



Влияние органических растворителей на морфологию оксида графита, синтезированного по методу Хаммерса

О.Н. Осколкова*, В.В. Гнатовская*, Е.А. Выликов*, Е.В. Хомутова*, Д.Т. Труш*,
А.А. Ларин**, А.А. Заболотный***, Д.Е. Наймушина****

*Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко,
Донецк, Российская Федерация

**Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского Российской академии наук,
Москва, Российская Федерация

***Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

****Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина,
Донецк, Российская Федерация

Аннотация. Целью проведенного исследования являлось изучение воздействия различных растворителей на структурные характеристики оксида графита. Оксид графита был синтезирован с применением модифицированного метода Хаммерса. Полученные образцы оксида графита были высушены методами термической обработки и сублимации. Для характеристики образцов использовали результаты рентгенофазового анализа, инфракрасной и ультрафиолетовой спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии, динамического светорассеяния и фотонно-корреляционной спектроскопии. Количество кислородсодержащих групп оксида графита определяли из результатов титрования по Бозму. Согласно данным рентгенофазового анализа, использование изопропилового спирта в процессе промывки позволяет достичь более эффективной очистки продукта от примесей непрореагировавшего графита и восстановленного оксида графита по сравнению с традиционным применением дистиллированной воды. Были выявлены существенные различия в размерах частиц полученных образцов. Наибольший размер агломератов в водных растворах характерен для оксида графита, промытого изопропиловым спиртом (6,5 мкм), а наименьший – для оксида графита, промытого диметилсульфоксидом (1,2 мкм). Согласно результатам титрования по Бозму, образец оксида графита, промытый изопропиловым спиртом, имеет наибольшее количество карбоксильных и лактонных групп по сравнению с другими образцами, что согласуется с данными ультрафиолетовой и инфракрасной спектроскопии. Использование разных промывающих растворителей дает возможность получить оксид графита разной морфологии, что может быть полезным для получения материалов с различными механическими и сорбционными свойствами. Полученные результаты дают основание предполагать, что изопропиловый спирт может стать перспективной заменой воде на стадии промывки оксида графита. Его применение может открыть новые возможности для оптимизации технологического процесса получения оксида графита и его функционализации.

Ключевые слова: оксид графита, органические растворители, диметилсульфоксид, изопропиловый спирт, сублимационная сушка, функциональные группы

Благодарности. Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования (отдел структурных исследований) Института органической химии им. Н.Д. Зелинского (г. Москва, Россия).

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, бюджетная тема «Создание нового поколения нанесенных функциональных материалов, FRES-2024-0002».

Для цитирования: Осколкова О.Н., Гнатовская В.В., Выликов Е.А., Хомутова Е.В., Труш Д.Т., Ларин А.А. [и др.]. Влияние органических растворителей на морфологию оксида графита, синтезированного по методу Хаммерса // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2026. Т. 16. N 2. С. 174–184. DOI: 10.21285/achb.1044. EDN: BUYQXS.

Effect of organic solvents on the morphology of graphite oxide synthesized by the Hummers method

Oksana N. Oskolkova*✉, Viktoriya V. Gnatovskaya*, Elena A. Vylivok*,
Ekaterina V. Khomutova*, Darya T. Trush*, Alexander A. Larin***,
Anton A. Zabolotnyi***, Darya E. Naimushina****

*L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry, Donetsk, Russian Federation

**N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

***Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

****Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, Donetsk, Russian Federation

Abstract. In this study, we investigate the effect of various solvents on the structural characteristics of graphite oxide synthesized using a modified Hummers method. The resulting graphite oxide samples were dried by both thermal treatment and freeze drying. Sample characterization was performed using X-ray diffraction, infrared and ultraviolet spectroscopy, scanning electron microscopy, dynamic light scattering, and photon correlation spectroscopy. The content of oxygen-containing functional groups in graphite oxide was determined by Boehm titration. According to the X-ray diffraction data, the use of isopropyl alcohol during the washing stage enabled a more efficient removal of impurities, including unreacted graphite and reduced graphite oxide, than the conventional use of distilled water. Significant differences in the particle size of the obtained samples were observed. The graphite oxide samples washed with isopropyl alcohol exhibited the largest agglomerates in aqueous suspensions (6.5 μm), whereas those washed with dimethyl sulfoxide exhibited the smallest agglomerates (1.2 μm). Boehm titration revealed that the graphite oxide sample washed with isopropyl alcohol contained the highest concentration of carboxyl and lactone groups among all the samples, which agreed well with the infrared and ultraviolet spectroscopic data. The use of different washing solvents enables the production of graphite oxide with different morphologies, which may be advantageous for the development of materials with tailored mechanical and sorption properties. The results obtained suggest that isopropyl alcohol may serve as a promising alternative to distilled water during the washing stage of graphite oxide synthesis. Its application may offer new opportunities for optimizing the graphite oxide production process and its subsequent functionalization.

Keywords: graphite oxide; organic solvents; dimethyl sulfoxide; isopropyl alcohol; freeze-drying; functional groups

Acknowledgements. The authors are grateful to the Shared Research Center (Department of Structural Studies) of N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia).

Funding. The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation supported this work, budget topic "Creation of a New Generation of Applied Functional Materials, FRES-2024-0002".

For citation: Oskolkova O.N., Gnatovskaya V.V., Vylivok E.A., Khomutova E.V., Trush D.T., Larin A.A., et al. Effect of organic solvents on the morphology of graphite oxide synthesized by the Hummers method. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2026;16(2):174-184. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.1044. EDN: BUYQXS.

ВВЕДЕНИЕ

Модификация поверхности оксида графита посредством ковалентных связей представляет собой одно из перспективных направлений в области графеновой химии, которое открывает возможности для создания инновационных функциональных материалов [1–3].

В процессе модификации происходит присоединение целевых молекул и полимерных структур к поверхности оксида графита. Это осуществляется через реакции амидирования и этерификации, которые протекают с участием кислородсодержащих функциональных групп материала [4–6].

Важно отметить, что характеристики оксида графита, включая его структуру и свойства, определяются не

только методом синтеза, но и последующими этапами обработки. Существенное влияние оказывают процедуры промывки и высушивания полученного материала [7–9].

Основной целью данного исследования стало изучение воздействия различных растворителей на структурные характеристики оксида графита. Это исследование направлено на понимание того, как выбор растворителя может влиять на конечные свойства материала и его пригодность для дальнейшего применения в различных технологических процессах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Лимитирующей стадией при окислении графита является процесс диффузии окислителя в межслоевое

пространство графита, поэтому классический метод синтеза оксида графита (ОГ) по методу Хаммерса [10] был модифицирован [11]. В классическом методе Хаммерса этот этап не оптимизировался, что приводило к неоднородности окисления и снижению выхода продукта. Модификация метода заключается в предварительной 1-часовой выдержке смеси перманганата калия с графитом при пониженной температуре. Выдержка при пониженной температуре (0 ± 2 °C) замедляет экзотермическую реакцию окисления, что позволяет KMnO_4 диффундировать в межслоевое пространство графита до начала интенсивной реакции [12]. Это позволяет обеспечить равномерное распределение окислителя по всей массе графита, улучшить контакт реагентов на межслоевом уровне, повысить степень окисления графитовой структуры, увеличить выход целевого продукта и улучшить качество получаемого оксида графита. Исходный ОГ получали из очищенного природного чешуйчатого графита Formula BT 2935APH (Superior Graphite Co., США, содержание углерода 99,95%, размер 90% его частиц составляет менее 32 мкм). Смешивание 1 г графита с 0,5 г NaNO_3 и 23 см³ концентрированной H_2SO_4 проводили в колбе при комнатной температуре при постоянном перемешивании на магнитной мешалке со скоростью 400–500 об/мин. После помещали колбу в ледяную баню и охлаждали реакционную смесь до температуры 0 ± 2 °C. Не прекращая перемешивания в течение 20 мин, вносили 3 г KMnO_4 ; смесь выдерживали при температуре 0 ± 2 °C в течение 1 ч. По истечении часа реакционную смесь нагревали до 35–40 °C в течение 30 мин. Далее к смеси добавляли 46 см³ дистиллированной воды, нагревали до 90–95 °C и выдерживали при этой температуре 15 мин. Затем добавляли 140 см³ охлажденной дистиллированной воды и 50 см³ 3 %-го водного раствора H_2O_2 . Полученный ОГ отделяли от реакционной смеси центрифугированием (2500–3000 об/мин, 5 мин) и декантацией. Промывку проводили дважды по 100 см³ теплого 2,5%-го раствора HCl (центрифугирование 5 мин, 2500–3000 об/мин). Затем каждый образец промывали по 3 раза по 100 см³ соответствующим растворителем: дистиллированной водой (ОГ(Вода)), безводным изопропиловым спиртом (ОГ(ИПС)) и безводным диметилсульфоксидом (ОГ(ДМСО)). Выбор метода сушки определялся физико-химическими свойствами используемых растворителей. Образец ОГ(ИПС) был высушен методом термообработки при 50 °C (температура кипения ИПС – 82,6 °C, что обеспечивает его полное удаление при мягком нагреве). Образцы ОГ(Вода) и ОГ(ДМСО) высушивали методом сублимации в лиофильной сушке EV-DF10A Top-press with manifold: для ОГ(Вода) – с целью предотвращения агрегации слоев, для ОГ(ДМСО) – ввиду высокой температуры кипения растворителя (189 °C), исключающей его полное удаление при умеренном нагреве.

Рентгенофазовый анализ. Особенности структуры ОГ исследовали методом рентгенофазового анализа с помощью дифрактометра ДРОН-3М с электронным управлением с установленным Fe-фильтром $\text{CoK}\alpha$ излучения ($\text{CoK}\alpha_1 = 1,78900$, $\text{CoK}\alpha_2 = 1,79283$, $I(\text{K}\alpha_2)/I(\text{K}\alpha_1) = 0,497$) со скоростью 2° (2θ)/мин в диапазоне углов $8^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ с шагом $0,03^\circ$. Для фазового анализа использовали программу Match! с базой данных PDF-2 (ICCD). Значения углов скольжения 2θ расчетные и эксперимен-

тальные оценивались с точностью ($\Delta 2\theta \pm 0,05$)°. Значения межплоскостных расстояний расчетные и экспериментальные оценивались с точностью ($\Delta d(00l) \pm 0,001$ нм). Для детального исследования микроструктуры и расчета профильных параметров профили рентгеновских рефлексов, соответствующих разным фазам, аппроксимировали функцией Войта. Количественное фазовое содержание W рассчитали по соотношению интегральных интенсивностей соответствующих рефлексов. Величины погрешностей приведены в соответствие с результатами расчетов. Уравнение Вульфа – Брэгга (1) было применено к отражению (001) для оценки расстояния между слоями, обозначенного как d . Уравнение Шеррера (2) с константой K , равной 0,9, использовалось для оценки среднего размера наночастиц, обозначенного как D . При учете, что уравнение Шеррера с константой $K = 0,9$ применимо к сферическим частицам, можно приравнять значение среднего размера наночастиц D к значению средней высоты слоев и рассчитать по формуле (3) среднее число слоев графена в упаковке n :

$$2 \times d \times \sin \theta = n \times \lambda, \quad (1)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения; n – порядок отражения; θ – угол дифракции (брегговский угол);

$$H = \frac{K \times \lambda}{\beta \times \cos \theta}, \quad (2)$$

где H – средний размер областей когерентного рассеяния (доменов, кристаллитов); K – безразмерный коэффициент формы частиц (постоянная Шеррера); β – ширина рефлекса на полувысоте по Лауэ (в единицах 2θ);

$$n = \frac{D}{a}. \quad (3)$$

Сканирующая электронная микроскопия. Оптимизация аналитических измерений проведена в рамках описанного ранее подхода [13]. Перед съемкой образцы помещали на поверхность алюминиевого столика диаметром 25 мм, фиксировали при помощи проводящего углеродного скотча и напыляли на них проводящий слой Au/Pd толщиной 10 нм при помощи метода магнетронного распыления, описанного ранее [14]. Микроструктуру образца изучали методом сканирующей электронной микроскопии с полевой эмиссией на электронном микроскопе Hitachi Regulus8230. Съемку изображений вели в режиме регистрации вторичных электронов при ускоряющем напряжении 5 кВ.

Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье. Инфракрасные (ИК) Фурье-спектры образцов ОГ были получены на спектрометре Bruker Alpha, оснащенном детектором на основе дейтерированного триглицинсульфата в матрице KBr, содержащей около 2% материала по массе. Измерения проводились в диапазоне от 400 до 4000 см⁻¹ с разрешением по волновому числу 4 см⁻¹, а данные представлены как среднее значение 16 сканирований для каждого образца.

Определение кислородсодержащих групп по Бозму [15–17]. Три точные навески ОГ массой, равной 0,1 г, помещали в три круглодонные колбы объемом 100 см³ и приливали по 25,0 см³ бидистиллированной воды.

Колбы закрывали пробками с газоотводными трубками. Растворы вакуумировали и дегазировали по 5 мин в ультразвуковой ванне. Затем колбы открывали и добавляли по 25,0 см³ 0,1 М растворов: в первую – карбоната натрия, во вторую – гидрокарбоната натрия, в третью – гидроксида натрия. Далее колбы закрывали, вакуумировали и обрабатывали 5 мин ультразвуком. Герметично закрытые колбы выдерживали 3 суток. Далее растворы фильтровали через бумажный фильтр, отбирали по 5,0 см³ фильтрата в колбы для титрования, в которые предварительно было помещено 50,0 см³ воды и 5,0 см³ 0,1 М соляной кислоты. Определение кислородсодержащих групп проводили методом потенциометрического кислотно-основного титрования. Титровали 0,1 М раствором натрия гидроксида с помощью микробюретки при постоянном перемешивании на магнитной мешалке. Титрование проводили в атмосфере инертного газа (Ar).

Количество функциональных групп (n , моль) находили по формуле (4):

$$n = C_{\text{исх}} \times V_{\text{исх}} - V_{\text{исх}} \frac{C_1 \times V_1 - C_2 \times V_2}{V_3}, \quad (4)$$

где $C_{\text{исх}}$ – исходная концентрация основания, моль/дм³; $V_{\text{исх}}$ – объем раствора основания в колбе, дм³; V_1, C_1 – объем и концентрация 0,1 М соляной кислоты, V_2, C_2 – объем и концентрация титранта 0,1 М гидроксида натрия; V_3 – объем аликвоты, дм³.

Количество кислородсодержащих функциональных групп на 1 г образца (X , моль/г) определяли по формуле (5):

$$X = \frac{n}{m}, \quad (5)$$

где m – масса навески ОГ, г.

Ультрафиолетовая спектроскопия. Ультрафиолетовые (УФ) спектры водных растворов образцов ОГ(ИПС) и ОГ(Вода) с концентрацией 0,4 г/дм³ и водный раствор ОГ(ДМСО) с концентрацией 0,2 г/дм³ были получены на спектрофотометре Helios Gamma. Пониженная концентрация раствора ОГ(ДМСО) обусловлена выраженной полидисперсностью данного образца (индекс полидисперсности $PI = 3,7$), что приводит к сильному рассеянию света при концентрации 0,4 г/дм³. В качестве контрольного раствора использовали дистиллированную воду. Для получения водных растворов ОГ навески растворяли в дистиллированной воде путем встряхивания.

Метод динамического светорассеяния и фотонно-корреляционной спектроскопии. Размер частиц водных образцов ОГ(ИПС), ОГ(Вода), ОГ(ДМСО) были определены с помощью анализатора динамического рассеивания Nanopin при угле рассеяния 90° и температуре 25 °С. Концентрация водных растворов ОГ составила 0,1 г/дм³.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 представлены дифрактограммы оксида графита, полученного по методике, описанной выше, с использованием различных промывающих жидкостей.

На основании данных рентгеновской дифракции можно выделить три группы рефлексов. Рефлекс 1 соответствует дифракционному пику (001), характерному для фазы ОГ, низкоинтенсивные рефлексы 2 и 3 относятся к фазам восстановленного оксида графита и графита, не прореагировавшего с окислителем, соответственно [18].

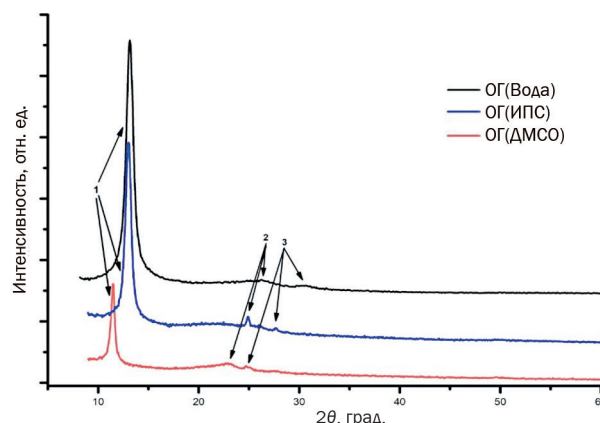


Рис. 1. Рентгенограммы оксида графита, полученные с использованием различных растворителей

Fig. 1. Graphite oxide X-ray diagram obtained by different solvents

Как видно из рис. 1, использование разных промывающих жидкостей приводит к изменению положения рефлексов на шкале 2θ , а также изменению формы и интенсивности примесных рефлексов восстановленного оксида графита и графита. Для ОГ(ДМСО) наблюдается более выраженное смещение рефлекса в сторону малых углов, что указывает на максимальное увеличение межплоскостного расстояния за счет интеграции растворителя в межслоевое пространство. В то же время в случае ДМСО интенсивность примесных рефлексов восстановленного оксида графита и графита возрастает, что указывает на рост содержания примесей в фазовом составе, однако степень кристалличности примесей остается на низком уровне, что также подтверждается наблюдаемым гало. Наиболее яркие изменения отмечаются при использовании ИПС. Рефлексы, относящиеся к фазам восстановленного оксида графита и графита, имеют узкую форму, что указывает на более однородную и регулярную упаковку слоев, формирующую дальний порядок вдоль оси c . При этом положение и форма пика (001), характерного для фазы ОГ, практически не изменяется по сравнению с ОГ(Вода).

Результаты расчетов, а также профильные параметры образцов ОГ, полученного с использованием различных промывающих жидкостей, приведены в табл. 1.

Как видно из результатов анализа, использование ИПС приводит к кратному снижению количества примесей по сравнению с образцом, полученным с использованием дистиллированной воды или ДМСО. Частицы ОГ(ИПС) представляют собой упакованные слоистые структуры размером ~14,2 нм, расстояние между слоями – ~0,78 нм, а число слоев в среднем составляет ~18–19. В случае использования ДМСО количество примесей восстановленного оксида графита и не вступившего в реакцию графита увеличивается. Частицы ОГ(ДМСО) также имеют форму слоистых структур размером ~22 нм, что в 2 раза больше размеров слоистых структур ОГ(Вода). Расстояние между слоями в ОГ(ДМСО) максимальное – ~0,89 нм. Однако частицы ОГ(ДМСО) являются самыми многослойными, число слоев в среднем составляет ~24–25, что, возможно, связано с удерживанием молекул растворителя между слоями ОГ за счет водородных связей и/или электростатических взаимодействий.

Таблица 1. Сравнение структурных параметров образцов, полученных на основе данных рентгеновской дифракции

Table 1. Comparison of structural parameters of samples obtained from X-ray diffraction

Фаза	$2\theta, ^\circ$	FWHM, $^\circ$	D, nm	d, nm	n	$W \pm 2\%$
ОГ(Вода)						
Оксид графита	13,15	0,8496	11,4	0,78	14-15	93,72
Восстановленный оксид графита	26,27	2,5102	3,9	0,39	10	5,40
Графит	30,67	1,5207	–	–	–	0,88
ОГ(ИПС)						
Оксид графита	13,05	0,6846	14,2	0,78	18-19	97,22
Восстановленный оксид графита	24,90	0,3159	31,2	0,41	75-76	2,35
Графит	27,66	0,2314	–	–	–	0,43
ОГ(ДМСО)						
Оксид графита	11,48	0,4404	22,0	0,89	24-25	85,50
Восстановленный оксид графита	22,89	1,0060	9,8	0,45	21-22	11,91
Графит	24,75	0,2722	36,2	0,42	86-87	2,59

Примечание. D – средний размер нанослоев; n – среднее количество графеновых слоев в нанослоях; d – среднее расстояние между слоями графена; FWHM – полуширина пика на уровне половины высоты; W – массовая доля фазы в объеме материала.

Отсутствие данных о среднем размере нанослоев, среднем количестве слоев и среднем межслоевом расстоянии для фазы графита при использовании в качестве растворителей дистиллированной воды и ИПС объясняется крайне низким содержанием данной фазы в объеме материала, что затрудняет расчеты.

Несмотря на кажущуюся эффективность ДМСО в улучшении структурного порядка основной фазы, снижение ее содержания в фазовом соотношении до 85,50% приводит к невозможности рассматривать ДМСО как альтернативу дистиллированной воде в качестве промывающей жидкости.

Использование ИПС является наиболее предпочтительным, поскольку позволяет эффективно подавить

примесные фазы, сохранить ключевые структурные характеристики фазы ОГ и при этом формирует более однородную и регулярную упаковку слоев вдоль оси с, перпендикулярной слоям.

Анализ изображений, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии (рис. 2), позволил исследовать морфологию полученных образцов ОГ. Образец ОГ(Вода) демонстрирует уникальную 3D пространственную ориентацию. Такая структура свидетельствует о сложной многоуровневой организации материала и может оказывать существенное влияние на его физико-химические свойства.

В отличие от образцов ОГ(Вода) частицы графена ОГ(ИПС) собраны в агломераты с параллельной ориентацией слоев

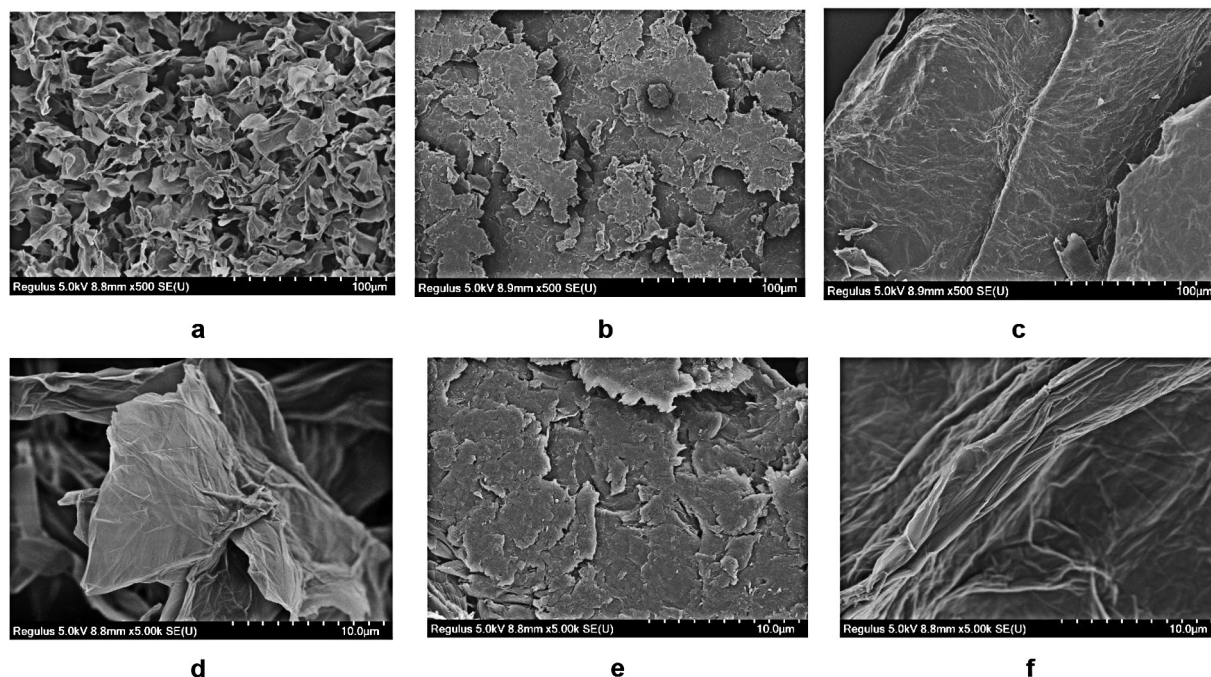


Рис. 2. Полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии изображения оксида графита, промытого разными растворителями: а, d – ОГ(Вода); b, e – ОГ(ИПС); c, f – ОГ(ДМСО)

Fig. 2. Obtained by scanning electron microscopy images of graphite oxide washed with various solvents:

a, d – GO(Water); b, e – GO(IPA); c, f – GO(DMSO)

в пространстве. Частицы графена ОГ(ИПС) более крупные по сравнению с частицами графена ОГ(Вода).

Образец ОГ(ДМСО) выделяется среди остальных образцов ОГ еще более крупными размерами частиц, что согласуется с данными рентгенофазового анализа. Это различие в морфологии может быть обусловлено специфическим взаимодействием частиц оксида графена с диметилсульфоксидом в процессе синтеза и промывки, как было отмечено выше.

Данные анализа, выполненного с помощью сканирующей электронной микроскопии, сопоставили с результатами фотонно-корреляционной спектроскопии (рис. 3). Оказалось, что водные растворы ОГ(ДМСО) характеризуются выраженной полидисперсностью по сравнению с суспензиями ОГ(Вода) и ОГ(ИПС). Так, P_i для растворов ОГ(Вода) составляет 0,5, для ОГ(ИПС) – 0,28, а для ОГ(ДМСО) – 3,7.

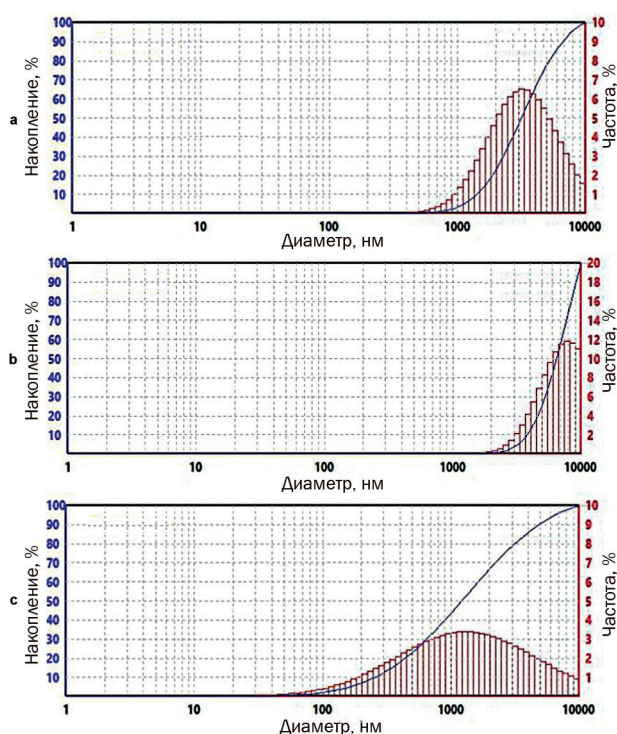


Рис. 3. Распределение частиц окисленного графита, промытого разными растворителями:

а – ОГ(Вода); б – ОГ(ИПС);

с – ОГ(ДМСО) по размерам в водной суспензии

Fig. 3. Particle size distribution of oxidized graphite washed with various solvents:

а – GO(Water); б – GO(IPA);

с – GO(DMSO) in an aqueous suspension

Наибольший размер агрегатов характерен для ОГ, промытого ИПС. Так, в водных растворах ОГ(ДМСО) средний размер агрегатов частиц ОГ был равен 1,2 мкм, в то время как для водных суспензий ОГ(Вода) это значение составило 3,2 мкм, а для ОГ(ИПС) – 6,5 мкм.

Таким образом, наблюдаемые различия в микроструктуре образцов ОГ указывают на то, что выбор растворителя существенно влияет не только на размер частиц, но и на общую морфологию материала.

УФ-спектры водных растворов ОГ дают характерные максимумы поглощения при 210–280 нм и плечо в

интервале длин волн при 300–320 нм (рис. 4), что хорошо согласуется с литературными данными [19, 7]. В УФ спектрах фенольные группы дают поглощения при 210 и 270 нм [20]. Согласно источнику [7], плечо в области 300–320 нм обусловлено $\pi \rightarrow \pi^*$ переходами карбонильных групп в ароматических соединениях. Несмотря на общее сходство УФ-спектров исследуемых образцов, на спектре раствора ОГ(ДМСО) идентифицируются максимум при 210 нм и два плеча при 270 и 310 нм, в то время как для образцов ОГ(ИПС) и ОГ(Вода) идентифицируются только максимумы при 270 и 310 нм. При этом следует отметить, что концентрация водного раствора ОГ(ДМСО) в 2 раза меньше, чем в растворах ОГ(ИПС) и ОГ(Вода). Из полученных спектров можно сделать предположение, что в образцах ОГ(ДМСО) количество фенольных групп больше, чем в образцах ОГ(ИПС) и ОГ(Вода). С целью подтверждения данного предположения были проанализированы ИК-спектры образцов ОГ, промытого разными растворителями.

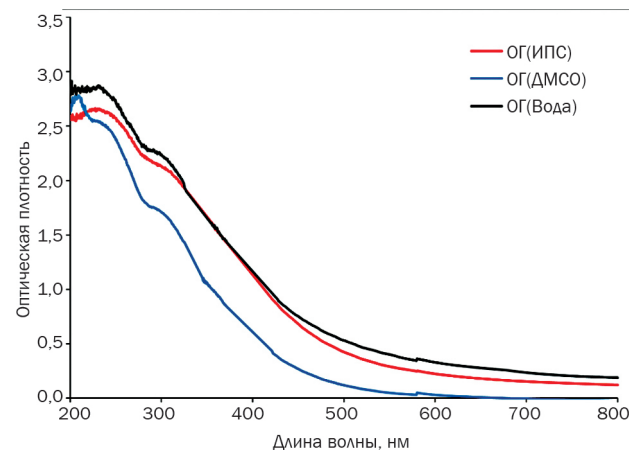


Рис. 4. Ультрафиолетовые спектры оксида графита, промытого разными растворителями

Fig. 4. Ultraviolet spectra of graphite oxide washed with different solvents

ИК-спектроскопические исследования (рис. 5) показали, что для всех образцов ОГ регистрируются общие полосы поглощения, характерные для оксида графита [21]. Так, полоса при 1724 см^{-1} обусловлена колебаниями растяжения связи $\text{C}=\text{O}$ карбонильных групп, поглощение при 1640 см^{-1} относят к вибрационным колебаниям $\text{C}=\text{C}$ связи ароматического кольца, но вследствие наложения колебаний $\text{O}-\text{H}$ связи адсорбированной воды в диапазоне $1580\text{--}1620 \text{ см}^{-1}$ эта полоса редко используется для анализа спектров оксида графита. Широкая полоса в диапазоне $1450\text{--}1350 \text{ см}^{-1}$ состоит из двух компонентов: асимметричных колебаний растяжения ковалентно связанных сульфатов при 1410 см^{-1} и полосы колебаний изгиба связи $\text{C}-\text{O}-\text{H}$ в фенольных группах при 1368 см^{-1} . Колебания растяжения связи $\text{C}-\text{O}$ спиртовых групп соотносят также с поглощением в интервале $1000\text{--}1100 \text{ см}^{-1}$. Колебания же в интервале $870\text{--}970 \text{ см}^{-1}$ авторы работы [21] отнесли к поглощению эпокси-групп. Более детальный анализ полученных спектров дает основание предполагать отсутствие значимого количества эпокси-групп в ОГ(Вода) по сравнению с ОГ(ИПС), так как в интер-

валах частот 870–930 см^{-1} отсутствуют полосы поглощения, характерные для них. На наличие значительного количества спиртовых групп для образцов, промытых ДМСО, указывает достаточно интенсивная и широкая полоса в интервале 1000–1100 см^{-1} , что согласуется с УФ спектрами. Однако наличие полосы поглощения колебания связи С–Н метильных групп при 2926 см^{-1} и полосы поглощения при 946 см^{-1} , характерной для колебания S=O связи, дает основание предположить наличие в образцах растворителя. Аналогичный вывод можно сделать и для образцов ОГ(ИПС), у которых на ИК-спектре определяется узкая полоса поглощения при 1049 см^{-1} С–О связи спиртовых групп, а также наличие сигналов метильных групп при 2978 см^{-1} . Таким образом, в ходе сопоставления данных ИК- и

УФ-спектроскопии было сделано предположение, что в образцах ОГ(ДМСО) должны преобладать спиртовые и карбоксильные группы, в то время как для образцов ОГ(Вода) количество карбоксильных групп должно быть меньше, чем для образцов, промытых ДМСО и ИПС. Сделанные предположения были проверены путем определения количества кислородосодержащих групп методом титрования по Бозму.

Из результатов титрования по Бозму (табл. 2) видно, что наибольшее суммарное количество функциональных групп характерно для образца ОГ(ИПС) (3,56 ммоль/г), при этом большая часть приходится на карбоксильные и лактонные группы, что определяет самые низкие значения pH для водных растворов образцов ОГ(ИПС). Следует также отметить, что для ОГ, промытого ДМСО, характерно наличие значительного количества фенольных групп. Результаты титрования в целом совпадают с данными УФ- и ИК-спектроскопии. Увеличение количества карбоксильных групп при использовании ИПС в качестве промывающей жидкости может быть следствием более полного окисления ОГ в результате наличия остаточного количества окислителя в межслоевом пространстве. Второй вероятной причиной может быть окисление самого ИПС остатками перманганата калия в кислой среде до уксусной кислоты с выделением CO_2 , что, возможно, является мешающим фактором при определении карбоксильных групп методом Бозма. Однако данное предположение требует дополнительных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно данным рентгенофазового анализа, использование ИПС в процессе промывки позволяет достичь более эффективной очистки продукта от примесей непрореагировавшего графита и восстановленного оксида графита по сравнению с традиционным применением дистиллированной воды. При этом были выявлены существенные различия в размерах частиц полученных образцов. Наибольшими по размеру оказались частицы ОГ(ДМСО) – в среднем ~22 нм, а наименьшим размером обладали частицы ОГ(Вода) – ~11 нм. При диспергировании в воде частицы ОГ агрегируют; наибольшей полидисперсностью обладают водные раствор ОГ(ДМСО), а наименьшей – ОГ(ИПС). PI для этих растворов составляет 3,7 и 0,28 соответственно. Таким образом, применение разных промывающих растворителей дает возможность получить ОГ разной морфологии, которые могут быть полезными для получения материалов с различными физическими свойствами. Так, частиц ОГ маленьких размеров могут быть полезны при получении материалов, где требуется высокая площадь поверхности. Крупные частицы могут

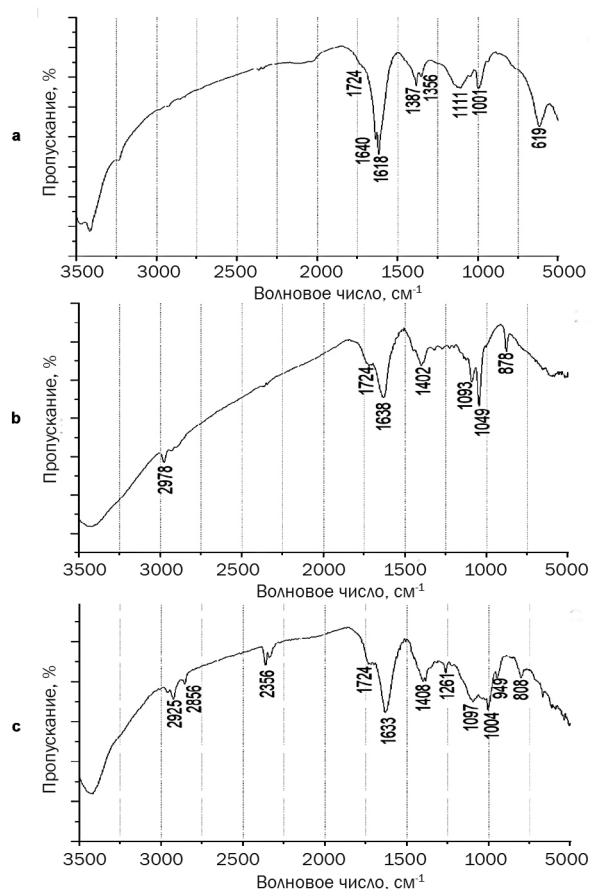


Рис. 5. Инфракрасные спектры: а – ОГ(Вода); б – ОГ(ИПС); с – ОГ(ДМСО)

Fig. 5. Infrared spectra: a – GO(Water); b – GO(IPA); c – GO(DMSO)

Таблица 2. Концентрации функциональных групп, определенные титрованием по методу Бозма

Table 2. Concentrations of functional groups determined by Boehm titration

Образец	pH	Содержание, ммоль/г			
		сумма функциональных групп	карбоксильные группы	лактонные группы	фенольные группы
ОГ(Вода)	4,047	1,89	0,22	1,39	0,28
ОГ(ИПС)	3,695	3,56	1,36	2,15	0,05
ОГ(ДМСО)	3,904	2,52	0,42	1,41	0,69

быть подходящими для материалов с высокой механической прочностью. Кроме того, согласно данным УФ- и ИК-спектроскопии и результатам титрования по Бозму, образцы ОГ(ИПС) и ОГ(ДМСО) имеют наибольшее количество карбоксильных и лактонных групп по сравнению с образцами ОГ, промытыми водой, что определяет перспективность их применения для

ковалентной функционализации. Однако более однородными по фазе получаются образцы ОГ, промытые ИПС, что дает основание предполагать перспективность использования ИПС вместо воды на стадии промывки оксида графита. Его применение может открыть новые возможности для оптимизации технологического процесса получения ОГ и его функционализации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cao Z., Quintano V., Joshi R. Covalent functionalization of graphene oxide // *Carbon Reports*. 2023. Vol. 2, no. 4. P. 199–205. DOI: 10.7209/carbon.020401.
2. Kuila T, Bose S., Mishra A.K., Khanra P., Kim N.H., Lee J.H. Chemical functionalization of graphene and its applications // *Progress in Materials Science*. 2012. Vol. 57. P. 1061–1105. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2012.03.002.
3. Georgakilas V., Tiwari J.N., Kemp K.C., Perman J.A., Bourlinos A.B., Kim K.S., et al. Noncovalent functionalization of graphene and graphene oxide for energy materials, biosensing, catalytic, and biomedical applications // *Chemical Reviews*. 2016. Vol. 116, no. 9. P. 5464–5519. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00620.
4. Yan Q.-L., Cohen A., Petrutik N., Shlomovich A., Burstein L., Pang S.-P., Gozin M. Highly insensitive and thermostable energetic coordination nanomaterials based on functionalized graphene oxides // *Journal of Materials Chemistry A*. 2016. Vol. 4, no. 25. P. 9941–9948. DOI: 10.1039/c6ta03510h.
5. Huang G., Chen Z., Li M., Yang B., Xin M., Li S., Yin Z. Surface functional modification of graphene and graphene oxide // *Acta Chimica Sinica*. 2016. Vol. 74, no. 10. P. 789–799. DOI: 10.6023/A16070360.
6. Yu W., Sisi L., Haiyan Y., Jie L. Progress in the functional modification of graphene/graphene oxide: a review // *RSC Advances*. 2020. Vol. 10, no. 26. P. 15328–15345. DOI: 10.1039/D0RA01068E.
7. Dimiev A., Kosynkin D.V., Alemany L.B., Chaguine P., Tour J.M. Pristine graphite oxide // *Journal of the American Chemical Society*. 2012. Vol. 134, no. 5. P. 2815–2822. DOI: 10.1021/ja211531y.
8. Панина Л.В., Ефимова О.С., Попова А.Н., Исмаилов З.Р. Влияние условий сушки на структурные характеристики пленок оксида графена, полученных из пенографита // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2021. N 6. С. 5–12. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-5-12. EDN: JEAAY.
9. Zaaba N.I., Foo K.L., Hashim U., Tan S.J., Liu W.W., Voon C.H. Synthesis of graphene oxide using modified hummers method: solvent influence // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 184. P. 469–477. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.118.
10. Hummers W.S., Offeman R.E. Preparation of graphitic oxide // *Journal of the American Chemical Society*. 1958. Vol. 80, no. 6. P. 1339. DOI: 10.1021/ja01539a017.
11. Алемасова Н.В., Сухова С.Р., Кравченко В.В., Зозуля М.А., Прокофьева Л.А., Бурховецкий В.В. [и др.]. Влияние ультразвука на структуру восстановленного тиомочевинной оксида графита // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2020. N 12. С. 765–774. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.765. EDN: KKHTHZ.
12. Dimiev A.M., Tour J.M. Mechanism of graphene oxide formation // *ACS Nano*. 2014. Vol. 8, no. 3. P. 3060–3068. DOI: 10.1021/nn500606a.
13. Kachala V.V., Khemchyan L.L., Kashin A.S., Orlov N.V., Grachev A.A., Zaleskiy S.S., Ananikov V.P. Target-oriented analysis of gaseous, liquid and solid chemical systems by mass spectrometry, nuclear magnetic resonance spectroscopy and electron microscopy // *Russian Chemical Reviews*. 2013. Vol. 82, no. 7. P. 648–685. DOI: 10.1070/RC2013v082n07ABEH004413. EDN: RFQAND.
14. Kashin A.S., Ananikov V.P. A SEM study of nano-sized metal films and metal nanoparticles obtained by magnetron sputtering // *Russian Chemical Bulletin*. 2011. Vol. 60. P. 2602–2607. DOI: 10.1007/s11172-011-0399-x.
15. Петренко Д.Б. Модифицированный метод Бозма для определения гидроксильных групп в углеродных нанотрубках // *Вестник Московского государственного областного университета*. 2012. N 1. С. 157–160. EDN: OQOVZT.
16. Schönherr J., Buchheim J.R., Scholz P., Adelhelm P. Boehm titration revisited (part I): Practical aspects for achieving a high precision in quantifying oxygen-containing surface groups on carbon materials // *C – Journal of Carbon Research*. 2018. Vol. 4, no. 2. P. 21. DOI: 10.3390/c4020021.
17. Schönherr J., Buchheim J.R., Scholz P., Adelhelm P. Boehm titration revisited (part II): Practical aspects for achieving a high precision in quantifying oxygen-containing surface groups on carbon materials // *C – Journal of Carbon Research*. 2018. Vol. 4, no. 2. P. 22. DOI: 10.3390/c4020022.
18. Stobinski L., Lesiak B., Malolepszy A., Mazurkiewicz M., Mierzwa B., Zemek J., et al. Graphene oxide and reduced graphene oxide studied by the XRD, TEM and electron spectroscopy methods // *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomenon*. 2014. Vol. 195. P. 145–154. DOI: 10.1016/j.elspec.2014.07.003.
19. Lai Q., Zhu S., Luo X., Zou M., Huang S. Ultraviolet-visible spectroscopy of graphene oxides // *AIP Advances*. 2012. Vol. 2, no. 3. P. 032146. DOI: 10.1063/1.4747817.
20. Aluker N.L., Lavrentieva A.L., Suzdaltseva Y.M. Direct optical research methods in the analytics of phenol // *Optics and Spectroscopy*. 2020. Vol. 128, no. 3. P. 422–428. DOI: 10.1134/S0030400X20030042. EDN: GPGGIF.
21. Brusko V., Khannanov A., Rakhmatullin A., Dimiev A.M. Unraveling the infrared spectrum of graphene oxide // *Carbon*. 2024. Vol. 229. P. 119507. DOI: 10.1016/j.carbon.2024.119507.

REFERENCES

1. Cao Z., Quintano V., Joshi R. Covalent functionalization of graphene oxide. *Carbon Reports*. 2023;2(4):199-205. DOI: 10.7209/carbon.020401.
2. Kuila T, Bose S., Mishra A.K., Khanra P., Kim N.H., Lee J.H. Chemical functionalization of graphene and its applications. *Progress in Materials Science*. 2012;57:1061-1105. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2012.03.002.
3. Georgakilas V., Tiwari J.N., Kemp K.C., Perman J.A., Bourlinos A.B., Kim K.S., et al. Noncovalent functionalization of graphene and graphene oxide for energy materials, bio-sensing, catalytic, and biomedical applications. *Chemical Reviews*. 2016;116(9):5464-5519. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00620.
4. Yan Q.-L., Cohen A., Petrutik N., Shlomovich A., Burstein L., Pang S.-P., Gozin M. Highly insensitive and thermostable energetic coordination nanomaterials based on functionalized graphene oxides. *Journal of Materials Chemistry A*. 2016;4(25):9941-9948. DOI: 10.1039/c6ta03510h.
5. Huang G., Chen Z., Li M., Yang B., Xin M., Li S., Yin Z. Surface functional modification of graphene and graphene oxide. *Acta Chimica Sinica*. 2016;74(10):789-799. (In Chinese). DOI: 10.6023/A16070360.
6. Yu W., Sisi L., Haiyan Y., Jie L. Progress in the functional modification of graphene/graphene oxide: a review. *RSC Advances*. 2020;10(26):15328-15345. DOI: 10.1039/D0RA01068E.
7. Dimiev A., Kosynkin D.V., Alemany L.B., Chaguine P., Tour J.M. Pristine graphite oxide. *Journal of the American Chemical Society*. 2012;134(5):2815-2822. DOI: 10.1021/ja211531y.
8. Panina L.V., Efimova O.S., Popova A.N., Ismagilov Z.R. Influence of drying conditions on structural characteristics of graphene oxide films obtained from penographite. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2021;6:5-12. (In Russian). DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-5-12. EDN: JEAAY.
9. Zaaba N.I., Foo K.L., Hashim U., Tan S.J., Liu W.W., Voon C.H. Synthesis of graphene oxide using modified hummers method: solvent influence. *Procedia Engineering*. 2017;184:469-477. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.118.
10. Hummers W.S., Offeman R.E. Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*. 1958;80(6):1339. DOI: 10.1021/ja01539a017.
11. Alemasova N.V., Sukhova S.R., Kravchenko V.V., Zozulya M.A., Prokofieva L.A., Burkhovetskiy V.V., Savoskin M.V. Sonication impact on the structure of graphite oxide reduced by thiourea. *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. 2020;12:765-774. (In Russian). DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.765. EDN: KKHTHZ.
12. Dimiev A.M., Tour J.M. Mechanism of graphene oxide formation. *ACS Nano*. 2014;8(3):3060-3068. DOI: 10.1021/nn500606a.
13. Kachala V.V., Khemchyan L.L., Kashin A.S., Orlov N.V., Grachev A.A., Zaleskiy S.S., Ananikov V.P. Target-oriented analysis of gaseous, liquid and solid chemical systems by mass spectrometry, nuclear magnetic resonance spectroscopy and electron microscopy. *Russian Chemical Reviews*. 2013;82(7):648-685. DOI: 10.1070/RC2013v-082n07ABEH004413. EDN: RFQAND.
14. Kashin A.S., Ananikov V.P. A SEM study of nanosized metal films and metal nanoparticles obtained by magnetron sputtering. *Russian Chemical Bulletin*. 2011;60:2602-2607. DOI: 10.1007/s11172-011-0399-x.
15. Petrenko D.B. Modified method Boehm for determination of hydroxy groups in carbon nanotubes. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta*. 2012;1:157-160. (In Russian). EDN: OQOVZT.
16. Schönherr J., Buchheim J.R., Scholz P., Adelhelm P. Boehm titration revisited (part I): Practical aspects for achieving a high precision in quantifying oxygen-containing surface groups on carbon materials. C – *Journal of Carbon Research*. 2018;4(2):21. DOI: 10.3390/c4020021.
17. Schönherr J., Buchheim J.R., Scholz P., Adelhelm P. Boehm titration revisited (part II): Practical aspects for achieving a high precision in quantifying oxygen-containing surface groups on carbon materials. C – *Journal of Carbon Research*. 2018;4(2):22. DOI: 10.3390/c4020022.
18. Stobinski L., Lesiak B., Malolepszy A., Mazurkiewicz M., Mierzwa B., Zemek J., et al. Graphene oxide and reduced graphene oxide studied by the XRD, TEM and electron spectroscopy methods. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomenon*. 2014;195:145-154. DOI: 10.1016/j.elspec.2014.07.003.
19. Lai Q., Zhu S., Luo X., Zou M., Huang S. Ultraviolet-visible spectroscopy of graphene oxides. *AIP Advances*. 2012;2(3):032146. DOI: 10.1063/1.4747817.
20. Aluker N.L., Lavrentieva A.L., Suzdaltseva Y.M. Direct optical research methods in the analytics of phenol. *Optics and Spectroscopy*. 2020;128(3):422-428. DOI: 10.1134/S0030400X20030042. EDN: GPGGIF.
21. Brusko V., Khannanov A., Rakhmatullin A., Dimiev A.M. Unraveling the infrared spectrum of graphene oxide. *Carbon*. 2024;229:119507. DOI: 10.1016/j.carbon.2024.119507.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Осколкова Оксана Николаевна,
младший научный сотрудник,
Институт физико-органической химии
и углехимии им. Л.М. Литвиненко,
283048, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 70,
Российская Федерация,
✉ Oskolkovaoksana1@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0007-5512-5299>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oksana N. Oskolkova,
Junior Researcher,
L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic
and Coal Chemistry,
70, Rosa Luxemburg St., Donetsk, 283048,
Russian Federation,
✉ Oskolkovaoksana1@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0007-5512-5299>

Гнатовская Виктория Валерьевна,
младший научный сотрудник,
Институт физико-органической химии
и углехимии им. Л.М. Литвиненко,
283048, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 70,
Российская Федерация,
vicktoria.gnatovskaya@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0002-3855-620X>

Выликов Елена Андреевна,
техник,
Институт физико-органической химии
и углехимии им. Л.М. Литвиненко,
283048, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 70,
Российская Федерация,
alena.viliwok@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0000-4078-5680>

Хомутова Екатерина Валерьевна,
к.б.н., старший научный сотрудник,
Институт физико-органической химии
и углехимии им. Л.М. Литвиненко,
283048, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 70,
Российская Федерация,
ek.khomutova75@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8568-5288>

Труш Дарья Тарасовна,
младший научный сотрудник,
Институт физико-органической химии
и углехимии им. Л.М. Литвиненко,
283048, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 70,
Российская Федерация,
kurilenckodash@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0006-1758-231X>

Ларин Александр Александрович,
к.х.н.,
старший научный сотрудник,
заведующий лабораторией,
Институт физико-органической химии
и углехимии им. Л.М. Литвиненко,
283048, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 70,
Российская Федерация,
старший научный сотрудник,
Институт органической химии
им. Н.Д. Зелинского Российской академии наук,
119991, г. Москва, Ленинский проспект, 47,
Российская Федерация,
al_larin@ioc.ac.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7862-2895>

Заболотный Антон Андреевич,
младший научный сотрудник,
Южный федеральный университет,
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194,
Российская Федерация,
zabolotnyi@sfedu.ru
<https://orcid.org/0009-0000-1294-0890>

Viktoriya V. Gnatovskaya,
Junior Researcher,
L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic
and Coal Chemistry,
70, Rosa Luxemburg St., Donetsk, 283048,
Russian Federation,
vicktoria.gnatovskaya@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0002-3855-620X>

Elena A. Vylivok,
Technician,
L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic
and Coal Chemistry,
70, Rosa Luxemburg St., Donetsk, 283048,
Russian Federation,
alena.viliwok@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0000-4078-5680>

Ekaterina V. Khomutova,
Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,
L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic
and Coal Chemistry,
70, Rosa Luxemburg St., Donetsk, 283048,
Russian Federation,
ek.khomutova75@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8568-5288>

Darya T. Trush,
Junior Researcher,
L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic
and Coal Chemistry,
70, Rosa Luxemburg St., Donetsk, 283048,
Russian Federation,
kurilenckodash@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0006-1758-231X>

Alexander A. Larin,
Cand. Sci. (Chemistry),
Senior Researcher, Head of the Laboratory,
L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic
and Coal Chemistry,
70, Rosa Luxemburg St., Donetsk, 283048,
Russian Federation,
Senior Researcher,
N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry,
Russian Academy of Sciences,
47, Leninsky Ave., Moscow, 119991,
Russian Federation,
al_larin@ioc.ac.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7862-2895>

Anton A. Zabolotnyi,
Junior Researcher,
Southern Federal University,
194, Stachki Ave., Rostov-on-Don, 344090,
Russian Federation,
zabolotnyi@sfedu.ru
<https://orcid.org/0009-0000-1294-0890>

Наймушина Дарья Евгеньевна,
инженер-исследователь,
Донецкий физико-технический
институт им. А.А. Галкина,
283048, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 72,
Российская Федерация,
musia.2014@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0004-8829-5698>

Darya E. Naimushina,
Research Engineer,
Galkin Donetsk Institute
for Physics and Engineering,
72, Rosa Luxemburg St., Donetsk, 283048,
Russian Federation,
musia.2014@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0004-8829-5698>
data curation, validation, project administration,
supervision, funding acquisition, editing.
Darya T. Trush – investigation, validation.

Вклад авторов

О.Н. Осолкова – проведение исследования, валидация результатов, написание черновика рукописи.
В.В. Гнатовская – проведение исследования, валидация результатов.
Е.А. Выликов – проведение исследования, валидация результатов.
Е.В. Хомутова – разработка концепции, курирование данных, валидация результатов, административное руководство исследовательским проектом, научное руководство, получение финансирования, редактирование рукописи.
Д.Т. Труш – проведение исследования, валидация результатов.
А.А. Ларин – разработка концепции, курирование данных, научное руководство, редактирование рукописи.
А.А. Заболотный – проведение исследования, формальный анализ, предоставление ресурсов.
Д.Е. Наймушина – формальный анализ, предоставление ресурсов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 28.10.2025.
Одобрена после рецензирования 15.01.2026.
Принята к публикации 17.06.2026.

Contribution of the authors

Oksana N. Oskolkova – investigation, validation, writing – original draft.
Viktoriya V. Gnatovskaya – investigation, validation.
Elena A. Vylivok – investigation, validation.
Ekaterina V. Khomutova – conceptualization, data curation, validation, project administration, supervision, funding acquisition, editing.
Darya T. Trush – investigation, validation.
Alexander A. Larin – conceptualization, data curation, supervision, editing.
Anton A. Zabolotnyi – investigation, formal analysis, resources.
Darya E. Naimushina – formal analysis, resources.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 28.10.2025.
Approved after reviewing 15.01.2026.
Accepted for publication 17.06.2026.