В скобках – степень включения Re от введенного в шихту количества, %.

ГОСТ Р 52126–2003 [12] при $90 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 7 и 28 сут соответственно.

В тесте РСТ использовали образцы стекол, измельченные до размера частиц от 0.071 до 0.15 мм. Удельная поверхность используемых в данном тесте порошков принята равной 0.02 м²/г. Навески порошка массой около 1 г помещали в тefлоновые контейнеры, заливали бидистиллированной водой объемом 10 мл и выдерживали в термостатируемом шкафу.

В тесте ГОСТ Р 52126–2003 использовали монолитные образцы стекол, при этом проводили смену контактного раствора через 1, 3, 7, 10, 14, 21, 28 сут от начала опыта.

Содержание компонентов стекла в растворах после выщелачивания определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС–ИСП) на спектрометре iCAP-6500 Duo (Thermo Scientific, Великобритания).

Скорость выщелачивания элементов рассчитывали по формуле

$$LR_i = \frac{m_{ni}}{M_{0,i} \cdot S \Delta t}, \quad (1)$$

где m_{ni} – масса элемента, выщелоченная за n -й период сут, г; $M_{0,i}$ – массовая концентрация элемента в образце в начале испытаний, г/г; S – площадь поверхности образца, см²; Δt – временной промежуток выщелачивания, сут.

Механизм выщелачивания Na и Re оценивали согласно модели де Гроота и ван дер Слоота [13], которую можно представить в виде уравнения линейной зависимости (2)

$$\lg Y_i = A \lg t + \text{const}, \quad (2)$$

где Y_i – суммарный выход элемента i из образца за время контакта с водой, мг/м²; t – время контакта, сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фазовый состав и структура образцов НАЖФ стекла. При исследовании химического состава полученных образцов НАЖФ стекла (табл. 1) установлено, что не менее 52% (в образце 2 до 74%) от введенного в шихту количества рения оказалось иммобилизовано в стеклах. Содержание оксидов структурообразующих компонентов матрицы (Na_2O , Al_2O_3 , P_2O_5 , Fe_2O_3) соответствует расчетным данным. В образцах обнаружена примесь SiO_2 до 2.12 мас%, что связано с переходом кремния в расплавы из кварцевых тиглей, используемых при синтезе стекла.

При исследовании фазового состава стекол методом РД установлено, что образцы 1 и 2 рентгено-аморфны; на рис. 1 в качестве примера приведена дифрактограмма образца 2. В то же время показано, что образец 3 состоит из двух фаз – матричной стеклофазы и примесной фазы, структура которой соответствует KReO_4 (рис. 1). По данным СЭМ подтверждено, что образцы 1 и 2 являются практически однородными стеклами с незначительным количеством пор, наличие которых видно на рис. 2, а на примере образца 2. При этом в образце 3 кроме стеклофазы наблюдается в малом количестве примесная кристаллическая фаза, очевидно, на основе KReO_4 (рис. 2, б), однако по причине рассеянного распределения этой фазы уточнение ее состава методом СЭМ/ЭДС затруднено.

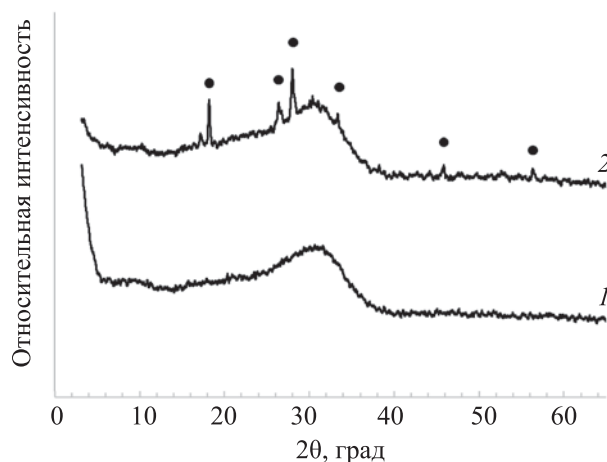


Рис. 1. Дифрактограммы исследованных образцов НАЖФ стекла: (1) образец 2, (2) образец 3, (●) KReO_4 .

Общий вид ИК спектра на примере образца 2 представлен на рис. 3, а; спектры других образцов практически идентичны. Колебания, непосредственно связанные со строением анионной матрицы полученных стекол, лежат в интервале от 1500 до 400 см^{-1} . Полосы поглощения в диапазонах 700–800 и 900–950 см^{-1} относятся соответственно к симметричным и антисимметричным валентным колебаниям мостиковых связей O-P-O и P-O-Al , связывающих тетраэдры PO_4 друг с другом и с тетраэдрами AlO_4 . Полосы поглощения в диапазонах 950–1050, 1050–1150, 1150–1250 и 1250–1350 см^{-1} отвечают колебаниям связей O-P-O в тетраэдрах PO_4 с числом мостиковых ионов кислорода 0, 1, 2

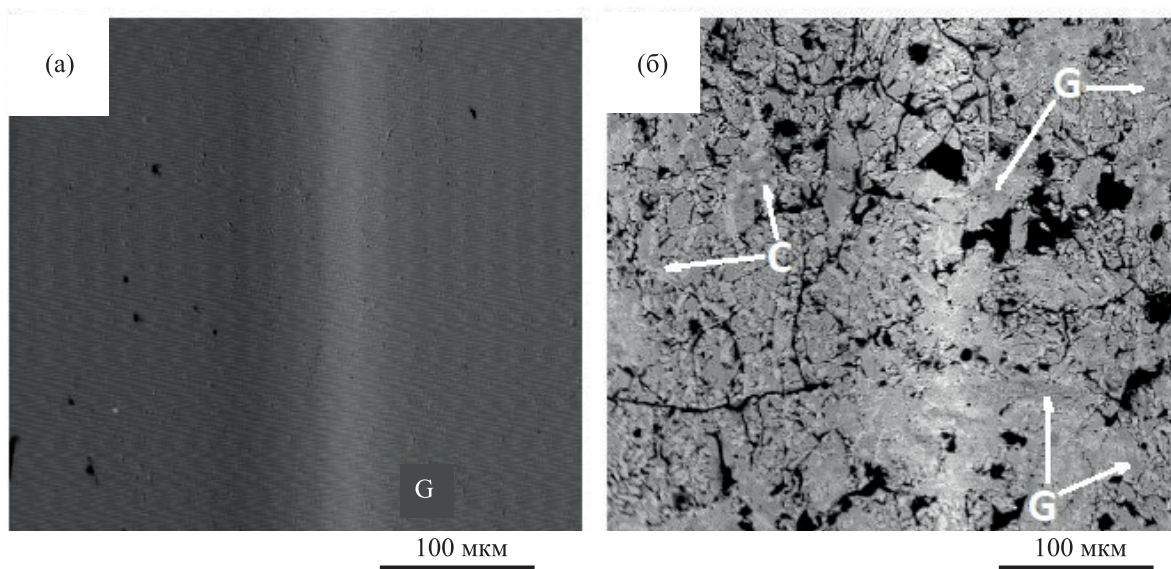


Рис. 2. СЭМ-изображения исследованных НАЖФ стекол: а – образец 2, б – образец 3. G – стеклофаза, С – примесная кристаллическая фаза.

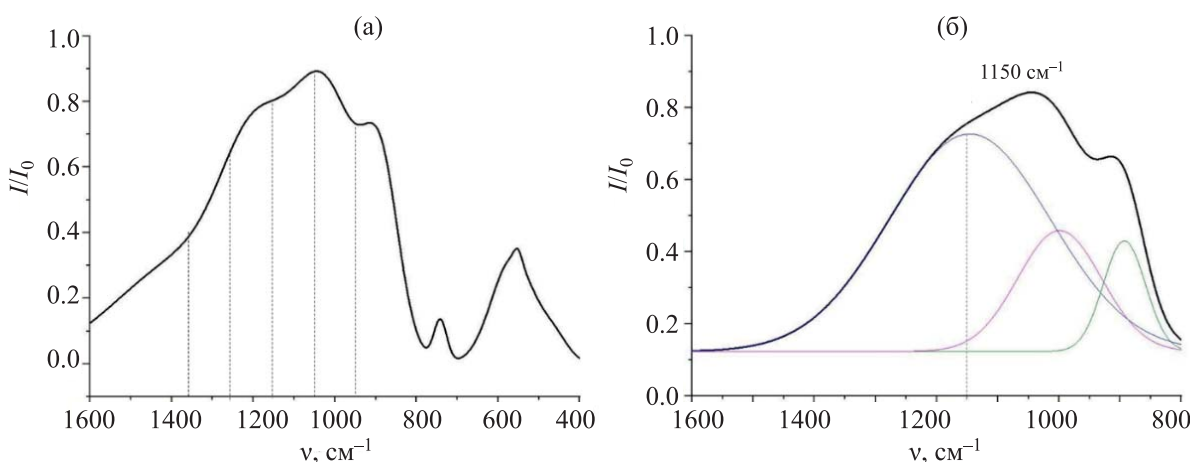


Рис. 3. Общий вид ИК спектра образца 2 НАЖФ стекла (а) и его компьютерное разложение (б).

и 3 соответственно, а в области $1300\text{--}1400\text{ см}^{-1}$ – колебаниям двойных связей $\text{P}=\text{O}$ [14]. Полосы поглощения в диапазоне $750\text{--}600\text{ см}^{-1}$ обусловлены валентными колебаниями связей $\text{Al}\text{--}\text{O}$ в полиэдрах AlO_n ($750\text{--}700$, $700\text{--}650$ и $650\text{--}600\text{ см}^{-1}$ в полиэдрах AlO_4 , AlO_5 и AlO_6 соответственно) [14]. Для колебаний связей $\text{O}\text{--}\text{Fe}\text{--}\text{O}$ в тетраэдре Fe^{3+}O_4 характерен интервал $550\text{--}650\text{ см}^{-1}$ [15]. Результаты компьютерного разложения ИК спектра образца 2 представлены на рис. 3, б. Спектру свойственны широкие полосы поглощения, что подтверждает аморфное стеклообразное состояние образца 2. Наиболее интенсивная полоса имеет максимум в точке 1150 см^{-1} и относится к валентным симметричным колебаниям тетраэдров фосфора с одним мостиковым ионом кислорода, что соответствует целевой пиррофосфатной структуре стекла.

Таким образом, на основании полученных данных изучения состава и структуры синтезированных НАЖФ стекол показано, что введение в состав стекла оксида рения в количестве до 2.88 мас% (образец 2, табл. 1) не влияет на устойчивость стеклообразующего каркаса.

Степень окисления рения и железа в НАЖФ стекле. Степень окисления компонентов НАЖФ

стекла методом РФЭС определяли на примере однородного аморфного образца 2. В обзорном РФЭС спектре (рис. 4, табл. 2) наблюдаются линии элементов стекла и Оже-спектры углерода (C KLL), кислорода (O KLL), железа (Fe LMM) и натрия (Na KLL). Диапазон спектра можно разделить на две части: низкоэнергетическую область спектра валентных электронов от 0 до 50 эВ и область спектра остовных электронов от 50 эВ и выше по энергии связи.

При анализе РФЭС спектра $\text{Fe } 2p$ -электронов (рис. 5, а) установлено, что стекло имеет сложную структуру. Так, в этих спектрах вместо ожидаемого спин-дублета с $\Delta E_{\text{sl}} = 13.2\text{ эВ}$ наблюдается суперпозиция спектров ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} [18]. Предполагается, что ионы $\text{Fe}^{2+}(3d^6)$ находятся в низкоспиновом ($S = 0$) состоянии $\text{Fe}^{2+}(t_{2g}^6 e_g^0)$, а ионы $\text{Fe}^{3+}(3d^5)$ – в высокоспиновом ($S = 5/2$) состоянии $\text{Fe}^{3+}(t_{2g}^3 e_g^2)$. Таким образом, ионный состав железа в образце соответствует 97% Fe^{3+} и 3% Fe^{2+} . Данное соотношение разных степеней окисления железа отличается от их соотношения в базовом составе стекла: $\text{Fe(III)/Fe(II)} = 85/15$ [6]. Это указывает на прохождение окислительно-восстановительной реакции на поверхности стекла, что требует дальнейшего исследования.

Таблица 2. Энергии связи электронов E_b (эВ) и ширины линий Γ^a (эВ) образца 2 НАЖФ стекла в сравнении с литературными данными

Образец	$\text{Re}4f_{7/2}$	$\text{Re}4d_{5/2}$	$\text{Fe}2p_{3/2}$	$\text{O}1s$	$\text{C}1s$
Образец 2	46.4 (1.1), $\Delta E_{\text{sl}} = 2.4$	266.1 (4.5), $\Delta E_{\text{sl}} = 13.5$	712.3 (3.1), 3.7 sat, 109%, $\Delta E_{\text{sl}} = 13.8$	531.2 (1.6), 532.6 (1.6)	285.0 (1.3), 289.1 (1.6)
Re_2O_7 [16]	46.9				
KReO_4 [17]	46.1				
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [16]			711.0		284.8

^a Значения Γ приведены в скобках.

Таблица 3. Скорость выщелачивания компонентов НАЖФ стекла: тест РСТ

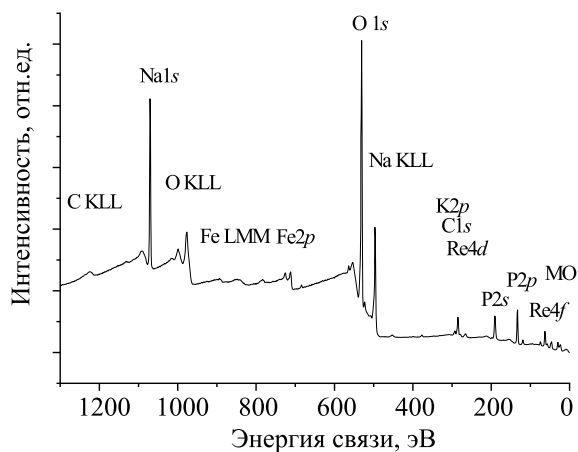
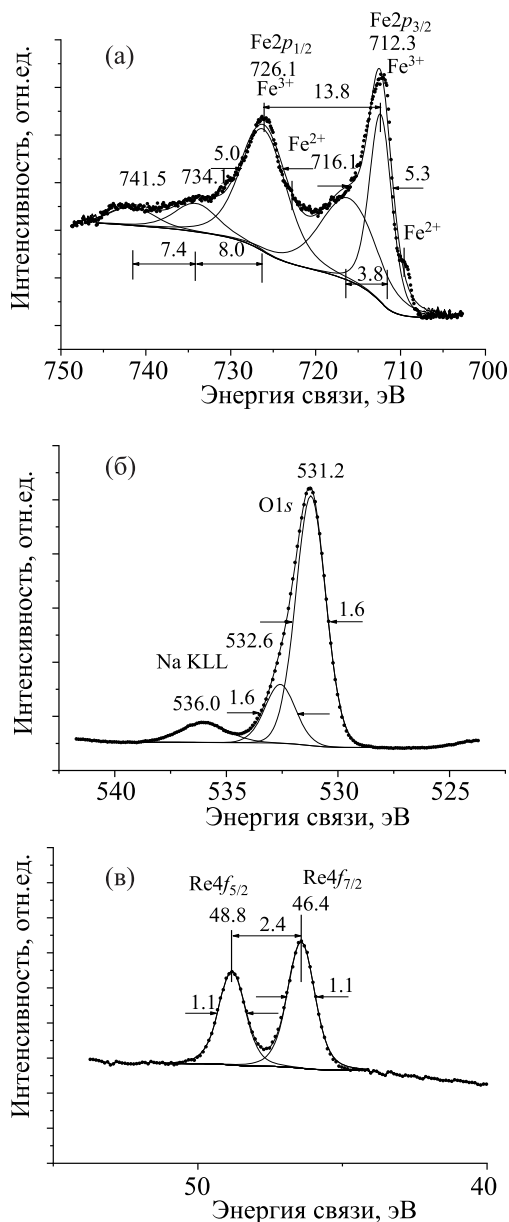
Элемент	Скорость выщелачивания, г/(см ² ·сут), из образца	
	1	2
Al	2.6×10^{-6}	1.9×10^{-6}
Fe	1.1×10^{-6}	1.3×10^{-6}
Na	4.8×10^{-6}	4.8×10^{-6}
P	4.2×10^{-6}	5.1×10^{-6}
Re	6.0×10^{-6}	3.8×10^{-6}

Отмечено, что линия O 1s-электронов изученного образца уширена и асимметрична (рис. 5, б). Величины энергии связи 531.2 эВ относятся к немостиковым, а 532.6 эВ – к мостиковым ионам кислорода, преимущественно связям P–O–P при наличии определенного вклада связей P–O–Al и P–O–Fe. Соотношение площадей пиков мостиковых и немостиковых атомов кислорода составляет 4 к 1, что также подтверждает пирофосфатную структуру стекла.

Для определения степени окисления рения использовались линии Re 4f-электронов (рис. 5, в). В полученном спектре наблюдаются линии дублета, связанного со спин-орбитальным расщеплением с $\Delta E_{sl}(\text{Re } 4f) = 2.4$ эВ. Установлено, что энергия связи 4f_{7/2}-электронов составляет 46.4 эВ и соответствует энергии связи рения в KReO₄ [17].

Водоустойчивость НАЖФ стекла. Результаты теста РСТ для исследования водоустойчивости образцов 1 и 2 НАЖФ стекла представлены в табл. 3. Из данных табл. 3 видно, что скорость выщелачивания структурообразующих элементов (Na, Al, Fe, P) не зависит от количества иммобилизованного рения и составляет значения в диапазоне $(1\text{--}5) \times 10^{-6}$ г/(см²·сут), что соответствует скоро-

сти выщелачивания компонентов из базового состава стекла [3]. Скорость выщелачивания рения из изученных образцов составляет не более 6.0×10^{-6} г/(см²·сут), что сравнимо со скоростью выщелачивания технеция из боросиликатного стекла с 0.1 мас% Tc: $LR_{\text{Tc}} > 10^{-6}$ г/(см²·сут) [19, 20]. При этом отмечено, что повышение содержания оксида рения с 0.69 мас% в образце 1 до 2.28 мас% в образце 2 не приводит к росту скорости его выщелачивания, а наоборот, снижает скорость с 6.0×10^{-6} до 3.8×10^{-6} г/(см²·сут).

**Рис. 4.** Обзорный РФАЭС-спектр образца 2 НАЖФ стекла.**Рис. 5.** РФАЭС спектры: а – Fe 2p-электронов, б – O 1s-электронов, в – Re 4f-электронов.

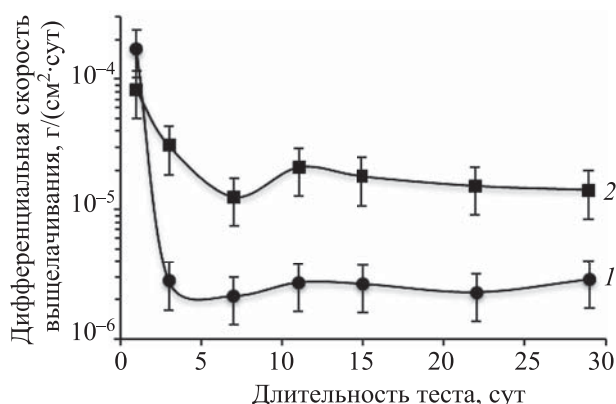


Рис. 6. Кинетические кривые выщелачивания (1) Re и (2) Na из образца 2 НАЖФ стекла при 90°C в соответствии с ГОСТ Р 52126–2003.

Результаты полудинамического теста ГОСТ Р 52126–2003 на примере образца 2 представлены на рис. 6. Из рис. 6 видно, что в первые сутки контакта с водой скорость выщелачивания рения составляет около 1.7×10^{-4} г/(см²·сут), а затем резко снижается на 2 порядка величины. Из литературы известно, что повышенная скорость выщелачивания компонентов стекла в первые дни теста характерна для стеклоподобных компаундов и связана со смывом компонентов с поверхности стекла [21, 22]. При этом более высокая скорость выщелачивания Re в первые сутки контакта с водой в сравнении с Na (рис. 6) может быть связана с растворением примеси перрената натрия, который образовался при изоморфном замещении калия на натрий и имеет большую растворимость в сравнении с перренатом калия. Из рис. 6 также видно, что в течение первой недели теста продолжается снижение скорости выщелачивания Re и Na до значений около 2.1×10^{-6} и 1.2×10^{-5} г/(см²·сут) соответственно, а затем стабилизируется около 2.5×10^{-6} и 1.5×10^{-5} г/(см²·сут) соответственно, что, очевидно, связано с изменением механизма выщелачивания этих металлов. Также следует отметить, что нормативных требований к скорости выщелачивания этих металлов из компаундов для ВАО не существует, но, например, по причине схожести химического поведения натрия и цезия возможно ориентироваться на нормы для ¹³⁷Cs: скорость выщелачивания ¹³⁷Cs из стеклоподобного компаунда при 25°C не должна превышать 1×10^{-5} г/(см²·сут) [23]. Из данных на рис. 6 видно, что скорость вы-

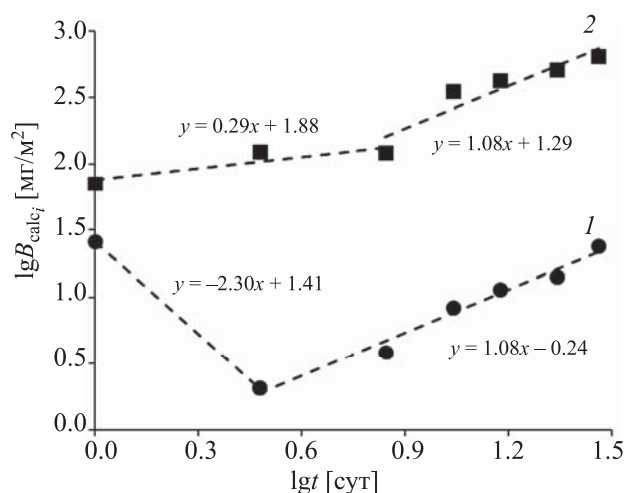


Рис. 7. Логарифмическая зависимость выхода Re и Na из НАЖФ стекла от времени контакта с водой, согласно модели [13].

щелачивания натрия в течение испытаний снижается до значений около этого предела, что указывает на высокую водоустойчивость исследованного НАЖФ стекла даже при повышенной температуре 90°C.

Для выяснения механизма выщелачивания рения и натрия из НАЖФ стекла построена зависимость согласно модели де Гроота и ван дер Слоота (рис. 7). Ранее в работах [24–27] было показано, что значениям коэффициента A в уравнении (2) соответствуют следующие механизмы выщелачивания элементов: <0.35 – вымывание с поверхности компаунда; $0.35–0.65$ – диффузия из внутренних слоев; >0.65 – растворение поверхностного слоя компаунда. Из данных рис. 7 видно, что выщелачивание рения и натрия в первые 3 и 7 сут соответственно происходит за счет их вымывания с поверхности стекол, так как коэффициент A составляет -2.3 и 0.29 соответственно. При продолжении теста механизм выщелачивания рения и натрия изменяется и соответствует начавшемуся растворению поверхностного слоя стекла: коэффициент A составляет 1.08 . При этом следует отметить, что, несмотря на растворение стекла, скорость выщелачивания натрия на 28-е сутки ниже, чем для модельного фосфатного стекла при повышенной температуре [28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированы и изучены образцы НАЖФ стекла, содержащие рений как имитатор технеция. Установлено, что полученные стекла имеют амор-

фный стеклообразующий каркас, а доля иммобилизованного рения составляет не менее 52% (до 74%) от его количества, введенного в шихту. Рений и железо в стеклах находятся в степени окисления VII и преимущественно III соответственно. Установлено, что НАЖФ стекло обладает высокой устойчивостью к выщелачиванию при повышенной температуре, соответствующей нормативным требованиям к стеклоподобному компаунду для иммобилизации ВАО. Показано, что при повышенной температуре основным механизмом выщелачивания компонентов стекла является растворение поверхностного слоя стекла.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследования проведены в рамках государственного задания ГЕОХИ РАН (0137-2019-0022). В исследованиях использовали оборудование, приобретенное за счет средств Программы развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спицын В.И., Кузина А.Ф. Технеций. М.: Наука, 1981. 147 с.
2. Soderquist Ch.Z., Schweiger M.J., Kim D.S., Lukens W.W., McCloy J.S. // J. Nucl. Mater. 2014. Vol. 449. P. 173.
3. Стефановский С.В., Стефановская О.И., Винокуров С.Е., Данилов С.С., Мясоедов Б.Ф. // Радиохимия. 2015. Т. 57, № 4. С. 295.
4. Danilov S.S., Stefanovsky S.V., Stefanovskaya O.I., Vinokurov S.E., Myasoedov B.F., Teterin Yu.A. // Radiochemistry. 2018. Vol. 60, N 4. P. 434.
5. Стефановский С.В., Маслаков К.И., Тетерин Ю.А., Калмыков С.Н., Данилов С.С., Тетерин А.Ю., Иванов К.Е. // Докл. АН. 2018. Т. 478, № 2. С. 175.
6. Стефановский С.В., Стефановская О.И., Семенова Д.В., Кадыко М.И., Данилов С.С. // Стекло и керамика. 2018. № 3. С. 9.
7. Stefanovsky S.V., Sefanovsky O.I., Myasoedov B.F., Vinokurov S.E., Danilov S.S., Nikonov B.S., Maslakov K.I., Teterin Yu.A. // J. Non-Cryst. Solids. 2017. Vol. 471. P. 421.
8. Maslakov K.I., Teterin Yu.A., Stefanovsky S.V., Kalmykov S.N., Teterin A.Yu., Ivanov K.E., Danilov S.S. // J. Non-Cryst. Solids. 2018. Vol. 482. P. 23.
9. Mysen B.O., Finger L.W., Virgo D., Seifert F.A. // Am. Mineral. 1982. Vol. 67, N 7–8. P. 686.
10. Shirley D.A. // Phys. Rev. B. 1972. Vol. 5, N 12. P. 4709.
11. ASTM Standard C 1285-94: Standard Test Methods for Determining Chemical Durability of Nuclear Waste Glasses: The Product Consistency Test (PCT). Philadelphia: ASTM, 1994.
12. ГОСТ Р 52126–2003. Отходы радиоактивные. Определение химической устойчивости отвержденных высокоактивных отходов методом длительного выщелачивания. М.: Госстандарт России, 2003. Т. 3.
13. De Groot G.J., Van der Sloot H.A. // Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive and Mixed Wastes / Eds T.M. Gilliam, C.C. Wiles. Philadelphia: ASTM, 1992. Vol. 2. P. 149.
14. Лазарев А.Н., Миргородский А.П., Игнатъев И.С. Колебательные спектры сложных окислов. Л.: Наука, 1975. 296 с.
15. Плюснина И.И. Инфракрасные спектры минералов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 175 с.
16. Naumkin A., Kraut-Vass A., Gaarenstroom S., Powell C. NIST X-ray Photoelectron Spectroscopy Database. US Secretary of Commerce. 2012. URL: <https://srdata.nist.gov/xps/Default.aspx>. (дата обращения: 04.03.2020)
17. Thorn R. J. Carlson K.D., Crabtree G.W. Wang H.H. // J. Phys. C: Solid State Phys. 1985. Vol. 18, N 28. P. 5501.
18. Maslakov K.I., Teterin Yu.A., Stefanovsky S.V., Kalmykov S.N., Teterin A.Yu., Ivanov K.E. // J. Alloys Compd. 2017. Vol. 712. P. 36.
19. Лаверов Н.П., Юдинцев С.В., Омеляненко Б.И. // Геология рудн. месторождений. 2009. Т. 51, № 4. С. 291.
20. Pirlet V., Lemmens K., Van Iseghem P. // Proc. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVIII. Warrendale: MRS, 2004. Vol. 824. P. 385.
21. Власова, Н.В., Ремизов М.Б., Козлов П.В., Беланова Е.А. // Вопр. радиац. безопасности. 2017. № 3. С. 32.
22. Frugier P., Gin S., Minet Y., Chave T., Bonin B., Gordon N., Lartigue J.-E., Jollivet P., Ayral A., De Windt L., Santarini G. // J. Nucl. Mater. 2008. Vol. 380. P. 8.
23. НП-019-15: Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. Ростехнадзор, 2015.
24. Al-Abed S. R., Hageman P. L., Jegadeesan G., Madhavan N., Allen D. // Sci. Total Environ. 2006. Vol. 364. P. 14.
25. Moon D.H., Dermatas D. // Eng. Geol. 2006. Vol. 85. P. 67.
26. Torras J., Buj I., Rovira M., de Pablo J. // J. Hazard. Mater. 2011. Vol. 186. P. 1954.
27. Xue Q., Wang P., Li J.-S., Zhang T.-T., Wang S.-Y. // Chemosphere. 2017. Vol. 166. P. 1.
28. Мартынов К.В., Константинова Л.И., Захарова Е.В. // Вопр. радиац. безопасности. 2015. № 4. С. 10.