

Научная статья

УДК 620.179

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-168-182

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ АДсорбЦИИ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ФИЛЬТРАХ МЕТОДОМ ЭНЕРГОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Д.А. Шашурин<sup>1</sup>, Д.В. Сидоров<sup>2</sup>, Е.В. Сулова<sup>1</sup>, Н.А. Мартынова<sup>1</sup>, Г.А. Шелков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия; info@rector.msu.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Продемонстрирован потенциал использования метода энергочувствительной компьютерной томографии для исследования сорбции тяжелых элементов в сорбентах и макетах фильтрующих систем. По результатам проведенных экспериментальных исследований установлена возможность одновременной визуализации и идентификации в фильтрующей системе нескольких химических элементов. Предлагаемый метод относится к неразрушающим методам контроля, его можно использовать в области защиты окружающей среды от выбросов, содержащих тяжелые элементы.

**Ключевые слова:** гадолиний, йод, адсорбция, неразрушающая визуализация, энергочувствительная компьютерная томография, фильтр

**Для цитирования:** Шашурин Д.А., Сидоров Д.В., Сулова Е.В., Мартынова Н.А., Шелков Г.А. Визуализация адсорбции тяжелых элементов в промышленных фильтрах методом энергочувствительной компьютерной томографии // Труды ВИАМ. 2026. № 4 (158). С. 168–182. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-168-182.

Scientific article

## VISUALIZATION OF ADSORPTION OF HEAVY ELEMENTS IN INDUSTRIAL FILTERS BY ENERGY-SENSITIVE COMPUTED TOMOGRAPHY

D.A. Shashurin<sup>1</sup>, D.V. Sidorov<sup>2</sup>, E.V. Suslova<sup>1</sup>, N.A. Martynova<sup>1</sup>, G.A. Chelkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; info@rector.msu.ru

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** This study demonstrates the potential of energy-sensitive computed tomography for studying the sorption of heavy elements in sorbents and filter system models. The experimental results demonstrated the feasibility of simultaneously visualizing and identifying multiple chemical elements in a filter system. The proposed method is a non-destructive testing method and can be used to protect the environment from emissions containing heavy elements.

**Keywords:** gadolinium, iodine, adsorption, non-destructive imaging, energy-sensitive computed tomography, filter

**For citation:** Shashurin D.A., Sidorov D.V., Suslova E.V., Martynova N.A., Chelkov G.A. Visualization of adsorption of heavy elements in industrial filters by energy-sensitive computed tomography. *Trudy VIAM*, 2026, no. 4 (158), pp. 168–182. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-168-182.

## Введение

Контроль сорбционной емкости и оценка степени загрязнения фильтрующих систем имеют особое значение для самых разных технологических задач, включающих защиту окружающей среды от вредных выбросов промышленных производств [1], и для технологических процессов, в ходе которых необходимо обеспечить очистку целевого продукта от нежелательных примесей [2]. Как правило, для оценки степени загрязнения фильтрующих систем используются разрушающие процедуры, предполагающие получение образцов сорбента и их последующее физико-химическое исследование с помощью гравиметрии, микроскопии и различных методов элементного анализа [3]. Такой подход позволяет получить достаточно точные данные о состоянии фильтра, однако имеет существенные ограничения. Применение разрушающих процедур может быть нецелесообразно для оценки состояния сложных или дорогостоящих систем. Кроме того, разрушающие процедуры неэффективны при изучении динамических процессов.

Обойти эти ограничения можно с помощью неразрушающих методов исследования, например различных видов компьютерной томографии. Так, рентгеновская компьютерная томография позволяет оценивать структуру фильтрующих элементов и плотность сорбентов [4–6], а также визуализировать и исследовать процессы сорбции [7]. Магнитно-резонансная томография позволяет также визуализировать и оценивать некоторые физические процессы, происходящие внутри фильтрующих систем, например накопление воды [8]. Тем не менее эти методы практически не позволяют исследовать такие сложные химические изменения, как накопление различных видов загрязнителей при их одновременном присутствии в фильтруемой среде [9].

Возможным способом решения таких задач может быть использование современных видов компьютерной томографии, в том числе энергочувствительной (ЭКТ), или с подсчетом фотонов. В основе ЭКТ лежит использование гибридных полупроводниковых пиксельных детекторов с прямым преобразованием рентгеновского излучения, регистрирующих отдельные рентгеновские фотоны с определением их энергии относительно одного или нескольких пороговых значений [10]. Это позволяет не только определять интегральный коэффициент ослабления рентгеновского излучения исследуемых структур, но и регистрировать спектры поглощения входящих в их состав элементов, оценивать энергии  $K$ -края поглощения и ассоциировать каждый воксель пространства с определенным химическим составом. Современные энергочувствительные детекторы, например детекторы семейств TimePix и MediPix, имеют нижний порог определения энергии фотонов 7 кэВ, геометрическое разрешение до 50 мкм, энергетическое разрешение  $<10\%$  и позволяют одновременно использовать до восьми энергетических порогов. Это дает возможность различать материалы, состоящие из элементов с порядковым номером  $Z > 28$ , энергии  $K$ -края которых отличаются на 3–5 кэВ [11]. Метод ЭКТ активно используется в биомедицинских исследованиях и внедряется в клиническую практику [12], а также находит применение для решения задач материаловедения и других смежных областей.

Цель данной работы – оценка возможности использования метода ЭКТ для неразрушающей визуализации, а также качественной и количественной оценки адсорбции тяжелых элементов в фильтрующих системах. В качестве адсорбентов апробированы различные виды наноматериалов на основе углерода: активированный уголь (АУ), малослойные графеновые фрагменты (МГФ), азот- (N-МГФ) и фосфордопированные МГФ (P-МГФ), углеродные нанотрубки (УНТ), а также аморфный  $\text{SiO}_2$ . В качестве сорбируемых элементов использовали растворы  $\text{Gd}^{3+}$ , а также неионный контрастный агент на основе йода (йогексол) для компьютерной томографии.

### Материалы и методы

Адсорбенты МГФ, N-МГФ и P-МГФ синтезировали пиролитическим разложением гексана (99,8 %), ацетонитрила (ос. ч.) или 2 % (по массе) раствора  $PPh_3$  (ч.) в толуоле при температуре  $\geq 900$  °С в присутствии темплата MgO [13, 14]. Путем пиролиза гексана в присутствии катализатора роста Co–Mo/MgO синтезировали УНТ [15]. Образовавшийся MgO удаляли кипячением полученных продуктов в HCl в течение 6 ч с последующей промывкой дистиллированной водой до нейтрального значения pH промывных вод. Полученные образцы МГФ, N-МГФ, P-МГФ и УНТ сушили при температуре  $\geq 110$  °С в течение 24 ч. Образцы МГФ, N-МГФ и УНТ окисляли раствором  $HNO_3$  с целью создания поверхностных кислородсодержащих функциональных групп. Для этого к навескам (1 г) МГФ, N-МГФ и УНТ прибавляли 100 мл 69%-ной  $HNO_3$ , кипятили с обратным холодильником 1,5–2 ч, фильтровали, промывали водой и сушили при температуре  $\geq 110$  °С в течение 12 ч.

Аморфный  $SiO_2$  обычно получают гидролитическим разложением тетраэтоксисилана [16], однако зола рисовой шелухи (ЗРШ) является более экономически целесообразным источником. В представленном исследовании АУ и аморфный  $SiO_2$  выделяли из ЗРШ [17], полученной при сжигании рисовой шелухи.

Для удаления пыли ЗРШ промывали водой, после чего добавляли 6 М водный раствор КОН в массовом соотношении ЗРШ:КОН = 1:1 и кипятили с обратным холодильником в течение 8–12 ч. Полученная реакционная смесь представляла собой черный углеродсодержащий осадок и раствор  $Na_2SiO_3$ . Осадок фильтровали, промывали водой, прибавляли NaOH в массовом соотношении С:NaOH = 1:3 и отжигали в токе Ar при температуре  $\geq 700$  °С в течение 2 ч. Полученный АУ охлаждали, промывали водой, соляной кислотой и снова водой до нейтрального значения pH промывных вод.

К раствору  $Na_2SiO_3$  прибавляли HCl при комнатной температуре, в результате чего мгновенно образовывался белый золь кремниевой кислоты, который кипятили с обратным холодильником в течение 24 ч, фильтровали, многократно промывали водой и сушили при температуре  $\geq 110$  °С в течение 24 ч с последующим отжигом при температуре  $\geq 450$  °С в течение 4 ч.

### *Физико-химические методы исследования адсорбентов*

Морфологию и строение частиц исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии с ускоряющим напряжением 200 кэВ.

Химический состав поверхности адсорбентов исследовали методом рентгеновской фотоэлектронной микроскопии с монохроматическим Al  $K_{\alpha}$ -излучением (1486,7 эВ).

Значение удельной площади поверхности полученных адсорбентов определяли методом низкотемпературной адсорбции азота при 77 К. Распределение пор по размерам рассчитывали с использованием модели ВЖН (Barret–Joyner–Halenda) [18]. Пробоподготовка представляла собой предварительную дегазацию образцов при температуре  $\geq 300$  °С в течение 4 ч и пониженном давлении.

### *Томографические исследования*

Томографические исследования проводили на энергочувствительном компьютерном томографе, оснащенном детекторами MediPix 3RX с сенсорами CdZnTe толщиной 1 мм. Сканирование объектов, содержащих только Gd, выполняли с напряжением трубки 80 кВ, током 25–40 мкА, временем экспозиции 100 мс и энергетическими порогами 25, 35, 48 и 60 кэВ. Сканирование объектов, содержащих Gd и I, выполняли с энергетическими порогами 15, 30, 48 и 60 кэВ. Шаг проекций составил 0,5 градуса

(720 проекций на полный оборот системы). Томографические реконструкции проводили с размером вокселя 60 мкм отдельно для энергетических окон 7–15, 25–35, 35–48, 48–60 и >60 кэВ для Gd и 7–15, 15–30, 30–48, 48–60 и >60 кэВ для Gd/I. Для визуализации и анализа реконструкций использовали программное обеспечение.

### *Качественный и количественный анализ содержания материалов*

Основным методом идентификации и оценки содержания материалов при проведении исследований методом ЭКТ является сравнение спектра поглощения отдельных вокселей томографической реконструкции со спектрами поглощения известных референсных материалов. Использование референсных материалов необходимо из-за ограниченного энергетического разрешения  $\Delta E/E$  детекторов ( $\Delta E/E \approx 7\%$  для детектора MediPix 3RX) и ограниченного количества энергетических порогов. Это приводит к выраженным различиям между спектрами, регистрируемыми в эксперименте и рассчитанными теоретически или зарегистрированными с помощью методов двухмерной спектроскопии [19].

Использование референсных материалов также необходимо для идентификации материалов, содержащих более одного химического элемента с высоким коэффициентом ослабления рентгеновского излучения. В частности, в предыдущих работах с Gd-содержащими структурами показано, что их включение в состав матрицы на основе углерода не приводит к значимым изменениям коэффициентов ослабления в энергетическом окне 48–56 (60) кэВ, соответствующем энергии *K*-края поглощения Gd 50,2 кэВ, поэтому для их распознавания достаточно использования референсных водных растворов солей  $Gd^{3+}$  [20]. При этом спектр поглощения структур с кремнийсодержащими матрицами имел значимые отличия от спектра поглощения  $Gd^{3+}$ , а идентификация таких материалов требовала использования отдельных референсных образцов [21].

В данной работе для распознавания  $Gd^{3+}$  приготовлена серия калибровочных водных растворов  $Gd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$  (China Northern Rare Earth Group High-Tech Co Ltd, Китай) с концентрацией ионов  $Gd^{3+}$  1,25; 2,5; 3,75; 5; 7,5 и 10 г/л, а также серия образцов аморфного  $SiO_2$ , пропитанного водными растворами  $Gd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$  с теми же концентрациями  $Gd^{3+}$ . Растворы  $Gd^{3+}$  в микропробирках Эппендорфа объемом 0,2 мл, а также образцы дистиллированной воды и липидов помещали в плексигласовый фантом. Сканирование осуществляли с теми же параметрами источника рентгеновского излучения, детектора и реконструкции, которые предполагали использовать для работы непосредственно с исследуемыми образцами. Поперечные срезы томографической реконструкции размечали согласно расположению образцов в фантоме (рис. 1, *а*), после чего с помощью встроенного программного обеспечения томографа для каждого образца и материала рассчитывали соотношение коэффициентов ослабления рентгеновского излучения между энергетическими окнами. Точность калибровки проверяли, используя полученные калибровочные профили для обратного распознавания и количественного анализа материалов фантома (рис. 1, *б*, *в*).

Для построения калибровочных прямых с целью распознавания Gd и I в адсорбентах приготовлены водные растворы  $Gd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$  с концентрацией ионов  $Gd^{3+}$  5, 10 и 40 г/л, а также водные растворы йогексола (Омнипак<sup>®</sup>, GE Healthcare, Норвегия) с содержанием йода 10, 21 и 43 г/л. При совместном сканировании количественный анализ содержания Gd и I в образцах не проводили.

Результаты количественного анализа содержания  $Gd^{3+}$  в калибровочных и основных экспериментах представлены без указания уровня погрешности вследствие ограничений возможностей программного пакета, не позволяющего исключать из анализа концентраций воксели с нулевыми концентрациями распознаваемого материала.

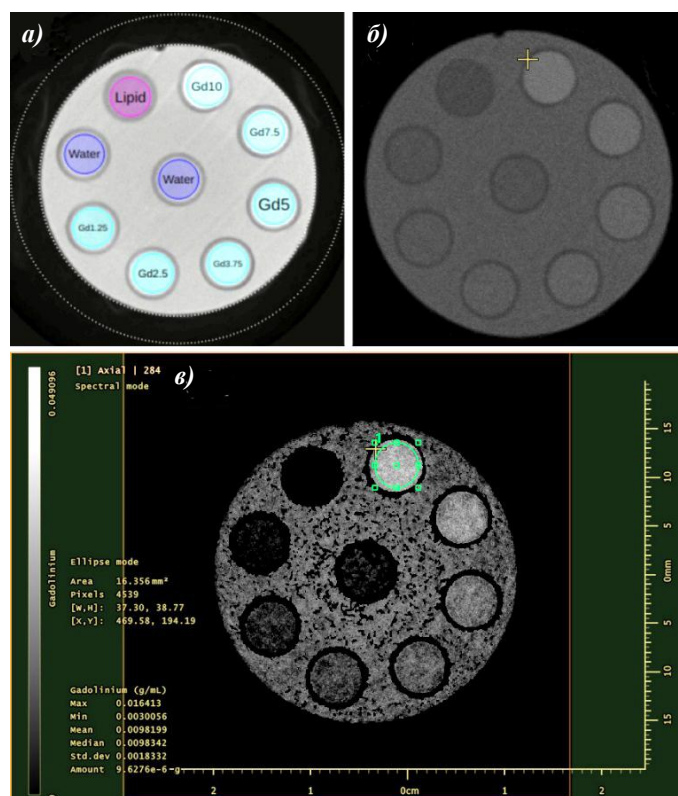


Рис. 1. Распознавание  $Gd^{3+}$  по референсным образцам водных растворов  $Gd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ : *a* – схема калибровочного фантома (цифра в названии ячейки соответствует концентрации  $Gd^{3+}$  в мг/мл); *б* – реконструкция (поперечный срез) фантома в энергетическом окне 48–60 кэВ; *в* – реконструкция (поперечный срез) фантома с распознаванием и количественным определением  $Gd^{3+}$

### *Исследование адсорбционных свойств адсорбентов методом энергочувствительной компьютерной томографии*

Исследование адсорбционных свойств сорбентов методом ЭКТ проводили для АУ и аморфного  $SiO_2$ . К 0,10 г сорбента прибавляли 25 мл раствора  $Gd^{3+}$  с концентрацией 10 г/л, выдерживали, перемешивая, при комнатной температуре в течение 24 ч, после чего осадок отделяли от раствора центрифугированием при скорости  $6000 \text{ мин}^{-1}$  в течение 10 мин. Раствор декантировали. Навески осадков и образцы растворов после адсорбции помещали в микропробирки Эппендорфа и исследовали с помощью ЭКТ для определения концентрации  $Gd^{3+}$  и построения изотерм адсорбции для каждого из адсорбентов.

### *Визуализация гадолиния и йода на различных сорбентах в макетах фильтрующих систем*

Визуализацию адсорбции гадолиния и йода на различных сорбентах ( $SiO_2$ , МГФ, N-МГФ, P-МГФ, окисленные N-МГФ и МГФ, УНТ, АУ) осуществляли следующим образом. К навескам (0,10 г) сорбента прибавляли 25 мл водного раствора йогексола с концентрацией йода 20 г/л или  $Gd^{3+}$  с концентрацией 2 г/л, перемешивали при комнатной температуре в течение 24 ч, осадки центрифугировали при скорости  $6000 \text{ мин}^{-1}$  в течение 10 мин. Раствор декантировали, а осадки помещали в микропробирки Эппендорфа или пластиковые трубки и исследовали с помощью ЭКТ. Для оценки возможности визуализации адсорбции в фильтрующих системах без их разрушения в ряде экспериментов микропробирки с сорбентами помещали в цилиндр из алюминиевого сплава, имитирующего внешний корпус фильтра.

### Результаты и обсуждение

Полученные МГФ представляли собой углеродные стопки, содержащие 7–10 углеродных слоев (рис. 2, *a*); УНТ – углеродные цилиндры, вложенные друг в друга (рис. 2, *б*); аморфный SiO<sub>2</sub> – наносферы диаметром 100–200 нм (рис. 2, *в*).

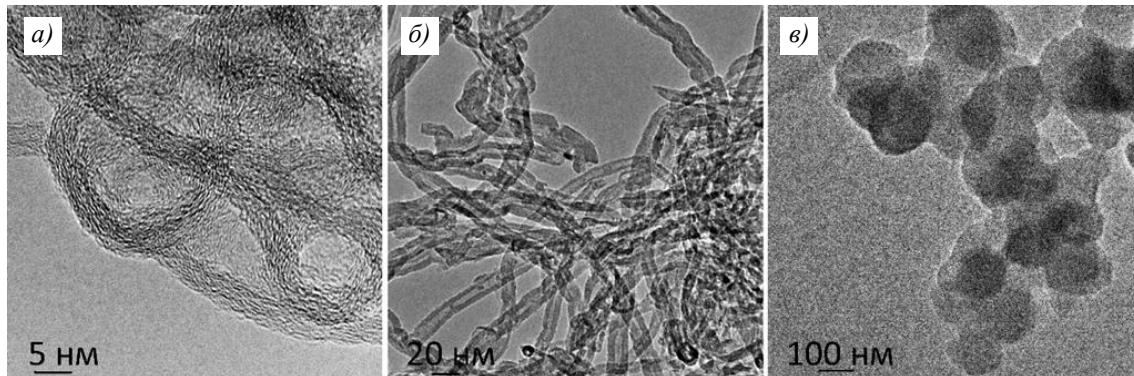


Рис. 2. Изображения, полученные с использованием просвечивающей электронной микроскопии, основных типов адсорбентов: *a* – малослойные графеновые фрагменты; *б* – углеродные нанотрубки; *в* – аморфный SiO<sub>2</sub>

Состав поверхности углеродных наноматериалов исследован методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Полученные данные представлены в таблице. Окисленные адсорбенты (МГФ, N-МГФ и УНТ) и АУ содержали кислород в различных формах, соответствующих ионам O<sup>2-</sup>, кетогруппам C=O, гидроксильным C–ОН- и карбоксильным COOH-группам, согласно O1s РФЭС-спектрам высокого разрешения [22, 23].

#### Результаты исследования углеродных наноматериалов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии

Адсорбент	Содержание элементов, % (атомн.)			Текстурные характеристики		
	C	O	N*	S <sub>БЭТ</sub> , м <sup>2</sup> /г	V, см <sup>3</sup> /г	R, нм
Окисленные МГФ	98,1	1,9	0	440	1,89	0,88
Окисленные N-МГФ	73,8	20,5	5,7	400	2,40	–
P-МГФ	98,5	1,5	<0,1	390	1,00	3,46
Окисленные углеродные нанотрубки	92,5	6,7	0,8	130	0,40	1,50
Активированный уголь	93,2	6,2	0,6	298	0,40	1,84
Аморфный SiO <sub>2</sub>	–	–	–	190	0,40	2,12

\* Для P-МГФ значение соответствует содержанию фосфора.

Примечание. МГФ – малослойные графеновые фрагменты; S<sub>БЭТ</sub> – удельная площадь поверхности; V – удельный общий объем пор; R – средний радиус пор.

Изотермы адсорбции-десорбции азота адсорбентов, полученные при 77 К, изображены на рис. 3. Согласно классификации IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) [18], изотермы можно отнести к II (окисленные УНТ и аморфный SiO<sub>2</sub>) и IV (АУ и окисленные МГФ) типам (рис. 3, *a*, *в*, *д*, *ж*). В окисленных УНТ и аморфном SiO<sub>2</sub> обнаружены преимущественно макропоры, в АУ и окисленных МГФ – мезопоры. Распределение пор по размерам (рис. 3, *б*, *г*, *е*, *з*), их объем и средний радиус рассчитаны с помощью модели ВЈН [18].

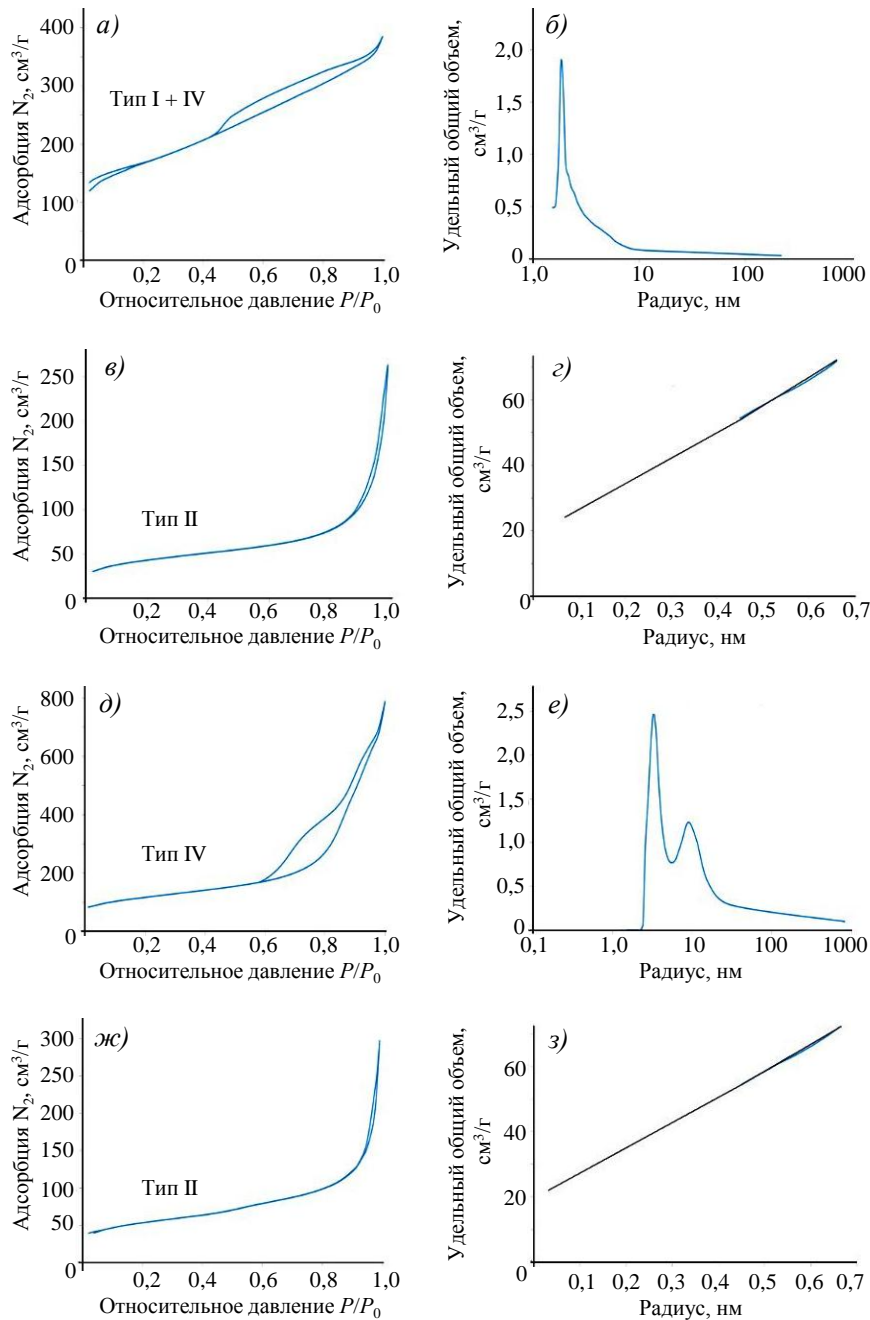


Рис. 3. Изотермы адсорбции (а, в, д, ж) и распределение пор по размерам (б, г, е, з) активированного угля (а, б), окисленных углеродных нанотрубок (в, г), окисленных малослойных графеновых фрагментов (д, е) и аморфного SiO<sub>2</sub> (ж, з)

Построение калибровочных прямых для количественного анализа содержания Gd<sup>3+</sup> представлено далее. Для водных растворов Gd<sup>3+</sup>, использованных в качестве референсных для визуализации и количественного анализа Gd<sup>3+</sup> на углеродных сорбентах, получена прямая зависимость с коэффициентом детерминации  $R^2 > 0,99$  и ошибкой измерений в пределах 6 % (рис. 4).

При использовании зависимости, полученной для водных растворов Gd(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O, для определения концентрации Gd<sup>3+</sup> в калибровочных образцах SiO<sub>2</sub>, пропитанных раствором Gd(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O, изначально получен неудовлетворительный результат со значительным занижением рассчитанных экспериментальных концентраций

(рис. 5, оранжевая прямая). Это обусловлено низкой энергией  $K$ -края поглощения Si (1,84 кэВ) и относительно высоким коэффициентом ослабления рентгеновского излучения  $\text{SiO}_2$  во всех энергетических окнах, использованных при сканировании.

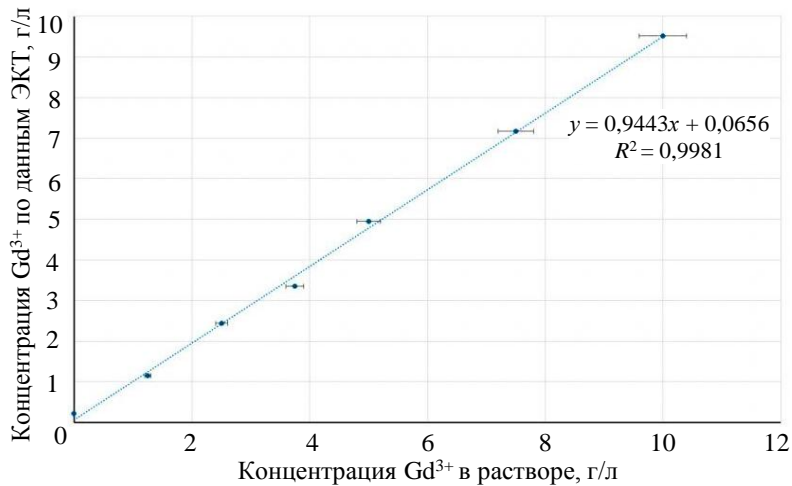


Рис. 4. Соотношение исходных и измеренных методом энергочувствительной компьютерной томографии (ЭКТ) с распознаванием концентраций  $\text{Gd}^{3+}$  в калибровочных растворах  $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Обратное применение к образцам  $\text{SiO}_2$ , пропитанным раствором  $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , построенных по ним калибровочных профилей позволило улучшить точность калибровки, однако привело к завышению экспериментальных значений концентраций  $\text{Gd}^{3+}$  на  $\sim 1,7$  г/л относительно исходных (рис. 5, зеленая прямая). Эта ошибка является следствием особенностей использованного в программном пакете алгоритма расчета концентраций, где нулевой концентрации материала соответствует значение коэффициента ослабления рентгеновского излучения воды. В случае  $\text{SiO}_2$ , пропитанного раствором  $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , все образцы, включая образец с нулевой концентрацией  $\text{Gd}^{3+}$ , содержат  $\text{SiO}_2$ , коэффициент ослабления которого выше, чем у воды (рис. 5, синяя прямая). В связи с этим необходимо использовать дополнительный поправочный коэффициент.

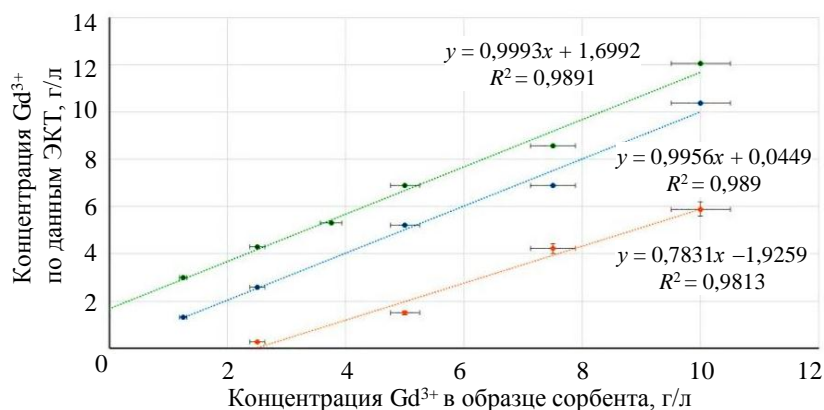


Рис. 5. Соотношение исходных и экспериментальных (измеренных методом энергочувствительной компьютерной томографии (ЭКТ) с распознаванием материалов) концентраций  $\text{Gd}^{3+}$  в калибровочных образцах  $\text{SiO}_2$ , пропитанных водным раствором  $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , при калибровке по  $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (●) и по  $\text{SiO}_2$ , пропитанному  $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  с заданной концентрацией  $\text{Gd}^{3+}$ , с учетом поправочного коэффициента (●) и без поправки (●)

Проведенный анализ адсорбционной емкости аморфного  $\text{SiO}_2$  и АУ относительно ионов  $\text{Gd}^{3+}$ , по данным ЭКТ, подтвердил возможность применения этого метода для количественных исследований. Полученные изотермы адсорбции (рис. 6 и 7) показали, что адсорбционные емкости на поверхности аморфного  $\text{SiO}_2$  и АУ сопоставимы, несмотря на то, что в других работах не достигнуты максимальные значения, составляющие 24–32 [24, 25] и 100–140 мг/г соответственно [26, 27].

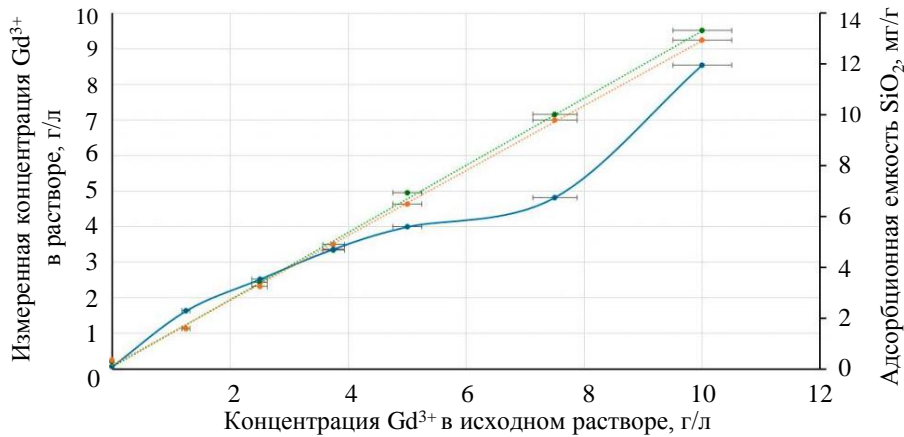


Рис. 6. Концентрация  $\text{Gd}^{3+}$  в растворах исходном (●) и после сорбции на аморфном  $\text{SiO}_2$  (●) и изотерма адсорбции ионов  $\text{Gd}^{3+}$  (—●—), определенные методом энергочувствительной компьютерной томографии

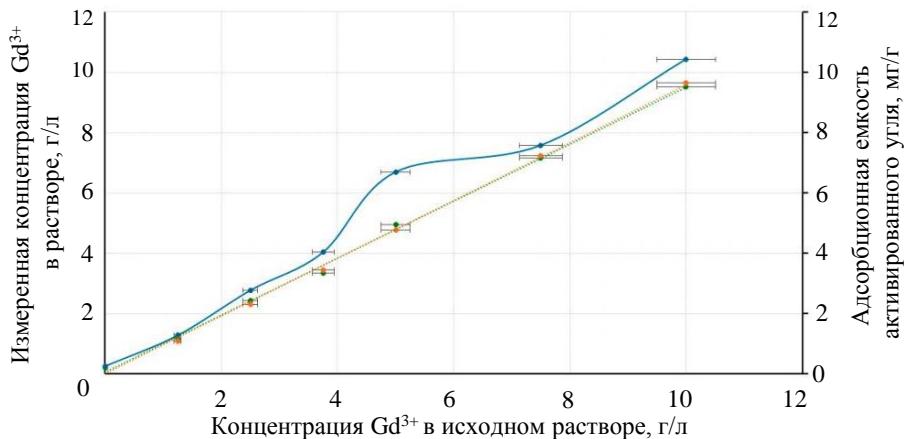


Рис. 7. Концентрация  $\text{Gd}^{3+}$  в растворах исходном (●) и после сорбции  $\text{Gd}^{3+}$  на активированном угле (●) и изотерма адсорбции ионов  $\text{Gd}^{3+}$  (—●—), определенные методом энергочувствительной компьютерной томографии

Адсорбцию ионов  $\text{Gd}^{3+}$  визуализировали в образцах аморфного  $\text{SiO}_2$ , МГФ, N-МГФ и P-МГФ, а также окисленных МГФ и N-МГФ (рис. 8). Ионы  $\text{Gd}^{3+}$  и вода сорбировались на поверхности P-МГФ. Наблюдали равномерную по всему объему образца сорбцию воды, тогда как сорбция  $\text{Gd}^{3+}$  происходила преимущественно в нескольких центрах диаметром до 2 мм, концентрация  $\text{Gd}^{3+}$  в которых достигала 34 мг/мл. Согласно данным физико-химических исследований, для P-МГФ отмечено максимальное содержание углерода (см. таблицу), а также самый большой размер пор, что, по-видимому, объясняет их способность сорбировать раствор с ионами  $\text{Gd}^{3+}$  в большей степени по сравнению с другими исследованными адсорбентами.

Незначительная сорбция  $Gd^{3+}$  и воды также выявлена в образце аморфного  $SiO_2$ . Сорбция  $Gd^{3+}$  в  $SiO_2$  также происходила в ограниченном количестве центров, а вода обнаружена преимущественно на поверхности сорбента. Последний результат требует верификации другими методами, так как коэффициент ослабления воды меньше, чем у аморфного  $SiO_2$ , что может приводить к ложноотрицательному результату ее визуализации по толщине образца. В остальных сорбентах значимого накопления  $Gd^{3+}$  и воды не отмечено.

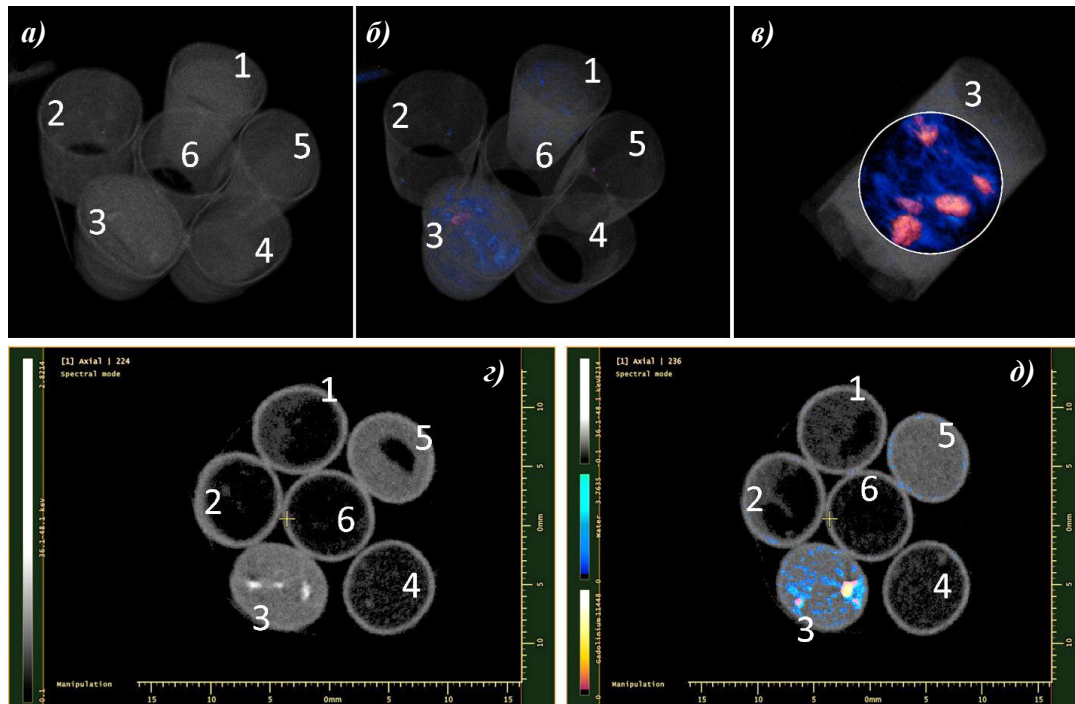


Рис. 8. Реконструкции с использованием энергочувствительной компьютерной томографии образцов сорбентов после сорбции на них ионов  $Gd^{3+}$  из растворов  $SiO_2$  (1), N-МГФ (2), P-МГФ (3), окисленных N-МГФ (4), МГФ (5), окисленных МГФ (6): 3D-визуализация (а, б) и поперечный срез (с, д) без распознавания материалов (а, с) и с распознаванием (б, д) гадолиния (фиолетово-желтая шкала) и воды (сине-голубая шкала); визуализация центров сорбции  $Gd^{3+}$  в образце P-МГФ (е). МГФ – малослойные графеновые фрагменты

Исследования по одновременной визуализации адсорбции химических элементов с различными значениями энергии  $K$ -края поглощения и визуализации внутренних структур подтвердили возможность использования ЭКТ для решения подобных задач. На рис. 9 представлена визуализация сорбции  $Gd^{3+}$  и йогексола на поверхности АУ и  $SiO_2$  в макете фильтра без внешнего корпуса (рис. 9, а, в) и с внешним корпусом из алюминиевого сплава (рис. 9, б, г). Сорбция йогексола качественно отмечена в образцах обоих типов адсорбентов, причем распределение сорбируемых веществ в адсорбентах было равномерным (рис. 9, в, г). Накопление  $Gd^{3+}$  отмечено только в образце АУ, причем преимущественно на поверхности, что с учетом представленных ранее данных об ограниченной сорбции  $Gd^{3+}$  немодифицированными МГФ, близкими по свойствам к АУ, может свидетельствовать о присутствии в образце остатка раствора адсорбата по принципу абсорбции порами. Размещение образцов внутри корпуса из алюминиевого сплава не оказывало существенного влияния на результаты распознавания и визуализации материалов (рис. 9, г).

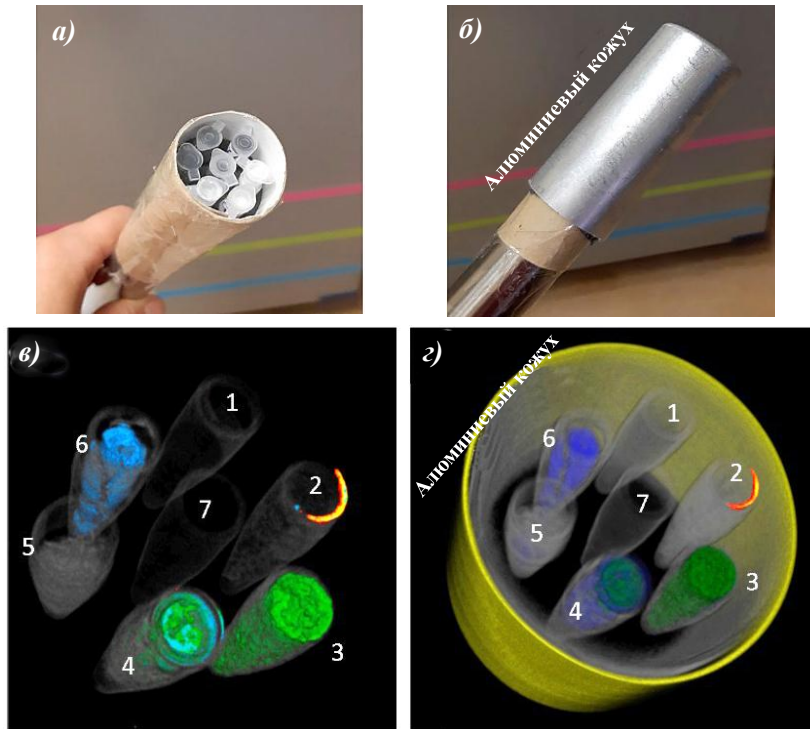


Рис. 9. Фотографии (а, б) и реконструкции с использованием энергочувствительной компьютерной томографии с распознаванием материалов (в, г) макета фильтра без (а, в) и с алюминиевым кожухом (б, г) с образцами сорбентов до и после обработки: 1 – активированный уголь (АУ); 2 – АУ с сорбированными ионами  $Gd^{3+}$ ; 3 – АУ с сорбированным йодгексолом; 4 – аморфный  $SiO_2$  с сорбированным йодгексолом; 5 – аморфный  $SiO_2$  с сорбированными ионами  $Gd^{3+}$ ; 6 –  $SiO_2$ ; 7 – воздух. Синим цветом выделены воксели с высоким содержанием воды, желто-красным –  $Gd^{3+}$ , зеленым – йода, желтым – Al

### Заключения

Проведенные исследования показали принципиальную возможность использования ЭКТ для исследования и визуализации процессов сорбции тяжелых элементов как с использованием отдельных образцов адсорбентов, так и в составе сложных систем, например фильтров. Метод ЭКТ позволяет качественно определять присутствие в системе одного или нескольких химических элементов, а также их концентрации в сорбентах с точностью, достаточной для расчетов сорбционной емкости систем. Размещение образцов сорбентов в корпусах из металлических сплавов, например на основе Al, не оказывает значимого влияния на результаты визуализации. Таким образом, ЭКТ может рассматриваться как эффективный метод для решения аналитических и технологических задач, связанных с процессами фильтрации и сорбции.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность С.В. Максимову и К.И. Маслакову за помощь в получении изображений с использованием просвечивающей электронной микроскопии и РФЭС-спектров, а также Р.Ю. Новоторцеву – за помощь в приготовлении АУ.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 22-15-00072-П. Исследование выполнено с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета.*

## Список источников

1. Carter J., Horan T., Miller J. et al. Comparative evaluation of filtration and imaging properties of analytical filters for microplastic capture and analysis // *Chemosphere*. 2023. Vol. 332. P. 138811. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138811.
2. Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Карасева Т.А. Пористая керамика для фильтрации расплавов металлов и горячих газов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). С. 54–63. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-54-63.
3. Shirman T., Shirman E., Liu S. Evaluation of filtration efficiency of various filter media in addressing wildfire smoke in indoor environments: importance of particle size and composition // *Atmosphere*. 2023. Vol. 14. P. 1729. DOI: 10.3390/atmos14121729.
4. Johnson T.F., Iacoviello F., Welsh J.H. High-resolution imaging of depth filter structures using X-ray computed tomography // *Journal of Material Sciences*. 2021. Vol. 56. P. 15313–15326. DOI: 10.1007/s10853-021-06238-w.
5. Martinez-Carvajal G., Oxarango L., Adrien J. et al. Assessment of X-ray computed tomography to characterize filtering media from vertical flow treatment wetlands at the pore scale // *Science of the total environment*. 2019. Vol. 658. P. 178–188. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.119.
6. Демидов А.А., Крупнина О.А., Михайлова Н.А., Косарина Е.И. Исследование образцов из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии и обработка томограмм с изображением объемной доли пористости // *Труды ВИАМ*. 2021. № 5 (99). С. 105–113. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.
7. Joss L., Pini R. Digital adsorption: 3D imaging of gas adsorption isotherms by X-ray computed tomography // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2017. Vol. 121. P. 26903–26915. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b09836.
8. Беспалов А.С., Истомин А.В. Рассмотрение особенностей высокопористых материалов для применения в качестве носителей каталитически активных веществ // *Труды ВИАМ*. 2025. № 10 (152). С. 96–105. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-96-105.
9. Bogdanowicz A., Zubrowska-Sudol M., Krasinski A., Sudol M. Cross-Contamination as a problem in collection and analysis of environmental samples containing microplastics – a review // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. P. 12123. DOI: 10.3390/su132112123.
10. Willeminck M.J., Persson M., Pourmorteza A. et al. Photon-counting CT: technical principles and clinical prospects // *Radiology*. 2018. Vol. 289. P. 293–312. DOI: 10.1148/radiol.2018172656.
11. Ballabriga R., Campbell M., Lopart X. An introduction to the medipix family ASICs // *Radiation measurements*. 2020. Vol. 136. P. 106271. DOI: 10.1016/j.radmeas.2020.106271.
12. Greffier J., Viry A., Robert A. et al. Photon-counting CT systems: A technical review of current clinical possibilities // *Diagnostic and interventional imaging*. 2025. Vol. 106. P. 53–59. DOI: 10.1016/j.diii.2024.09.002.
13. Чесноков В.В., Чичкань А.С., Бедило А.Ф. и др. Темплатный метод получения графена // *Доклады Академии наук*. 2019. Т. 488. № 5. С. 508–512. DOI: 10.31857/S0869-56524885508-512.
14. Suslova E.V., Yakovlev S.V., Maslakov K.I. et al. Synthetic routes to phosphorus-doped graphene nanoflakes // *Mendeleev communications*. 2025. Vol. 35. P. 47–49. DOI: 10.71267/mencom.7531.
15. Yeoh W., Lee K., Chai S. et al. Synthesis of high purity multi-walled carbon nanotubes over Co–Mo/MgO catalyst by the catalytic chemical vapor deposition of methane // *New Carbon Materials*. 2009. Vol. 24. P. 119–123. DOI: 10.1016/S1872-5805(08)60041-4.
16. Лебедева Ю.Е., Щеголева Н.Е., Турченко М.В., Волобуева Т.М. Влияние модифицирующих добавок на свойства материалов системы SiO<sub>2</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученных золь-гель методом // *Труды ВИАМ*. 2023. № 9 (127). С. 69–78. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-69-78.
17. Коробочкин В.В., Хиеу Н.М., Усольцева Н.В., Ту Н.В. Получение активированного угля пиролизом рисовой шелухи Вьетнама // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328. № 5. С. 6–15.

18. Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W. et al. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984) // *Pure Applied Chemistry*. 1985. Vol. 57. P. 603–619.
19. Sotenskii R.V., Rozhkov V.A., Shashurin D.A. et al. Novel algorithm for qualitative and quantitative material analysis by the K-edges for photon-counting computed tomography // *Journal of Instrumentation*. 2024. Vol. 19. P. 04009. DOI: 10.1088/1748-0221/19/04/P04009.
20. Шашурин Д.А., Сулова Е.В., Рожков В.А. и др. Контрастные агенты Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-малослойные графитовые фрагменты для энергочувствительной компьютерной томографии // *Журнал прикладной химии*. 2023. Т. 96. № 4. С. 337–344. DOI: 10.31857/S0044461823040023.
21. Suslova E., Shashurin D., Zoirova Z. et al. Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based contrasting agents for photon-counting computed tomography: Effect of structure, composition, and particle size // *Materials Chemistry and Physics*. 2024. Vol. 313. P. 128733. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.128733.
22. Suslova E., Epishev V., Maslakov K. et al. Transformation of graphene nanoflakes into onion-like carbon during spark plasma sintering // *Applied Surface Science*. 2021. Vol. 535. P. 147724. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147724.
23. Arkhipova E., Ivanov A., Strokova N. et al. Structural evolution of nitrogen-doped carbon nanotubes: From synthesis and oxidation to thermal defunctionalization // *Carbon*. 2017. Vol. 125. P. 20–31. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.09.013.
24. Ramasamy D.L., Puhakka V., Repo E., Sillanpää M. Selective separation of scandium from iron, aluminium and gold rich wastewater using various amino and non-amino functionalized silica gels – a comparative study // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 170. P. 890–901.
25. Yu Q., Ning S., Zhang W. et al. Recovery of scandium from sulfuric acid solution with a macro porous TRPO/SiO<sub>2</sub>-P adsorbent // *Hydrometallurgy*. 2018. Vol. 181. P. 74–81.
26. Marwani H.M., Albishri H.M., Jalal T.A., Soliman E.M. Study of isotherm and kinetic models of lanthanum adsorption on activated carbon loaded with recently synthesized Schiff's base // *Arabian Journal of Chemistry*. 2013. Vol. 10. P. 1032–1040. DOI: 10.1016/j.arabjc.2013.01.008.
27. Marwani H.M., Albishri H.M., Soliman E.M., Jalal T.A. Selective adsorption and determination of hexavalent chromium in water samples by chemically modified activated carbon with tris(hydroxymethyl)aminomethane // *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2011. Vol. 33. P. 549–555. DOI: 10.1080/01932691.2011.574941.

### References

1. Carter J., Horan T., Miller J. et al. Comparative evaluation of filtration and imaging properties of analytical filters for microplastic capture and analysis. *Chemosphere*, 2023, vol. 332, p. 138811. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138811.
2. Babashov V.G., Varrik N.M., Karaseva T.A. Porous ceramic for filtration of metal melts and hot gases (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), pp. 54–63. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 09, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-54-63.
3. Shirman T., Shirman E., Liu S. Evaluation of filtration efficiency of various filter media in addressing wildfire smoke in indoor environments: importance of particle size and composition. *Atmosphere*, 2023, vol. 14, p. 1729. DOI: 10.3390/atmos14121729.
4. Johnson T.F., Iacoviello F., Welsh J.H. High-resolution imaging of depth filter structures using X-ray computed tomography. *Journal of Material Sciences*, 2021, vol. 56, pp. 15313–15326. DOI: 10.1007/s10853-021-06238-w.
5. Martinez-Carvajal G., Oxarango L., Adrien J. et al. Assessment of X-ray computed tomography to characterize filtering media from vertical flow treatment wetlands at the pore scale. *Science of the total environment*, 2019, vol. 658, pp. 178–188. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.119.
6. Demidov A.A., Krupnina O.A., Mikhaylova N.A., Kosarina E.I. Investigation of polymer composite material samples by x-ray computed tomography and processing of tomograms with the image of the volume fraction of porosity. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), pp. 105–113. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 09, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.

7. Joss L., Pini R. Digital adsorption: 3D imaging of gas adsorption isotherms by X-ray computed tomography. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017, vol. 121, pp. 26903–26915. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b09836.
8. Bespalov A.S., Istomin A.V. Features of high-porous materials for use as carriers of catalytically active substances. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), pp. 96–105. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 09, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-96-105.
9. Bogdanowicz A., Zubrowska-Sudol M., Krasinski A., Sudol M. Cross-Contamination as a problem in collection and analysis of environmental samples containing microplastics – a review. *Sustainability*, 2021, vol. 13, p. 12123. DOI: 10.3390/su132112123.
10. Willemink M.J., Persson M., Pourmorteza A. et al. Photon-counting CT: technical principles and clinical prospects. *Radiology*, 2018, vol. 289, pp. 293–312. DOI: 10.1148/radiol.2018172656.
11. Ballabriga R., Campbell M., Lopart X. An introduction to the medipix family ASICs. *Radiation measurements*, 2020, vol. 136, p. 106271. DOI: 10.1016/j.radmeas.2020.106271.
12. Greffier J., Viry A., Robert A. et al. Photon-counting CT systems: A technical review of current clinical possibilities. *Diagnostic and interventional imaging*, 2025, vol. 106, pp. 53–59. DOI: 10.1016/j.diii.2024.09.002.
13. Chesnokov V.V., Chichkan A.S., Bedilo A.F. et al. Template method for obtaining graphene. *Doklady Akademii nauk*, 2019, vol. 488, no. 5, pp. 508–512. DOI: 10.31857/S0869-56524885508-512.
14. Suslova E.V., Yakovlev S.V., Maslakov K.I. et al. Synthetic routes to phosphorus-doped graphene nanoflakes. *Mendeleev communications*, 2025, vol. 35, pp. 47–49. DOI: 10.71267/mencom.7531.
15. Yeoh W., Lee K., Chai S. et al. Synthesis of high purity multi-walled carbon nanotubes over Co–Mo/MgO catalyst by the catalytic chemical vapor deposition of methane. *New Carbon Materials*, 2009, vol. 24, pp. 119–123. DOI: 10.1016/S1872-5805(08)60041-4.
16. Lebedeva Yu.E., Shchegoleva N.E., Turchenko M.V., Volobueva T.M. Modifying additives influence on the properties of SiO<sub>2</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system materials produced by sol-gel method. *Trudy VIAM*, 2023, no. 9 (127), pp. 69–78. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 09, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-69-78.
17. Korobochkin V.V., Hieu N.M., Usoltseva N.V., Tu N.V. Production of activated carbon by pyrolysis of Vietnamese rice husks. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 6–15.
18. Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W. et al. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). *Pure Applied Chemistry*, 1985, vol. 57, pp. 603–619.
19. Sotenskii R.V., Rozhkov V.A., Shashurin D.A. et al. Novel algorithm for qualitative and quantitative material analysis by the K-edges for photon-counting computed tomography. *Journal of Instrumentation*, 2024, vol. 19, p. 04009. DOI: 10.1088/1748-0221/19/04/P04009.
20. Shashurin D.A., Suslova E.V., Rozhkov V.A. et al. Contrast agents Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-few-layer graphite fragments for energy-sensitive computed tomography. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2023, vol. 96, no. 4, pp. 337–344. DOI: 10.31857/S0044461823040023.
21. Suslova E., Shashurin D., Zoirova Z. et al. Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based contrasting agents for photon-counting computed tomography: Effect of structure, composition, and particle size. *Materials Chemistry and Physics*, 2024, vol. 313, pp. 128733. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.128733.
22. Suslova E., Epishev V., Maslakov K. et al. Transformation of graphene nanoflakes into onion-like carbon during spark plasma sintering. *Applied Surface Science*, 2021, vol. 535, p. 147724. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147724.
23. Arkhipova E., Ivanov A., Strokova N. et al. Structural evolution of nitrogen-doped carbon nanotubes: From synthesis and oxidation to thermal defunctionalization. *Carbon*, 2017, vol. 125, pp. 20–31. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.09.013.
24. Ramasamy D.L., Puhakka V., Repo E., Sillanpää M. Selective separation of scandium from iron, aluminium and gold rich wastewater using various amino and non-amino functionalized silica gels – a comparative study. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 170, pp. 890–901.

25. Yu Q., Ning S., Zhang W. et al. Recovery of scandium from sulfuric acid solution with a macro porous TRPO/SiO<sub>2</sub>-P adsorbent. *Hydrometallurgy*, 2018, vol. 181, pp. 74–81.
26. Marwani H.M., Albishri H.M., Jalal T.A., Soliman E.M. Study of isotherm and kinetic models of lanthanum adsorption on activated carbon loaded with recently synthesized Schiff's base. *Arabian Journal of Chemistry*, 2013, vol. 10, pp. 1032–1040. DOI: 10.1016/j.arabjc.2013.01.008.
27. Marwani H.M., Albishri H.M., Soliman E.M., Jalal T.A. Selective adsorption and determination of hexavalent chromium in water samples by chemically modified activated carbon with tris(hydroxymethyl)aminomethane. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2011, vol. 33, pp. 549–555. DOI: 10.1080/01932691.2011.574941.

*Информация об авторах*

**Шашурин Денис Александрович**, научный сотрудник, к.м.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, info@rector.msu.ru

**Сидоров Денис Викторович**, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Сулова Евгения Викторовна**, старший научный сотрудник, к.х.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, info@rector.msu.ru

**Мартынова Наталья Александровна**, младший научный сотрудник, к.х.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, info@rector.msu.ru

**Шелков Георгий Александрович**, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, info@rector.msu.ru

*Information about the authors*

**Denis A. Shashurin**, Researcher, Candidate of Sciences (Med.), Lomonosov Moscow State University, info@rector.msu.ru

**Denis V. Sidorov**, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Evgeniya V. Suslova**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), Lomonosov Moscow State University, info@rector.msu.ru

**Natalya A. Martynova**, Junior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), Lomonosov Moscow State University, info@rector.msu.ru

**Georgy A. Chelkov**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), Lomonosov Moscow State University, info@rector.msu.ru

Статья поступила в редакцию 08.12.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.12.2025.  
The article was submitted 08.12.2025; approved and accepted for publication after reviewing 10.12.2025.