



## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.72

doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/10686

### **Композиционные аэрогели на основе восстановленного оксида графена, декорированного наночастицами оксидов железа, для сорбции тяжёлых и редкоземельных металлов из растворов сложного состава**

**Александр Викторович Бабкин<sup>1,2</sup>✉, Елена Александровна Захарченко<sup>3</sup>,  
Елена Анатольевна Нескоромная<sup>1,3</sup>, Мария Александровна Рыженкова<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия, A.V.Babkin93@yandex.ru✉

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию перспективной технологии получения эффективных сорбционных материалов на основе модифицированных графеновых структур с использованием доступных и экологически чистых реагентов. В качестве исходного сырья для получения наночастиц оксидов железа использован доступный хлорид железа (III). Смешением растворов ацетата железа с дисперсией оксида графена с дальнейшим восстановлением гидроксидов железа до оксидов и оксида графена до графена аскорбиновой кислотой, получена устойчивая структура гидрогеля. С применением методов сушки в сверхкритическом изопропанолу синтезирован высокопористый аэрогель, модифицированный наночастицами оксидов железа. Полученный композиционный материал охарактеризован методами СЭМ, ПЭМ, XRD, БЭТ. Установлено, что в структуре аэрогеля наночастицы железа присутствуют в форме ферромагнитных оксидных фаз –  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Методом ПЭМ показано, что частицы равномерно распределены в углеродной матрице аэрогеля, средний размер идентифицированных наночастиц оксидов железа не превышает 100 нм. Методом XRD подтверждено восстановление оксида графена в процессе синтеза, а также наличие оксидов железа в структуре аэрогеля в предполагаемых ферромагнитных формах. Методом адсорбции/десорбции азота установлено, что структура аэрогеля представлена преимущественно микропорами. Величина удельной поверхности синтезированного аэрогеля составила – 670 м<sup>2</sup>/г. При адсорбции широкого ряда ионов металлов из слабокислых растворов сложного состава показана возможность эффективного комплексного извлечения редкоземельных элементов синтезированным аэрогелем. Суммарная степень извлечения превышает 80%, а по некоторым актинидам – 95%, при этом суммарная степень извлечения щелочноземельных элементов около 10%.

**Ключевые слова:** оксид графена, наночастицы железа, сверхкритическая сушка, изопропиловый спирт, аэрогель, сорбционные свойства, тяжёлые и редкоземельные металлы.

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента для молодых Российских учёных – кандидатов наук (проект № МК-4249.2021.4).

**Для цитирования:** Бабкин А.В., Захарченко Е.А., Нескоромная Е.А., Рыженкова М.А. Композиционные аэрогели на основе восстановленного оксида графена, декорированного наночастицами оксидов железа, для сорбции тяжёлых и редкоземельных металлов из растворов сложного состава // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2022. Т. 22, № 5. С. 650-658. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10686>



Original article

## Composite aerogels based on reduced graphene oxide decorated with iron oxide nanoparticles for the sorption of heavy and rare earth metals from multicomponent solutions

Alexander V. Babkin<sup>1,2</sup>✉, Elena A. Zakharchenko<sup>3</sup>,  
Elena A. Neskromnaya<sup>1,3</sup>, Maryia A. Ryzhenkova<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, A.V.Babkin93@yandex.ru✉

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup>D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The study is devoted to the development of a promising technology for obtaining effective sorption materials based on modified graphene structures using available and environmentally friendly reagents. Iron (III) chloride was used as feedstock for the production of iron oxide nanoparticles. By mixing solutions of iron acetate with a dispersion of graphene oxide with further reduction of iron hydroxides to oxides and graphene oxide to graphene with ascorbic acid, a stable hydrogel structure was obtained. Using drying methods in supercritical isopropanol, a highly porous aerogel modified with iron oxide nanoparticles was synthesized. The resulting composite material was characterized by SEM, TEM, XRD, and BET methods. It has been established that iron nanoparticles are present in the aerogel structure in the form of ferromagnetic oxide phases –  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. The TEM method showed that the particles are uniformly distributed in the carbon matrix of the aerogel; the average size of the identified iron oxide nanoparticles did not exceed 100 nm. The XRD method confirmed the reduction of graphene oxide during synthesis, as well as the presence of iron oxides in the aerogel structure in the proposed ferromagnetic forms. It has been established by nitrogen adsorption/desorption method that the structure of the aerogel is represented mainly by micropores. The specific surface area of the synthesized aerogel was 670 m<sup>2</sup>/g. The possibility for the efficient complex extraction of rare earth elements by the synthesized aerogel was shown for the adsorption of a wide range of metal ions from weakly acidic solutions of complex composition. The total degree of extraction exceeded 80%, and for some actinides - 95%, while the total degree of extraction of alkaline earth elements was about 10%.

**Keywords:** graphene oxide, iron nanoparticles, supercritical drying, isopropyl alcohol, aerogel, sorption properties, heavy and rare earth metals.

**Acknowledgments:** this study was supported by a grant of the President of the Russian Federation for the support of research by young Russian scientists with a PhD Degree (project no. MK-4249.2021.4).

**For citation:** Babkin A.V., Zakharchenko E.A., Neskromnaya E.A., Ryzhenkova M.A. Composite aerogels based on reduced graphene oxide decorated with iron oxide nanoparticles for the sorption of heavy and rare earth metals from multicomponent solutions. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2022. 22(5): 650-658. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10686>

### Введение

Проблемы загрязнения водных ресурсов в последнее время становятся особенно актуальными в связи со значительным увеличением темпов развития урбанизации, объёмов промышленного производства и сельского хозяйства [1]. Количество потребляемых водных ресурсов и темпы загрязнения окружающей среды постоянно возрастают, что приводит к необходимости разработки усовершен-

ствованных технологий очистки загрязнённых вод. Одним из основных типов загрязнителей водных ресурсов являются тяжёлые и редкоземельные металлы [2]. Многие из них имеют очень низкую величину предельно допустимой концентрации, а их повышенное содержание может быть крайне опасно при попадании в окружающую среду, организм животного или человека [3].

Одним из перспективных методов повышения качества водоподготовки явля-

ется разработка новых типов сорбционных материалов с улучшенными характеристиками. Особенно активно развиваются направления, связанные с использованием в качестве функциональных материалов оксида графена (ОГ) и различных типов композиционных структур на его основе [4]. В сравнении с другими адсорбентами, ОГ обладает рядом преимуществ: высокой удельной поверхностью, обилием кислородсодержащих функциональных групп на поверхности, возможностью образовывать устойчивые дисперсии в водной среде и др. [5]. Именно перечисленные выше характеристики делают этот материал перспективным для извлечения тяжёлых и редкоземельных элементов из водных растворов.

В процессах сушки, образованию высокопористой структуры из исходной дисперсии ОГ, значительно препятствуют силы Ван-дер-Ваальса и гидрофобные взаимодействия между графеновыми плоскостями [6]. Всё это приводит к агрегации малослойных частиц ОГ, существенному снижению величины его удельной поверхности и сорбционных свойств.

Для решения обозначенной проблемы существует несколько подходов, позволяющих сохранить показатели удельной поверхности материала в процессах получения композиционных структур. Одним из таких методов является частичное восстановление ОГ различными реагентами [7]. Однако, это может способствовать повышению гидрофобности поверхности и как следствие, снижению сорбционных свойств.

Допирование поверхности ОГ частицами металлов – простой и доступный способ улучшения физико-химических характеристик получаемых композиционных материалов [8]. Взаимодействуя с отдельными фрагментами ОГ, частицы металлов могут выступать в роли связующего и образовывать устойчивые структуры (гели), дополнительно способствуя

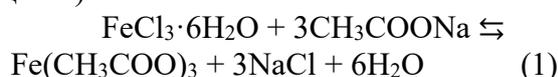
развитию поверхности и росту сорбционных свойств.

В представленной работе показана доступная технология синтеза композиционного аэрогеля на основе восстановленного ОГ, допированного наночастицами оксидов железа. Синтезированный композиционный материал представляет собой высокопористую углеродную структуру. Полученный аэрогель обладает высокими показателями удельной поверхности и объёма пор, магнитоактивностью. Исследованы его характеристики при адсорбции тяжёлых и редкоземельных металлов из низкоконцентрированных слабодиссоциированных растворов сложного состава (при pH=3).

#### Экспериментальная часть

Для получения композиционного аэрогеля на основе ОГ, модифицированного наночастицами оксидов железа использовали: ОГ (водная дисперсия концентрацией 1 масс. % производства ООО «НаноТехЦентр», Тамбов), хлорид железа (III) 6-водный –  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (марки Ч по ГОСТ 4147-74), ацетат натрия 3-водный –  $\text{CH}_3\text{COONa}$  (марки ХЧ по ГОСТ 2080-76), аскорбиновую кислоту –  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$  производства «Лаверна-Лаб», калий углекислый –  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (марки ХЧ по ГОСТ 4221-76), изопропиловый спирт –  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$  (марки ХЧ ТУ 6-09-402-87).

Исходную суспензию ОГ предварительно диспергировали при постоянном охлаждении с помощью ультразвукового воздействия с погружным зондом. Процесс проводили в течение 30 минут. Отдельно готовили растворы хлорида железа (III) и ацетата натрия в дистиллированной воде. Затем растворы смешивали, при этом, в соответствии с представленным ниже уравнением, образовывался ацетат железа (раствор тёмно-красного цвета):



Полученный раствор вносили в предварительно диспергированный ОГ при

постоянном перемешивании. В процессе внесения наблюдается значительное повышение вязкости смеси и мгновенное гелеобразование, связанное с взаимодействием ацетатных комплексов железа с функциональными группами на поверхности ОГ. Реакция проходит с понижением pH раствора (так как в процессе диссоциации ацетатных комплексов в водном растворе образуется уксусная кислота в качестве побочного продукта). Избыточное количество кислоты нейтрализовали раствором гидроксида натрия (NaOH) в эквимолярном соотношении. Затем, в полученную систему при постоянном перемешивании на водяной бане (при температуре  $\sim 100^{\circ}\text{C}$ ) вносили избыточное количество аскорбиновой кислоты для инициации процессов восстановления ОГ. Полученный гидрогель переносили на фильтр и многократно промывали дистиллированной водой до нейтрального pH фильтрата. Затем погружали в изопропиловый спирт для замещения воды в пористой структуре материала. Из полученной смеси воду удаляли карбонатом калия с образованием водных кристаллогидратов различного состава (инициировали осушение геля). Процесс проводили в течении 72 часов с 2 кратной заменой изопропилового спирта. Затем полученный материал загружали в автоклав высокого давления и сушили в сверхкритическом изопропаноле (при температуре  $\sim 250^{\circ}\text{C}$  и давлении 60 атмосфер) для получения аэрогеля. В данном случае использование изопропилового

спирта позволяет восстанавливать в процессах сверхкритической сушки ОГ до графена и наночастиц гидроксидов железа до оксидов железа, имеющих магнитные свойства [9].

Схематично процесс синтеза композиционного аэрогеля на основе ОГ, модифицированного наночастицами оксидов железа, представлен на рисунке 1.

Структуру и морфологию синтезированного композиционного материала оценивали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе «Merlin» (Carl Zeiss). Для идентификации наночастиц оксидов железа была использована просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), прибор JEM 2010 («JEOL») с приставкой для энергодисперсионного анализа. Кристаллическую структуру синтезированного композиционного аэрогеля и состав наночастиц оксидов железа оценивали методом малоуглового рентгеновского рассеяния (XRD) на дифрактометре D8 DISCOVER («Bruker»), анод Cu K $\alpha$ , при длине волны  $\lambda=1.54 \text{ \AA}$ . Для сравнения был также исследован аэрогель, полученный по методике, исключаяющей стадию модификации ОГ наночастицами железа. Величину удельной поверхности и объёма пор измеряли с помощью адсорбции/десорбции азота при 77K на приборе Autosorb-iQ («Quantachrome Instruments»). Для расчёта распределения пор по размерам использовали модель DFT, площадь удельной поверхности рассчитывали по методу БЭТ.

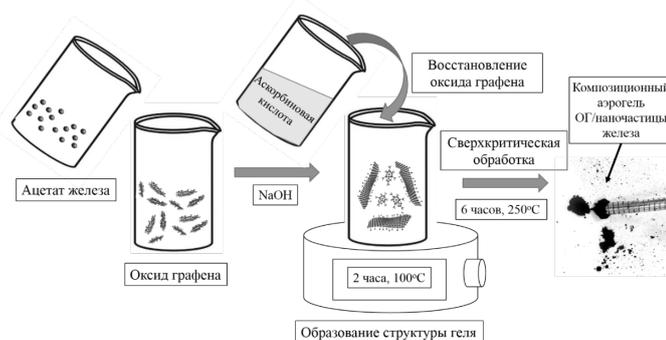


Рис. 1. Схема получения аэрогеля ОГ/Fe

Fig. 1. The scheme for the production of the GO/Fe aerogel

Сорбционные исследования проводили с использованием следующих растворов. Многокомпонентный стандартный раствор (pH=3). Состав раствора: Al, Ba, Be, Cd, Ce, Dy, Er, Eu, Gd, La, Mn, Nb, Sm, Sr, Th, V, Zr, Ca, K, Mg, Na, Cu, Ni, Co, U с концентрацией 0.1 мг/дм<sup>3</sup> по каждому элементу. Модельные растворы: природной поверхностной воды (pH=7.5): HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> – 156.8; Cl<sup>-</sup> – 4.6; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – 29.4; Ca<sup>2+</sup> – 42.1; Mg<sup>2+</sup> – 9.96; K<sup>+</sup> – 3.91; Na<sup>+</sup> – 6.44 мг/дм<sup>3</sup> и техногенно-загрязненной поверхностной воды (pH=8.0): NO<sub>3</sub><sup>-</sup> – 4400; Cl<sup>-</sup> – 32.2; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – 86.0; Ca<sup>2+</sup> – 8.5; Mg<sup>2+</sup> – 8.8; K<sup>+</sup> – 7.9; Na<sup>+</sup> – 1697 мг/дм<sup>3</sup>. В модельные растворы поверхностных вод были введены следующие элементы: Al, Ba, Ce, Eu, La, Mn, Sr, Th, V, Zr, U так, чтобы их концентрация в растворе составляла 0.1 мг/дм<sup>3</sup>. Для установления необходимой величины pH использовали раствор трис(гидроксиметил)аминометана (трис-буфер). Объем раствора для сорбции V=10 см<sup>3</sup>, m<sub>сорбента</sub> – 20 мг. Навеску сорбента контактировали с раствором при постоянном перемешивании

в течение 60 минут. После сорбции для отделения жидкой фазы от сорбента растворы центрифугировали в течение 20 минут при скорости 8000 об/мин. Степень извлечения компонентов из растворов рассчитывали по формуле:

$$R = \frac{C_{\text{нач}} - C_{\text{кон}}}{C_{\text{нач}}} \cdot 100\%$$

где C<sub>нач</sub> – начальная концентрация определяемого элемента в растворе, мг/дм<sup>3</sup>; C<sub>кон</sub> – концентрация элемента в растворе после сорбции, мг/дм<sup>3</sup>, R – степень извлечения. Определение содержания элементов проводили в растворах до и после сорбции с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС ИСП) на приборе X Series II (Thermo Fisher Scientific, США).

### Обсуждение результатов

Структура и морфология исходного ОГ и синтезированного композиционного аэрогеля (ОГ/Fe) были оценены методами СЭМ и ПЭМ (рисунок 2).

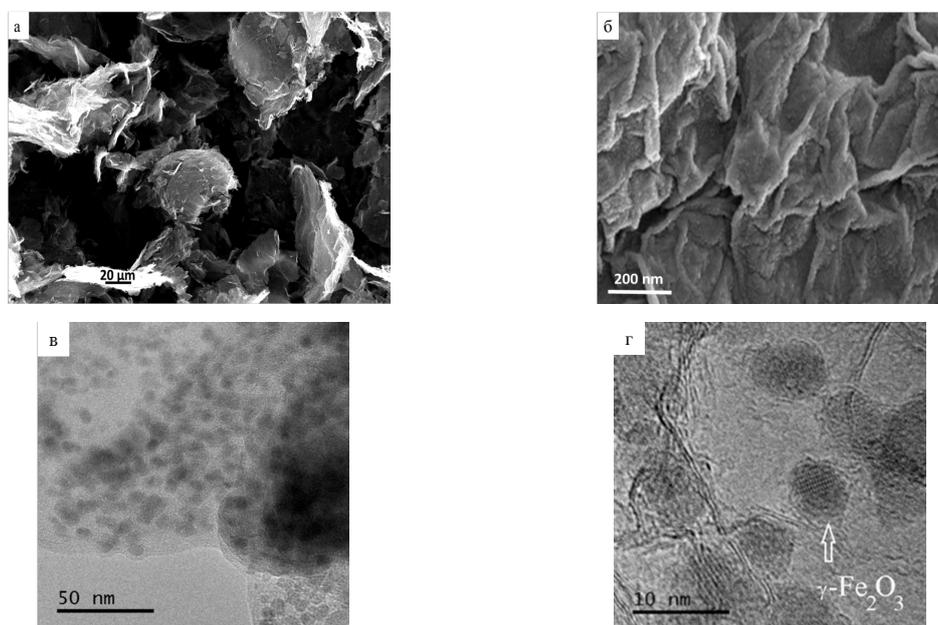


Рис.2. Микрофотографии исследуемых образцов аэрогелей: СЭМ-изображение исходной плёнки ОГ (а) и поверхности синтезированного аэрогеля ОГ/ Fe (б); ПЭМ-изображения поверхности аэрогеля ОГ/Fe и идентификация наночастиц железа в аэрогеле (в, г).

Fig. 2. Micrographs of the studied aerogel samples: SEM image of the initial GO film (a) and the surface of the synthesized GO/Fe aerogel (b); TEM images of the GO/Fe aerogel surface and the identification of iron nanoparticles in the aerogel (c, d).

На рисунке 1 (а) представлена микрофотография сухой плёнки ОГ. Наблюдается множество хаотично расположенных пластинок различного размера. Их структуры дефектны, плоскости графена искажены. Присутствуют локальные расслоения, графеновые слои дезориентированы, расстояние между ними различно. По анализу представленной микрофотографии можно предположить, что длина пластинок лежит в диапазоне 100-200 мкм. Возможно, это связано с тем, что в процессе сушки исходной дисперсии слои ОГ значительно агломерируют, образуя агрегаты больших размеров. На рисунке 1(в) отчётливо видно хаотично расположенные друг относительно друга наночастицы оксидов железа. При этом очевидно, что практически все частицы размером менее 50 нм. Частицы расположены равномерно в структуре материала. На рисунке 1(г) обнаруженные частицы идентифицированы как  $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Полученные микрофотографии соответствуют представлениям о формировании структуры композиционного аэрогеля ОГ/Fe. Следует отметить, что в процессе синтеза удаётся добиться относительно равномерного распределения наночастиц железа в структуре материала, идентифицированная кубическая гамма-фаза железа является ферромагнетиком.

Структура синтезированного материала была оценена методами рентгеновской дифракции и адсорбции-десорбции

азота. Результаты представлены на рисунке 3.

Рентгенограмма аэрогеля, не содержащего наночастиц оксидов железа, представлена двумя характеристическими пиками. В малоугловой области пик (002) при  $2\theta \sim 25^\circ$  соответствует структуре восстановленного ОГ. Пик (100) при  $2\theta \sim 43^\circ$  соответствует наличию недоокисленных слоёв ОГ, которые при восстановлении могут приводить к формированию структуры аморфного углерода [10]. В спектре аэрогеля ОГ/Fe (рисунок 3а) идентифицированы характеристические пики, подтверждающие присутствие железа в структуре материала в форме оксидов  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [11-13]. На рисунке 3 (б) представлено распределение пор по размерам для аэрогеля ОГ/Fe. Структура синтезированного композиционного материала преимущественно микропористая, значительный объём пор лежит в диапазоне от 1 до 5 нм (рисунок 3б). Суммарный объём пор достигает значений  $\sim 1\text{ см}^3/\text{г}$  (рисунок 3б). Величина удельной поверхности для аэрогеля ОГ/Fe составила  $670\text{ м}^2/\text{г}$ . Здесь также стоит отметить, что используемый метод определения удельной поверхности не учитывает наличие макропор, доля которых в синтезированном аэрогеле может быть значительна (рисунок 1, б).

Таким образом установлено, что в процессах синтеза удаётся частично восстановить структуру ОГ до графена, поверхность синтезированного аэрогеля ОГ/Fe

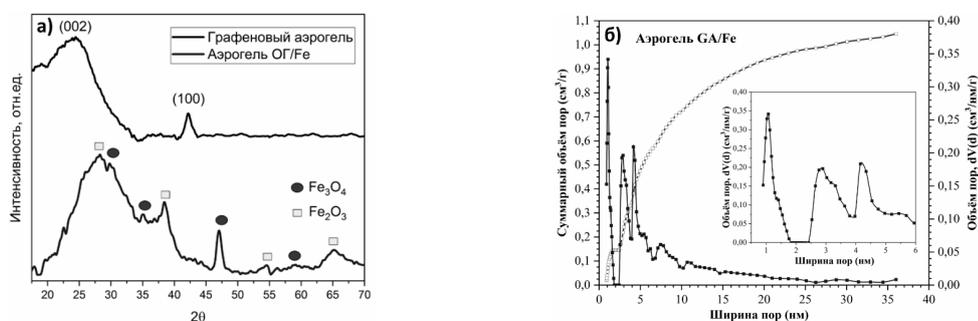


Рис. 3. Дифрактограммы синтезированных аэрогелей (а), распределение пор по размерам для аэрогеля ОГ/Fe (б)

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of synthesized aerogels (a), pore size distribution for the GO/Fe aerogel (b)

Таблица 1. Степень извлечения элементов аэрогелями на основе ОГ и ОГ/Fe  
 Table 1. The degree of extraction of elements by aerogels based on GO and GO/Fe

Элемент	Степень извлечения, %		Элемент	Степень извлечения, %	
	аэрогель ОГ	аэрогель ОГ/Fe		аэрогель ОГ	аэрогель ОГ/Fe
Ce	41	88	Ba	4	0*
Dy	43	77	Be	5	32
Er	41	72	Co	0*	7
Eu	46	85	Cu	88	69
Gd	43	83	Mg	0*	0*
La	32	88	Mn	0*	0*
Sm	49	87	Ni	0*	0*
Yb	42	83	Sr	0*	11
Th	95	97	V	83	99
U	89	96	Zr	98	96

\*данные элементы вымываются с сорбента во время сорбции

равномерно модифицирована наночастицами оксидов железа (размером 10-50 нм). Пористая структура представлена значительным количеством микро- и транспортных пор.

Сравнительные данные по степени извлечения ряда элементов исходным аэрогелем на основе ОГ и аэрогелем ОГ/Fe, синтезированными в представленной работе, отражены в таблице 1.

Анализ представленных в таблице данных позволяет сделать несколько выводов. Во-первых, полученный авторами композиционный аэрогель может эффективно сорбировать редкоземельные элементы из слабокислых растворов (суммарная степень извлечения более 80%). При этом для РЗЭ наблюдается эффект присутствия в материале оксида железа. Так, в среднем, сорбент с оксидом железа сорбирует на 40% больше РЗЭ, чем аналог без оксида железа. Высокая степень

извлечения (более 95%) также наблюдается для некоторых типов актинидов – урана и тория. Переходные и тяжелые металлы сорбируются с различной степенью эффективности, что скорее всего, определяется их индивидуальными свойствами, сродством к структуре сорбента и способностью к комплексообразованию с функциональными группами, при этом щелочноземельные элементы (Be, Mg, Ba) практически не извлекаются.

Аэрогель ОГ/Fe был также дополнительно апробирован в качестве сорбента на модельных растворах природных вод: природной поверхностной воды (pH=7.5), характеризующейся высоким содержанием гидрокарбонатов и техногенно-загрязненной воды (pH=8.0), в которой присутствуют макроколичества нитратов. Данные по степени извлечения элементов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Степень извлечения элементов из природных поверхностных вод аэрогелем ОГ/Fe

Table 2. Degree of extraction of elements from natural surface waters by the GO/Fe aerogel

Модельный раствор	Степень извлечения, %
Природная поверхностная вода (pH=7.5)	Ce, La, Eu, Th, U, Ba, Zr, Cu, V, Al – 95-100; Mn – 45; Ni – 51; Co – 78; Sr – 62
Техногенно-загрязненная вода (pH=8.0)	Ce, La, Eu, Th, U, V, Zr – 100; Cu – 93; Co – 89; Mn – 53; Ni – 75; Al – 58; Ba – 60; Sr – 24



Полученные данные показали, что аэрогель ОГ/Fe характеризуется высокой эффективностью извлечения РЗЭ, урана и тория в водных растворах, содержащих макроколичества солей, и может быть использован для извлечения радиоактивных и токсичных элементов из природных поверхностных вод.

### Заключение

Авторами работы предложена легко реализуемая и экологически чистая методика синтеза композиционного аэрогеля на основе ОГ, модифицированного наночастицами оксидов железа. Использование сушки в сверхкритическом изопропиловом спирте позволяет получать аэрогель с высокой удельной поверхностью ( $670 \text{ м}^2/\text{г}$ ). В структуре композиционного материала идентифицированы наночастицы оксидов железа (преимуществен-

ным размером до 50 нм). Кристаллическая структура наночастиц оценена методами просвечивающей микроскопии и рентгенофазового анализа. Показано, что наночастицы железа присутствует в форме оксидов  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Методами сорбции из растворов сложного состава показано, что синтезированный аэрогель ОГ/Fe может быть эффективно использован для селективного извлечения редкоземельных металлов и актинидов из слабокислых растворов, а также из растворов природных поверхностных вод.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

### Список литературы/References

1. Zamora-Ledezma C., Negrete-Bolagay D., Figueroa F., Zamora-Ledezma E., Ni M., Alexis F., Guerrero V.H. Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environmental Technology & Innovation*. 2021; 22: 101504. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101504>
2. Bolisetty S., Peydayesh M., Mezzenga R. Sustainable technologies for water purification from heavy metals: review and analysis. *Chemical Society Reviews*. 2019; 48: 463-487. <https://doi.org/10.1039/C8CS00493E>
3. Neskromnaya E.A., Khamizov R.K., Melezhyk A.V., Memetova A.E., Mkrtychan E.S., Babkin A.V. Adsorption of lead ions ( $\text{Pb}^{2+}$ ) from wastewater using effective nanocomposite GO/CMC/FeNPs: Kinetic, isotherm, and desorption studies. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022; 655: 130224. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130224>
4. Ali I., Neskromnaya E.A., Melezhyk A.V. et al. Magnetically active nanocomposite aerogels: preparation, characterization

and application for water treatment. *J Porous Mater*. 2022; 29: 545-557. <https://doi.org/10.1007/s10934-021-01175-0>

5. Liu X., Ma R., Wang X., Ma Ya., Yang Yo., Zhuang L., Zhang S., Jehan R., Chen J., Wang X. Graphene oxide-based materials for efficient removal of heavy metal ions from aqueous solution: A review. *Environmental Pollution*. 2019; 252(A): 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.050>

6. Zhan W., Gao L., Fu X., Siyal S.H., Sui G., Yang X. Green synthesis of amino-functionalized carbon nanotube-graphene hybrid aerogels for high performance heavy metal ions removal. *Applied Surface Science*. 2019; 467-46: 1122-1133. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.10.248>

7. Memetova A.E., Neskromnaya E.A., Zelenin A.D., Babkin A.V., Memetov N.R., Gerasimova A.V. Methane adsorption on graphene aerogel. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2022. 22(1): 41-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9019>

8. Quan L.D., Dang N.H., Tu T.H., Linh V.N.Ph., Thy Lu Thi Mong, Nam H.M.,



Phong M.T., Hieu N.H. Preparation of magnetic iron oxide/graphene aerogel nanocomposites for removal of bisphenol A from water. *Synthetic Metals*. 2019; 255: 116106. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2019.116106>

9. Neskornaya E.A., Burakov A.E., Melezhik A.V. et al. Synthesis and Evaluation of Adsorption Properties of Reduced Graphene Oxide Hydro- and Aerogels Modified by Iron Oxide Nanoparticles. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2020; 11: 467-475. <https://doi.org/10.1134/S2075113320020264>

10. Trinh Thi T.Phuong Nguyet Xuan, Quang D.T., Tu, T.H. Nguyen Minh Dat, Linh Vu Ngoc Phuong, Cuong Le Van, Nghia Le Tran Trung, Loan Tran Thi, Hang Pham Thuy, Phuong Nguyen Thi Lien, Phong Mai Thanh, Nam Hoang Minh, Hieu Nguyen Huu Fabrication, characterization, and adsorption capacity for cadmium ions of graphene aerogels. *Synthetic Metals*. 2019; 247: 116-123. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2018.11.020>

11. Huang Z.G., Guo Z.P., Calka A., Wexler D., Lukey C., Liu H.K. Effects of iron oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) on hydrogen storage properties of Mg-based composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006; 422(1-2); 299-304. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.11.074>

12. Jeyavenkatesh M., Arunodaya J., Sahoo T. One Pot Polyol Synthesis of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{Fe}_3\text{O}_4$  Nano Composites and Their Structural, Optical, Property Studies. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2022; 1219(1): 012043.

13. Prawit Nuengmatcha, Paweena Porrawatkul, Saksit Chanthai, Phitchan Sricharoen, Nunticha Limchoowong. Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue using  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ /graphene/ $\text{CuO}$  nanocomposites under visible light. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019; 7(6): 103438. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103438>

### Информация об авторах / Information about the authors

**А.В. Бабкин** – к.т.н., с.н.с., Тамбовский государственный технический университет, н.с. МГУ имени М.В. Ломоносова, Химический факультет, Тамбов, Россия, ORCID: 0000-0001-9786-1998

**Е.А. Захарченко** – к.х.н., с.н.с. Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

**Е.А. Нескоромная** – к.т.н., с.н.с. Тамбовский государственный технический университет, с.н.с. Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Тамбов, Россия

**М.А. Рыженкова** – студентка ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

**A.V. Babkin** – Ph.D., Senior Researcher, Tambov State Technical University, Researcher, Lomonosov Moscow State University, Department of Chemistry. Tambov, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-9786-1998, e-mail: [A.V.Babkin93@yandex.ru](mailto:A.V.Babkin93@yandex.ru)

**E.A. Zakharchenko** – Ph.D., Senior Researcher, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Kosygina street 19, 119991 Moscow, Russian Federation, e-mail: [Elena.zakharchenko@gmail.com](mailto:Elena.zakharchenko@gmail.com)

**E.A. Neskornaya** – Ph.D., Senior Researcher, Tambov State Technical University, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Kosygina street 19, 119991 Moscow, Russian Federation, e-mail: [Lenok.n1992@mail.ru](mailto:Lenok.n1992@mail.ru)

**M.A. Ryzhenkova** – student, Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation, e-mail: [flivay.mr@gmail.com](mailto:flivay.mr@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 13.09.2022; одобрена после рецензирования 23.11.2022; принята к публикации 05.12.2022.

The article was submitted 13.09.2022; approved after reviewing 23.11.2022; accepted for publication 05.12.2022.