

**Научная статья**

УДК 66.081.3

**СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГРАФЕНА,  
МОДИФИЦИРОВАННОГО ЛИГНОСУЛЬФОНАТОМ**

Э. С. Мкртчян, И. В. Буракова\*, А. Е. Бураков, О. А. Ананьева, Т. П. Дьячкова, А. Г. Ткачев

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Российская Федерация

---

**ИНФОРМАЦИЯ**

**История статьи:**

Поступила 4.07.2022

Одобрена 1.08.2022

Принята 8.08.2022

---

**Ключевые слова:**

оксид графена,  
лигносульфонат,  
лиофилизация,  
адсорбция,  
ионы тяжелых металлов,  
свинец,  
синтетический краситель,  
метиленовый синий.

---

**АННОТАЦИЯ**

Статья посвящена синтезу нового сорбционного нано-композиционного материала для извлечения загрязнений различной химической природы. Разработана методика получения нанокompозита на основе оксида графена (ОГ), модифицированного природным сульфопроизводным лигнина – лигносульфонатом (ЛС), с последующей лиофилизацией. Модифицирование проводилось с целью увеличения сорбционной способности конечного материала, а также уменьшения содержания в нем дорогостоящего ОГ. Синтезированы варианты нанокompозита с различным содержанием исходных компонентов. Свойства полученного нанокompозита исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии, Рамановской и инфракрасной спектроскопии, рентгеновской дифракции, термогравиметрии. Параметры пористого пространства материала определяли по адсорбции азота. Для оценки сорбционной способности нанокompозита проводили сорбционные исследования по извлечению двух видов загрязнителей из водных растворов – органических (синтетический краситель метиленовый синий (МС)) и неорганических (ионы свинца). Адсорбцию осуществляли в статических условиях в ограниченном объеме. В результате экспериментальных исследований установлено, что соотношение ОГ к ЛС 2:1 показывает лучшую сорбционную емкость по отношению к ионам свинца – 179 мг/г и по молекулам МС – 1822,3 мг/г при времени извлечения 20 мин. Таким образом, экспериментальные исследования показывают целесообразность получения нанокompозита ОГ/ЛС как сорбционного материала для удаления органических и неорганических загрязнений.

---

**DOI:**

10.18083/LCAppl.2022.3.38

---

**Для цитирования:**

Мкртчян Э. С., Буракова И. В., Бураков А. Е., Ананьева О. А., Дьячкова Т. П., Ткачев А. Г. Синтез нанокompозиционного материала на основе оксида графена, модифицированного лигносульфонатом // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2022. Т. 22, № 3. С. 38–48.

---

\*Адрес для переписки: [iris\\_tamb68@mail.ru](mailto:iris_tamb68@mail.ru)

© Мкртчян Э. С., Буракова И. В., Бураков А. Е., Ананьева О. А., Дьячкова Т. П., Ткачев А. Г., 2022

**Original Article**

**SYNTHESIS OF NANOCOMPOSITE MATERIAL BASED ON GRAPHENE OXIDE  
MODIFIED WITH LIGNOSULFONATE**

E. S. Mkrtchyan\*, I. V. Burakova, A. E. Burakov, O. A. Ananyeva, T. P. Dyachkova, A. G. Tkachev

*Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation*

**ARTICLE INFO:**

**ABSTRACT**

**Article history:**

Received 4 July 2022

Approved 1 August 2022

Accepted 8 August 2022

**Key words:**

graphene oxide,  
lignosulfonate,  
lyophilization,  
adsorption,  
heavy metal ions,  
lead,  
synthetic dye,  
methylene blue

A new sorption nanocomposite material for the extraction of various chemical nature pollutants from aqueous media was obtained in the article. A method for obtaining the nanocomposite based on graphene oxide (GO) modified with a natural sulfo derivative of lignin (lignosulfonate, LS) followed by lyophilization was developed. The modification was carried out in order to increase the sorption capacity of the final material, as well as to reduce the content of expensive GO in it. The nanocomposites with different content of the initial components were synthesized. The nanocomposite properties were studied by transmission electron microscopy, Raman and infrared spectroscopy, X-ray diffraction, and thermogravimetry. The parameters of porous space were determined by nitrogen adsorption. To assess the sorption capacity of the nanocomposite, sorption studies were carried out to extract two types of pollutants from aqueous solutions – organic (synthetic dye methylene blue, MB) and inorganic (lead ions). The adsorption was carried out in limited volume under static conditions. As a result of experimental studies, it was found that the ratio of GO to LS 2:1 shows the best sorption capacity with respect to lead ions – 179 mg/g and for MB molecules – 1822.3 mg/g with a contact time of 20 min. Thus, the experimental studies show the expediency of obtaining GO/LS nanocomposite as sorption material for removing organic and inorganic contaminants.

**DOI:**

10.18083/LCAppl.2022.3.38

**For citation:**

Mkrtchyan E. S., Burakova I. V., Burakov A. E., Ananyeva O. A., Dyachkova T. P., Tkachev A. G. Synthesis of a nanocomposite material based on graphene oxide modified with lignosulfonate. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2022, **22** (3), 38–48 (in Russ.).

\*Corresponding author: iris\_tamb68@mail.ru

© Mkrtchyan E. S., Burakova I. V., Burakov A. E., Ananyeva O. A., Dyachkova T. P., Tkachev A. G., 2022

## Введение

В сельскохозяйственном и промышленном секторах народного хозяйства образуются сточные воды, содержащие различные загрязняющие вещества, такие как металлы, красители, фармацевтические препараты, гербициды, фосфаты, нитраты и фенолы [1, 2]. Данная проблема вызвана, в частности, неправильной утилизацией отходов химических предприятий. Широкое распространение в различных областях промышленности (металлургической, текстильной, горнодобывающей, лакокрасочной), производстве удобрений, аккумуляторов и др. имеют такие тяжелые металлы, как цинк (Zn), никель (Ni), ртуть (Hg), кадмий (Cd), мышьяк (As), хром (Cr), свинец (Pb), медь (Cu) и др. [2–4]. Тяжелые металлы являются высокотоксичными, не поддаются биологическому разложению и представляют угрозу для здоровья людей и животных [5]. Поэтому своевременная очистка сточных вод от них является актуальной задачей.

На сегодняшний день существует множество различных методов очистки водных сред от тяжелых металлов, в частности, свинца. Например, мембранная фильтрация, биологическая очистка, обратный осмос, коагуляция, ионный обмен, адсорбция, электрохимическое осаждение, импульсная лазерная абляция и импульсное лазерное осаждение и т.д. [5, 7–9]. Однако некоторые из вышеперечисленных методов могут вызывать вторичное загрязнение, длительны по времени и имеют высокую стоимость.

Среди представленных методов адсорбция является наиболее популярным методом извлечения ионов тяжелых металлов из сточных вод ввиду высокой скорости удаления и эффективности процесса, низкой экономической стоимости производства и селективности [4, 7, 9]. Но применение традиционных адсорбентов (ионообменные смолы, цеолиты, активированные угли различного происхождения и т.п.) имеет ряд недостатков, например, малая адсорбционная емкость и медленная кинетика адсорбции.

В настоящее время учеными в качестве новых сорбционных материалов активно используются углеродные наноматериалы (УНМ), такие как углеродные нанотрубки (УНТ), углеродные нановолокна (УНВ), оксид графена (ОГ) и нанокompозиты на их основе [5–7, 9, 10].

УНМ – это класс материалов, которые в силу наличия наноразмерных эффектов проявляют в различных областях материаловедения уникальные свойства. Многие ученые работают в области создания новых классов наноматериалов и наноструктур, в частности, органических наноматериалов, обладающих многими свойствами, недоступными неорганическим веществам; полимерные нанокompозитные и пленочные наноматериалы; жидкокристаллические сорбенты и многое другое [11, 12].

Нанокompозиты на основе графеновых материалов, в частности, ОГ, являются перспективными сорбционными материалами, так как ОГ имеет химически активную поверхность, а графеновые плоскости образуют высокопористую структуру [3, 5, 7]. Однако между листами графена существуют прочные связи, которые приводят к неактивным химическим свойствам поверхности, меньшей рабочей площади и плохой дисперсии в водных растворах, снижению эффективности адсорбции. Для преодоления этих недостатков и обеспечения высокой сорбционной активности необходима функционализация материала, например, оксидами металлов (железа, титана и др.), органическими полимерами (хинон, лигнин, хитозан и др.) [3, 7, 9–15].

Целью настоящей работы являлся синтез нового сорбционного материала на основе оксида графена, активного по отношению к широкому ряду загрязнителей водных сред. Предполагалось получить относительно дешевый высокоэффективный комплексный сорбент за счет замены части дорогостоящего компонента – ОГ, модифицирующим агентом органического происхождения – природным сульфо-производным лигнина – лигносульфонатом.

## Эксперимент

### *Исходные компоненты для синтеза нанокompозита*

Для получения нанокompозита использовали: суспензия ОГ (ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов, Россия) с массовым содержанием сухого вещества в количестве 1 %; дистиллированная вода (деминерализованная); *гидроксид натрия* (ООО «АО РЕАХИМ», г. Москва, Россия); *лигносульфонат* технический порошкообразный (ООО «АКВАХИМ», г. Казань, Россия).

#### Методика получения нанокompозита

Получение нанокompозита ОГ/ЛС заключалось в следующем: в исходную суспензию ОГ добавили 1 М раствор NaOH для доведения смеси до pH = 10. Далее порошок ЛС растворили в дистиллированной воде, предварительно нагретой до 70 °С в течение 30 мин. Остывший ЛС добавили в суспензию ОГ и продолжили перемешивание в течение 10 мин. Для образования гидрогеля полученную смесь подвергли нагреву в течение 24 ч при 90 °С. Завершающим этапом синтеза является загрузка гидрогеля ОГ/ЛС в лиофильную сушилку *Scientz-10n* (*Scientz*, Китай) для замораживания образца до –30 °С и последующей лиофилизации в течение 48 ч, что способствует образованию пористого каркаса вследствие сублимации растворителя. Для выявления лучшего соотношения ОГ и ЛС были выбраны следующие пропорции смеси: 100:1, 20:1, 10:1, 5:1, 2:1, 1:1.

#### Методы определения свойств нанокompозита

Структура графеновых слоев полученного нанокompозита исследовалась с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) *JEM-2010 instrument* (*JEOL Ltd.*, Токио, Япония). Структурные характеристики исходных компонентов и нанокompозита были проанализированы методом рентгенофазового анализа с использованием рентгеновского дифрактометра *Thermo Scientific ARL Equinox 1000* (*TechTrend Science Co., Ltd.*, Тайвань) (длина волны  $\lambda = 0,1540562$  нм (медный анод)). Для определения упорядоченности графеновой структуры использовался *DXR Raman Microscope* («*Thermo Scientific Instruments Group*», *Waltham, MA USA*) при длине волны возбуждающего лазера  $\lambda = 633$  нм. Для получения ИК-спектров исходных компонентов и нанокompозита использовали ИК-Фурье-спектрометр *FT/IR 6700* (*Jasco Co., Deutschland GmbH*, Германия). Параметры пористого пространства и удельная поверхность были измерены по адсорбции азота на приборе *Autosorb-iQ analyzer* (*Quantachrome, USA*).

#### Адсорбционные исследования

Для анализа эффективности сорбции ионов  $Pb^{2+}$  и синтетического красителя метиленового синего (МС) на синтезированном нанокompозите были проведены эксперименты в ограниченном объеме (*batch experiments*). Сорбент массой 0,01 г

помещали в 30 мл раствора нитрата свинца  $Pb(NO_3)_2$  (ООО Научно-производственная «Камская химическая компания», Пермь, Россия) с начальной концентрацией  $C_0 = 100$  мг/л и раствора МС с  $C_0 = 1500$  мг/л согласно ГОСТ 4453-74. Каждую пробирку с очищаемыми растворами и сорбентом непрерывно встряхивали на программируемом ротаторе *Multi Bio RS-24* (*Biosan*, Рига, Латвия) в течение 30 мин. Равновесную концентрацию  $C_e$  ионов  $Pb^{2+}$  в растворе измеряли с использованием энерго-дисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии (спектрометр *ARLQuant ThermoScientific, ThermoScientific*, США). Равновесную концентрацию  $C_e$  молекул МС определяли по величине оптической плотности, измеренной на спектрофотометре ПЭ-5400В (Экрос, Санкт-Петербург, Россия) при длине волны  $\lambda = 570$  нм.

Статическую сорбционную емкость сорбентов  $q_e$ , мг/г, вычисляли по формуле

$$q_e = (C_0 - C_e) \times V / m,$$

где  $C_0$  и  $C_e$  – исходная и конечная концентрации веществ в растворе, мг/л;  $V$  – объем раствора, л;  $m$  – масса навески сорбента, г.

### Результаты и их обсуждение

#### Характеризация нанокompозита

Структура графеновых слоев нанокompозита ОГ/ЛС представлена на рис. 1. На изображении можно наблюдать графеноподобную структуру материала в виде углеродных слоев.

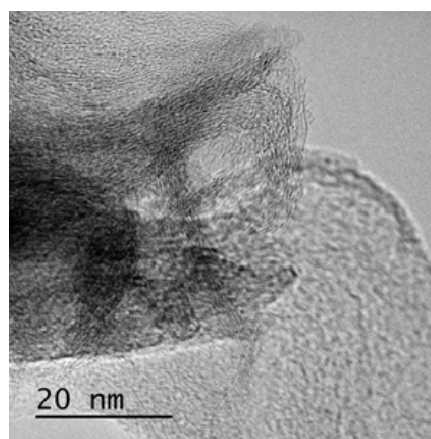


Рис. 1. ПЭМ изображение структуры нанокompозита ОГ/ЛС

Fig. 1. TEM image of the GO/LS nanocomposite structure

Широкая полоса в диапазоне  $3000\text{--}3700\text{ см}^{-1}$  в ИК-спектрах лигносульфоната и оксида графена (рис. 2), как правило, относится к валентным колебаниям связей О-Н. Причем, очевидно, в составе ОГ таких связей значительно больше. В спектре гибридного материала ОГ/ЛС, напротив, данная полоса практически не выражена.

В спектрах всех трех образцов имеются крайне слабые пики при  $2936$  и  $2852\text{ см}^{-1}$ , отвечающие за валентные колебания связей С-Н в алкильных группах (рис. 2). Эти группы имеются

как на участках лигниновых фрагментов, так и в местах дефектов плоскостей графена. Пик при  $1710\text{--}1730\text{ см}^{-1}$ , обусловленный валентными колебаниями связей С=О в карбонильных и карбоксильных группах, имеется на спектрах всех трех образцов (рис. 2) [9, 14]. Причем в случае ОГ он наиболее интенсивен и расположен при  $1730\text{ см}^{-1}$ , в случае ЛС – наименее интенсивен и расположен при  $1713\text{ см}^{-1}$ . На спектре ОГ/ЛС положение пика такое же, как и в случае ЛС, но интенсивность выше [11].

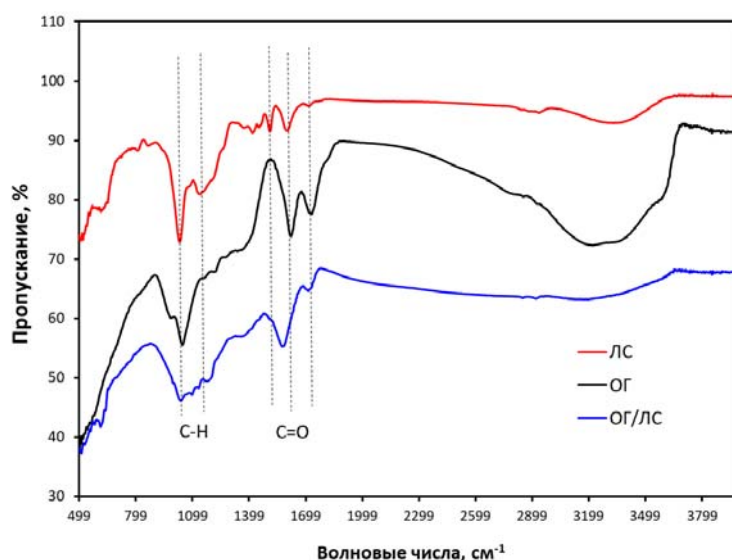


Рис. 2. ИК-спектры лигносульфоната, оксида графена и нанокompозита ОГ/ЛС

Fig. 2. FTIR spectra of LS, GO and GO/LS nanocomposite

Примерно те же соотношения по интенсивности и положению наблюдаются и для полосы при  $1560\text{--}1610\text{ см}^{-1}$ , также отвечающей за наличие связей С=О в карбоксильных группах [15].

На ИК-спектре гибридного материала ОГ/ЛС обнаруживается пик при  $1031\text{ см}^{-1}$ , согласно [11], обусловленный симметричными валентными колебаниями атомов в сульфогруппе (рис. 2). Пик при  $1138\text{ см}^{-1}$ , отвечающий за плоскостные деформационные колебания связей С(ароматический)-Н в спектре гибридного материала проявлен в наименьшей степени, что, возможно,

связано с экранированием этих связей при его формировании.

Соотношение интенсивностей пиков D и G после модифицирования оксида графена лигносульфонатом значительно не изменяется (рис. 3). Менее интенсивными на спектре КР ОГ/ЛС становятся линии 2D и D+G, что, возможно, связано с формированием на поверхности ОГ модифицирующего слоя ЛС, в составе которого нет фрагментов конденсированных ароматических ядер, из которых состоит правильная графеновая плоскость [11].

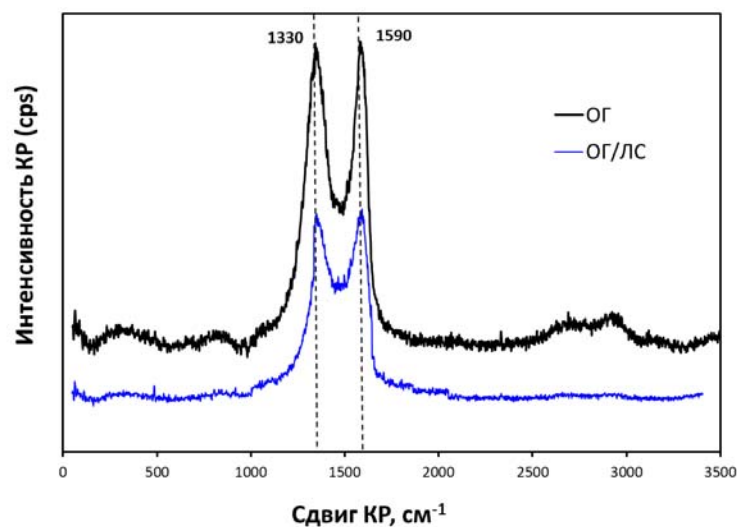


Рис. 3. КР-спектры исходного оксида графена и нанокompозита ОГ/ЛС

Fig. 3. Raman spectra of the initial GO and the GO/LS nanocomposite

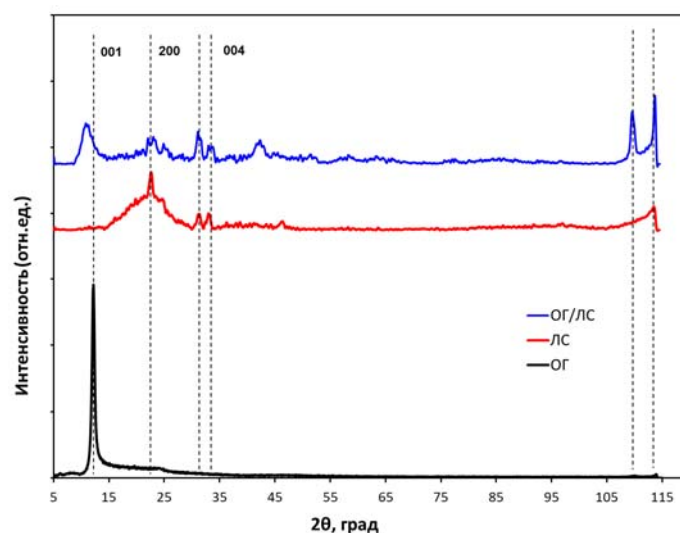


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы исходных компонентов и нанокompозита

Fig. 4. XRD-pattern of the initial components and the nanocomposite

На дифрактограмме ОГ имеется единственный интенсивный симметричный пик при  $2\theta = 12$  (рис. 4). Рассчитанное по формуле Вульфа — Брегга значение межплоскостных расстояний составляет 7,35 Å. Согласно литературным данным, это типичная картина для оксида графена. На рентгеновской дифрактограмме лигносульфоната имеются пики при  $2\theta$ , равных 22, 31, 33 и 46 град. [11].

Нанокompозит аморфизирован (рис. 4). Пик при  $2\theta = 12$  практически не идентифицируется.

Выделяется множество пиков, наиболее интенсивные из них располагаются при  $2\theta$ , равных 11, 31, 110 и 114 град. Первый, вероятно, принадлежит фазе оксида графена, второй (при 31°) имеется на дифрактограмме лигносульфоната. Предположительно при модифицировании ОГ формируется гибридный материал, кристаллическая структура которого отличается от исходных компонентов, что, в частности, подтверждается наличием узких симметричных пиков при 110 и 114 град.

Кроме того, рефлекс 001 на рентгеновской дифрактограмме гибридного материала смещен в сторону меньшего углового числа и уширен. Рассчитанное значение межплоскостных расстояний для него составляет 8,23 нм, что может быть обусловлено интеркалированием молекул лигносульфоната между слоями оксида графена (рис. 4).

При проведении ТГ и ДСК анализа наблюдается существенное различие в поведении исходного и модифицированного материала при нагреве в инертной атмосфере (рис. 5). Высушенный оксид графена характеризуется

более низким, чем материал ОГ/ЛС, содержанием адсорбированной воды, что выражается в меньших потерях массы на начальных участках ТГ-кривых. При более высоких температурах, напротив, потери массы ОГ более существенны. Также не совпадает положение пиков на ДСК-кривых, соответствующих температурам интенсивной деструкции материалов. Для гибридного материала он расположен при 160 °С, а для ОГ – при 200 °С. Можно считать, что при этих температурах удаляется хемосорбированная влага, и, очевидно, в оксиде графена ее больше (рис. 5).

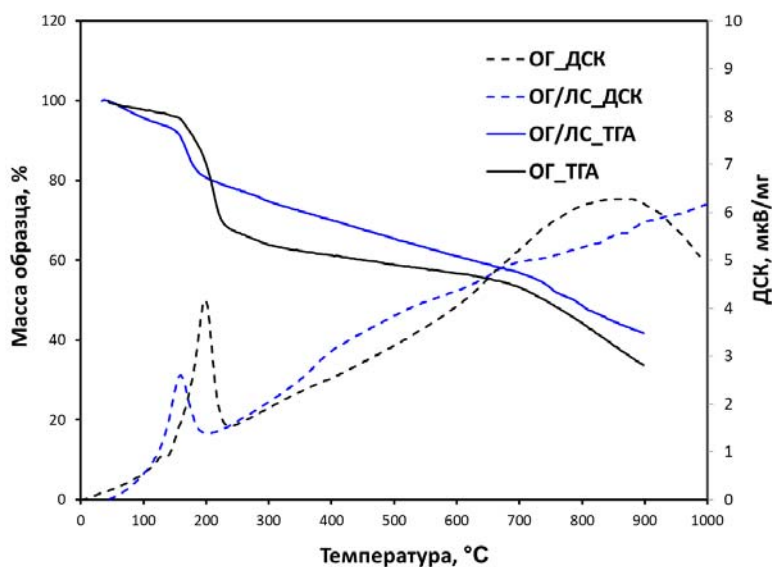


Рис. 5. ТГ/ДСК кривые исходного оксида графена и нанокompозита ОГ/ЛС в инертной атмосфере, скорость нагрева 10 К/мин

Fig. 5. TG/DSC curves of the initial GO and the GO/LS nanocomposite in an inert atmosphere, heating rate 10 K/min

При термической деструкции ОГ/ЛС в атмосфере воздуха на ТГ-кривой также можно отметить небольшое снижение массы на начальном участке, связанное с содержанием воды в материале (рис. 5). Интенсивное окисление наблюдается в интервале температур от 340 до 480 °С. Соответствующий ему пик на ДСК-кривой

указывает на высокий тепловой эффект процесса. При этом чуть менее 40 % материала оказывается устойчивым к окислению во всем исследованном интервале температур, что, по-видимому, обусловлено образованием плотной, устойчивой к термическому разложению смеси карбонизата с остатками неорганических продуктов.



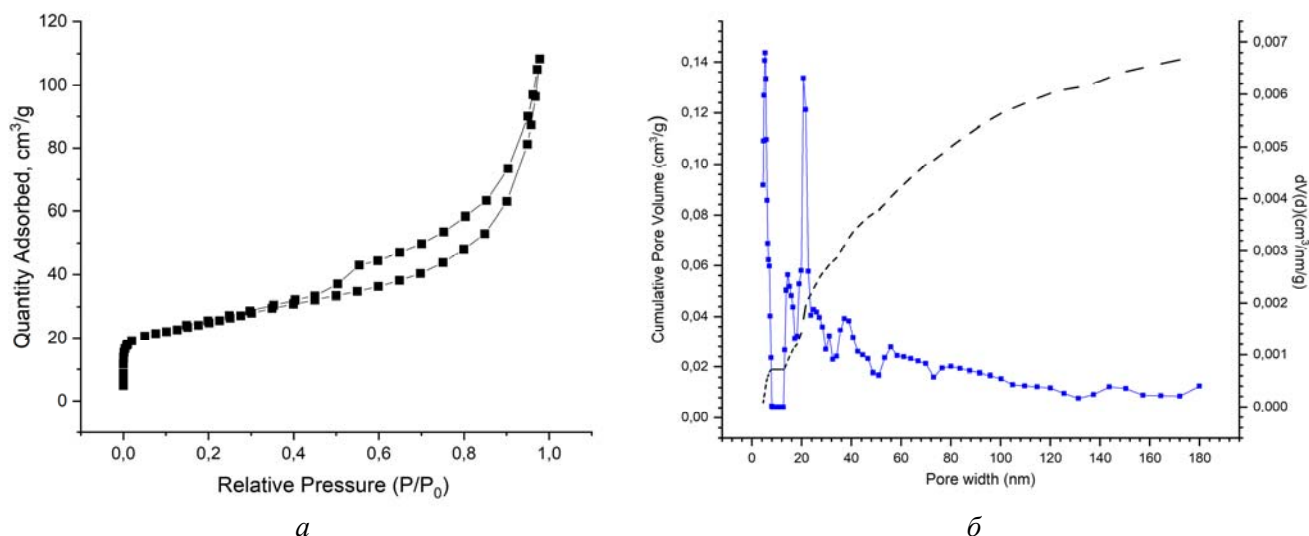


Рис. 6. Параметры пористого пространства: а – изотерма адсорбции-десорбции N<sub>2</sub>; б – распределение пор по размерам, полученное из DFT расчета по сферически-цилиндрическим порам (QSDFT модель)

Fig. 6. Pore space parameters: a – nitrogen adsorption-desorption isotherms, b – pore size distribution obtained from DFT calculations assuming spherical / cylindrical pores (QSDFT model)

Согласно полученным данным по адсорбции азота (рис. 6, а), измеренное значение удельной поверхности материала составляет при этом 85,353 м²/г. Гистограмма распределения пор по размерам показывает значительную долю мезопор (радиусом до 50 нм) (рис. 6, б). Суммарный объем пор, определенный DFT-методом, составляет 0,144 см³/г.

*Определение эффективного состава нано-композиата ОГ/ЛС*

В результате исследования сорбции ионов Pb<sup>2+</sup> и молекул красителя МС синтезированными партиями нанокомпозиата ОГ/ЛС были получены значения адсорбционной емкости, приведенные на рис. 7, 8.

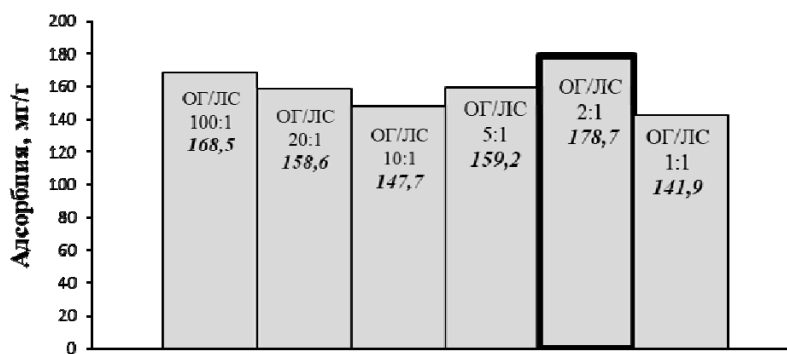


Рис. 7. Определение эффективного соотношения исходных компонентов применительно к адсорбции ионов Pb<sup>2+</sup>

Fig. 7. The determination of the effective initial component ratio as applied to the Pb<sup>2+</sup> ions adsorption



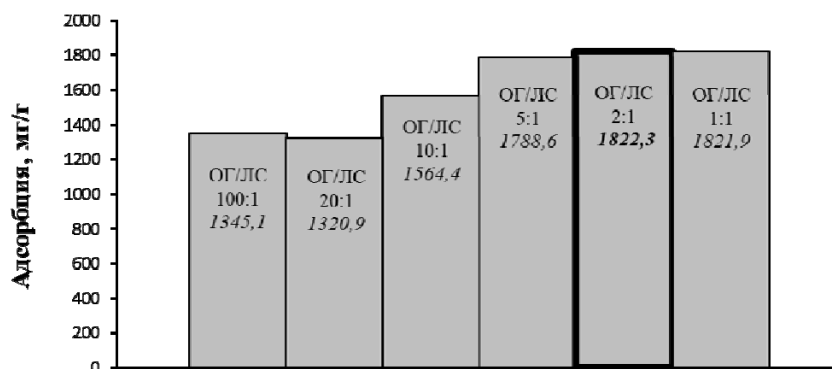


Рис. 8. Определение эффективного соотношения исходных компонентов применительно к адсорбции молекул МС

Fig. 8. The determination of the effective initial component ratio as applied to the MB adsorption

Предварительные адсорбционные исследования показали, что наиболее эффективным является состав, имеющий соотношение исходных компонентов ОГ/ЛС 2:1, проявляющий максимальную адсорбционную емкость в сравнении с другими составами. Таким образом, для дальнейших исследований использовался состав нанокompозита ОГ/ЛС 2:1.

### Выводы

В работе синтезирован новый нанокompозиционный материал, представляющий собой матричный носитель, сформированный оксидом графена, модифицированный лигносульфонатом. Авторами были исследованы физико-химические свойства нанокompозита и определены параметры пористой структуры. Для выявления эффективного состава нанокompозита были получены партии материала, имеющие разное соотношение компонентов, и определена их сорбционная способность по отношению к ионам  $Pb^{+2}$  и молекулам синтетического красителя метиленового синего. Согласно экспериментальным результатам, адсорбционная емкость по ионам свинца имела значение порядка 179 мг/г, по МС – 1822,3 мг/г. Таким образом, согласно проведенным исследованиям нанокompозиционный материал на основе ОГ, модифицированного лигносульфонатом, может являться перспективным сорбентом ионов тяжелых металлов и органических красителей из жидких сред.

**Благодарность:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20074, <https://rscf.ru/project/22-13-20074>. Эта работа была выполнена на базе Центра коллективного пользования «Получение и применение многофункциональных наноматериалов» (Тамбовский государственный технический университет).

**Acknowledgments:** The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No 22-13-20074, <https://rscf.ru/project/22-13-20074>. This work has been done using facilities of the shared access center “Production and application of multifunctional nanomaterials” (Tambov State Technical University).

### Список источников / References

1. Burakov A.E., Galunin E.V., Burakova I.V., Kuchero A.E., Agarwal S., Tkachev A.G., Gupta V.K. Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purposes: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 148, 702–712. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.11.034.
2. Ahmed M.J., Hameed B.H., Hummadi E.H. Review on recent progress in chitosan/chitin-carbonaceous material composites for the adsorption of water pollutants. *Carbohydrate Polymers*, 2020, **247** (1), 116690. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.116690.
3. Li Y., Dong X., Zhao L. Application of magnetic chitosan nanocomposites modified by graphene oxide and polyethyleneimine for removal of toxic heavy metals and dyes from water. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, **192** (1), 118–125. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.09.202.

4. Vakili M., Deng Sh., Cagnetta G., Wang W., Meng P., Liu D., Yu G. Regeneration of chitosan-based adsorbents used in heavy metal adsorption: A review. *Separation and Purification Technology*, 2019, 224, 373–387. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.05.040.
  5. Mishra Sh., Tripathi A. Adsorptive removal of Pb(II) via green route using magnetic iron nanoparticle sprinkled graphene oxide-chitosan beads in aqueous medium. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 2022, 17, 100632. DOI: 10.1016/j.enmm.2021.100632.
  6. Nguyen L.D., Doan T.C.D., Huynh T.M., Nguyen V.N.P., Dinh H.H., Dang D.M.T., Dang C.M. An electrochemical sensor based on polyvinyl alcohol/chitosan-thermally reduced graphene composite modified glassy carbon electrode for sensitive voltammetric detection of lead. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 2021, 345, 130443. DOI: 10.1016/j.snb.2021.130443.
  7. Barus D.A., Humaidi S., Ginting R.T., Sitepu J. Enhanced adsorption performance of chitosan/cellulose nanofiber isolated from durian peel waste/graphene oxide nanocomposite hydrogels. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 2022, 17, 100650. DOI: 10.1016/j.enmm.2022.100650.
  8. Dotto J., Fagundes-Klen M.R., Veit M.T., Palácio S.M., Bergamasco R. Performance of different coagulants in the coagulation/flocculation process of textile wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208, 656–665. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.112.
  9. Menazea A.A., Ezzat H.A., Omara W., Basyouni O.H., Ibrahim S.A., Mohamed A.A., Tawfik W., Ibrahim M.A. Chitosan/graphene oxide composite as an effective removal of Ni, Cu, As, Cd and Pb from wastewater. *Computational and Theoretical Chemistry*, 2020, 1189, 112980. DOI: 10.1016/j.comptc.2020.112980.
  10. Aung W.M., Marchenko M.V., Troshkina I.D., Burakova I.V., Gutnik I.V., Burakov A.E., Tkachev A.G. Scandium adsorption from sulfuric-chloride solutions by nanocomposite PANI/CNTs. *Advanced & Materials Technologies*, 2019, 4 (16), 58–65. DOI: 10.17277/amt.2019.04.pp.058-065.
  11. Yan M., Huang W., Li Z. Chitosan cross-linked graphene oxide/lignosulfonate composite aerogel for enhanced adsorption of methylene blue in water. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 136, 927–935. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.06.144.
  12. Bykov E.S., Kopytin K.A., Onuchak L.A. Supramolecular planar liquid crystal systems on carbon surface as universal isomer-selective adsorbents. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2021, 21 (4), 89–93. DOI: 10.18083/LCAppl.2021.4.89.
  13. Каманина Н. В., Тойка А. С., Квашнин Д. Г. Жидкокристаллические системы с WS<sub>2</sub> наночастицами в эффекте ограничения оптического излучения // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2021. Т. 21, № 2. С. 73–81. [Kamanina N.V., Toikka A.S., Kvashnin D.G. Liquid crystal systems with WS<sub>2</sub> nanoparticles in the effect of limiting optical radiation. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2021, 21 (2), 73–81. DOI: 10.18083/LCAppl.2021.2.73 (in Russ.)].
  14. Ali I., Galunin E.V., Burakov A.E., Burakova I.V., Mkrtchyan E.S., Melezhik A.V., Kurnosov D.A., Tkachev A.G., Grachev V.A. High-speed and high-capacity removal of methyl orange and malachite green in water using newly developed mesoporous carbon: kinetic and isotherm studies. *ACS Omega*, 2019, 4, 19293–19306. DOI: 10.1021/acsomega.9b02669.
  15. Ali I., Burakov A.E., Melezhik A.V., Babkin A.V., Burakova I.V., Neskornomnaya E.A., Galunin E.V., Tkachev A.G., Kuznetsov D.V. Removal of copper(II) and zinc(II) ions in water on a new synthesized polyhydroquinone/graphene nanocomposite materials: kinetics, thermodynamics and mechanism. *Chemistry Select*, 2019, 4 (43), 12708–12718. DOI: 10.1002/slct.201902657.
- Вклад авторов:**
- <sup>1</sup>Мкртчян Э. С. – проведение экспериментальных исследований по синтезу нанокompозита.  
<sup>2</sup>Буракова И. В. – разработка концепции научной работы, написание текста статьи, подготовка иллюстраций.  
<sup>3</sup>Бураков А. Е. – методологии и реализации исследования, редактирование текста статьи.  
<sup>4</sup>Ананьева О. А. – проведение адсорбционных экспериментальных исследований.  
<sup>5</sup>Дьячкова Т. П. – проведение диагностики свойств нанокompозита и описание полученных результатов.  
<sup>6</sup>Ткачев А. Г. – консультация по вопросам планирования, редактирование текста статьи.
- Contribution of the authors:**
- <sup>1</sup>Mkrtchyan E. S. – conducting experimental studies on the nanocomposite synthesis.  
<sup>2</sup>Burakova I. V. – development of the scientific work concept, writing the text of the article, preparation of illustrations.  
<sup>3</sup>Burakov A. E. – the study methodology and implementation, editing the text of the article.  
<sup>4</sup>Ananyeva O. A. – conducting adsorption experimental studies.  
<sup>5</sup>Dyachkova T. P. – characterization of the nanocomposite and describing the results obtained.  
<sup>6</sup>Tkachev A. G. – consultation on planning, editing the text of the article.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare no conflicts of interests.*

<sup>5</sup><https://orcid.org/0000-0002-4884-5171>

<sup>6</sup><https://orcid.org/0000-0001-5099-9682>

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-3867-7063>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-0850-9365>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0003-4871-3504>

<sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0002-1188-9402>

*Поступила 4.07.2022; одобрена 1.08.2022; принята 8.08.2022.*

*Received 4.07.2022; approved 1.08.2022; accepted 8.08.2022.*