

УДК 538.911

DOI 10.25587/2222-5404-2023-20-3-33-41

Получение турбостратного графена из пластиковых отходов

А. Р. Прокопьев ✉, Е. П. Неустроев, Н. Н. Лоскин, П. В. Винокуров, З. И. Евсеев, Д. Н. Попов

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

✉ aisenprokopiev@mail.ru

Аннотация. С момента открытия двумерной гексагональной аллотропной модификации углерода – графена углеродные материалы и их производные привлекают все более пристальное внимание исследователей всего мира благодаря своим уникальным электрическим, оптическим и механическим свойствам. Структура и свойства таких наноматериалов представляют интерес для многих практических приложений, например, в электронике, строительстве, космической промышленности. С другой стороны, в последние годы все острее становится проблема утилизации пластиковых отходов. Накопление таких отходов в некоторых регионах мира уже носит характер экологической катастрофы. В статье представлены результаты исследования углеродных порошков, полученных из пластиковых отходов (ПО) полиэтилентерефталата (PET) и полипропилена (PP). В работе предложена методика термообработки и последующего СВЧ-воздействия, которая позволяет получать турбостратный графен из ПО. Показано, что СВЧ-воздействие влияет на структуру образцов PET и повышает электропроводность материалов, полученных из ПО PP.

Ключевые слова: турбостратный графен, аморфный углерод, пиролиз, термообработка, СВЧ-воздействие, спектры комбинационного рассеяния света, флэш-графен.

Работа выполнена в рамках НИР «Исследование и разработка технологии получения «флэш»-графена из пластиковых и биологических отходов методом теплового удара для применения в области упрочняющих добавок» Программы комплексных научных исследований в Республике Саха (Якутия), направленных на ее научно-технологическое развитие на 2020–2024 годы, в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRG - 2022 - 0011), и при поддержке проектной лаборатории SparkLab от Sinet Spark.

Для цитирования: Прокопьев А. Р., Неустроев Е. П., Лоскин Н. Н., Винокуров П. В., Евсеев З. И., Попов Д. Н. Получение турбостратного графена из пластиковых отходов. Вестник СВФУ. 2023, Т. 20, №3. С. 33–41. DOI: 10.25587/2222-5404-2023-20-3-33-41

Turbostratic graphene from plastic waste

A. R. Prokopenko ✉, E. P. Neustroev, N. N. Loskin, P. V. Vinokurov, Z. I. Evseev, D. N. Popov

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

✉ aisenprokopiev@mail.ru

Abstract. Since the discovery of two-dimensional hexagonal allotropic modification of carbon–graphene, carbon materials and their derivatives have attracted increasing attention from researchers around the world because of their unique electrical, optical, and mechanical properties. The structure and properties of such nanomaterials are of interest for many practical applications, such as in the electronics, construction, and space industries. However, in recent years, the problem of recycling plastic waste has become increasingly severe. The accumulation of such waste in some regions of the world is an environmental disaster. This paper presents the results of the study on carbon powders obtained from the plastic wastes of polyethylene terephthalate (PET) and polypropylene (PP) by pyrolysis, thermal annealing, and subsequent microwave exposure. This work proposes a technique for heat treatment and subsequent microwave exposure that makes it possible to obtain turbostratic

© Прокопьев А. Р., Неустроев Е. П., Лоскин Н. Н., Винокуров П. В., Евсеев З. И., Попов Д. Н., 2023

graphene. The microwave exposure affected the structure of the PET samples and increased the electrical conductivity of the materials obtained from PP waste.

Keywords: turbostratic graphene, amorphous carbon, pyrolysis, thermal annealing, microwave exposure, Raman spectrum, flash graphene.

This article was carried out within the framework of the research work “Research and development of technology for obtaining “flash” graphene from plastic and biological waste by the method of thermal shock for use in the field of hardening additives” of the Program of Integrated Scientific Research in the Republic of Sakha (Yakutia), aimed at its scientific and technological development in 2020-2024, within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSRG - 2022 - 0011), and with the support of the SparkLab design laboratory from Sinet Spark.

For citation: Prokopen A. R., Neustroev E. P., Loskin N. N., Vinokurov P. V., Evseev Z. I., Popov D. N. Turbostratic graphene from plastic waste. 2023, Vol. 20, No. 3. Pp. 33–41. DOI: 10.25587/2222-5404-2023-20-3-33-41

Введение

В последние годы в мире остро встала проблема утилизации пластиковых отходов (ПО), которые наносят значительный вред экологии. В настоящее время предлагаются различные способы переработки и повторного применения отходов пластика [1]. Одним из таких перспективных методов является переработка отходов пластика в углеродные наноматериалы. Углеродные материалы, такие как графен и их производные, привлекают к себе внимание благодаря своим уникальным электрическим, оптическим, механическим свойствам [2]. Структура таких наноматериалов позволяет их применять во многих практических приложениях, например, таких как наполнители битумов и конструкционных материалов [1], изготовление суперконденсаторов [3]. В настоящее время предлагаются несколько подходов для получения углеродных материалов из отходов пластика [1, 4–8]. Общей основой этих методов является термическое разложение углеродного соединения на отдельные компоненты при температурах от 500 °С до 1300 °С [1]. Как указывается в работе Цуй и др. [9], самые высокие выходы многослойных графеновых чешуек (до 43% по масс.) были получены при использовании полиэтилена (PE), полипропилена (PP) и полистирена (PS). Несмотря на имеющиеся достижения в области получения графеноподобных структур, оптимальный метод, отвечающий требованиям масштабного производства, экологичности и экономической эффективности, не найден. Следует отметить, что, кроме термического разложения, быстрая графитизация может осуществляться методом микроволнового нагрева [10–14]. С этой стороны представляет интерес исследование воздействия термической обработки и СВЧ-волн на пластиковые отходы с целью повышения процента выхода и качества графеноподобных структур.

Экспериментальная часть

Синтез углеродных порошков был проведен двумя различными методами термической обработки. В первом методе измельченные в бытовой мельнице отходы PP массой 5 г были помещены в закрытый графитовый тигель. Обработка ПО проводилась в муфельной печи при температуре $T = 950$ °С длительностью до 1,5 ч в воздушной атмосфере. Во втором методе была выполнена предварительная карбонизация в специально сконструированной вакуумной камере емкостью 3 л. К двум медным электродам внутри камеры подключался нагревательный элемент в виде нихромовой нити с диаметром сечения 1,5 мм. Предварительно измельченные ПО PP и PET были помещены в керамическую подложку внутри камеры. К электродам подавалось напряжение 12 В, что приводило к нагреву образцов до 900 °С. Процесс пиролиза ПО

проводился в атмосфере аргона длительностью до 20 мин. После этого полученные образцы были измельчены до состояния мелкодисперсного порошка. Термообработанные двумя указанными методами порошки были нанесены на подложку диоксида кремния (SiO_2). Для этого использовался эпоксидный грунт Н7 (Воронеж, Россия). Полученные образцы были подвергнуты обработке СВЧ-волнами мощностью $P = 1 \text{ кВт}$ и длительностью от 5 (*PP*, *PET1*) до 7 (*PET2*) мин в лабораторной микроволновой системе (Milestone MLS 1200 Mega, Италия). После СВЧ-воздействия наблюдалось спекание частичек углеродных порошков. Электрические контакты изготовлены на основе серебряной токопроводящей пасты при температуре 120 °С длительностью 15 мин. Обработанные порошки были исследованы методами спектроскопии комбинационного рассеяния (КРС) (NTegra Spectra, Зеленоград, Россия), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (JEOL 7800F, Япония), рентгеноэнергодисперсионной спектроскопии (РЭДС), УФ-ИК микроскопии в ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном диапазонах (Spotlight 200i, Великобритания). Измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) проведены на постоянном (ASEC-03, Зеленоград, Россия) и на переменном (АКТАКОМ АММ-3046, Россия) токах в диапазоне напряжений от -1 до +1 В. Из полученных ВАХ были определены слоевые сопротивления образцов.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлено СЭМ-изображение образца *PET2*. Из рис. 1 видно, что полученный материал представляет собой мелкодисперсный порошок размером частиц сотни мкм. Методом РЭДС выявлено соотношение атомов углерода к кислороду как 10 : 1. Стоит отметить, что данный метод РЭДС не позволяет идентифицировать атомы водорода.

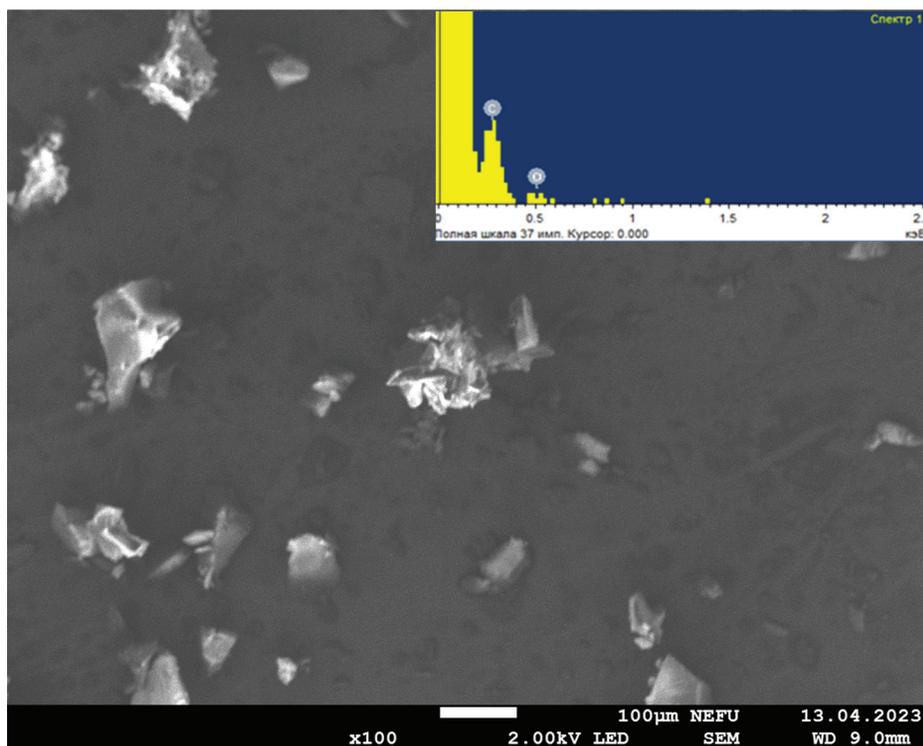


Рис. 1. СЭМ-изображение углеродного порошка *PET2*, полученного пиролизом с последующим СВЧ-воздействием. Во вставке показаны спектры РЭДС

Fig. 1. SEM image of carbon powder *PET2* obtained by pyrolysis with subsequent microwave exposure. The insert shows the Raman spectra

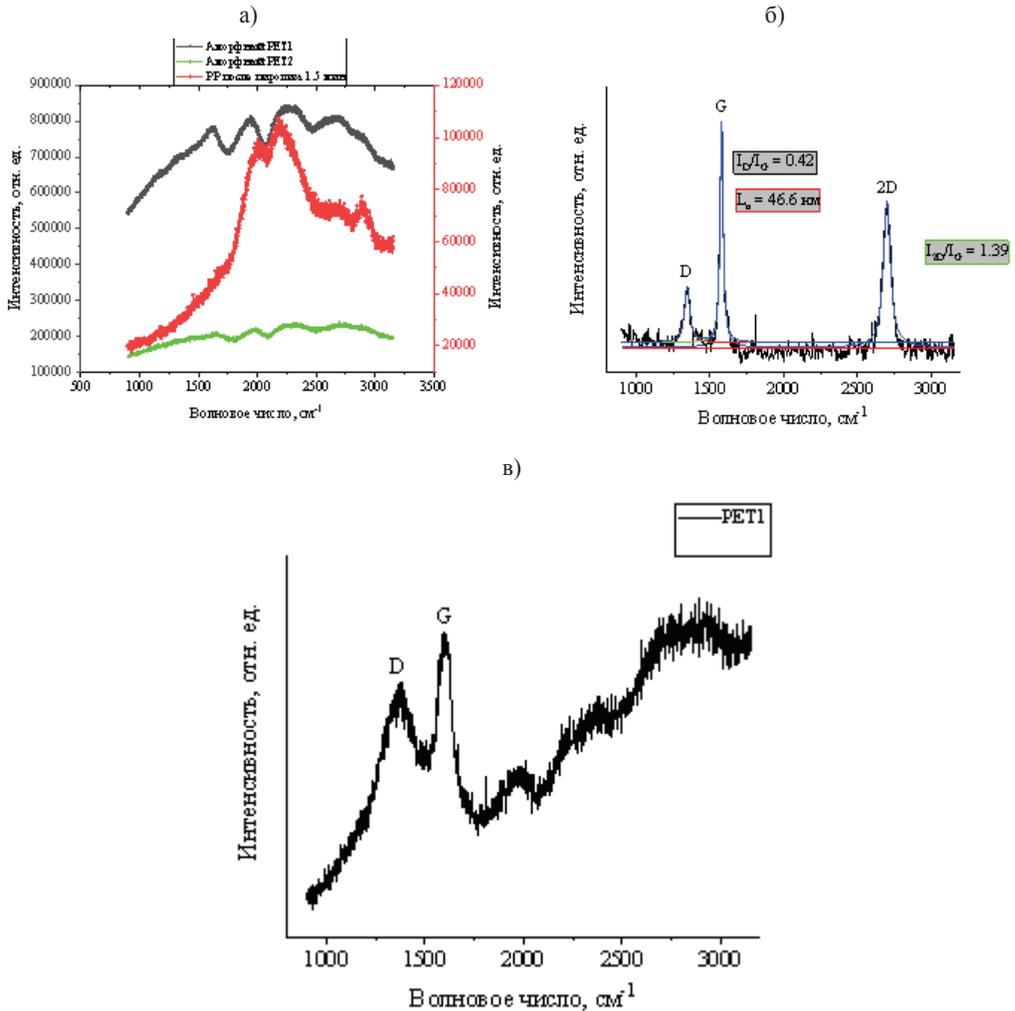


Рис. 2. Спектры КРС порошков из *PP* и *PET*, полученные: а) после пиролиза; б) после отжига *PP* порошка при 950 °С; в) после СВЧ-воздействия *PET* порошков (1 кВт, 5 мин)
Fig. 2. Raman spectra of *PP* and *PET* powder samples obtained: a) after pyrolysis; б) after annealing of *PP* powder at 950 °С; в) after microwave treatment of *PET* powder (1 kW, 5 min)

На рис. 2а приведены спектры КРС образцов, полученных после пиролиза длительностью до 20 мин. Полученные спектры с широкой полосой люминесценции при частотах выше 1000 см⁻¹ характерны для различных аллотропных модификаций аморфного углерода (а:С) [15]. В то же время *PP* порошок демонстрирует на порядок меньшую интенсивность (шкала справа). Также для этих образцов отчетливо проявляется полоса с максимумом в окрестности частоты 2000 см⁻¹, характерная для карбиновых структур [15].

Рис. 2б иллюстрирует спектры КРС порошков *PP* после высокотемпературного отжига при 950 °С, 90 мин. Особенностью спектра является отсутствие широкополосной люминесценции, что позволяет утверждать о полной кристаллизации (графитизации) материала. В то же время появляются пики, локализованные в окрестности частот 1350 см⁻¹ (D-пик), 1580 (G-пик) см⁻¹, 2700 см⁻¹ (2D-пик). Данные пики относятся к

показателям графито/графеноподобных структур [16–18]. Отношение интенсивностей 2D и G (I_{2D}/I_G) пиков соответствует структуре турбостратного графена с несколькими слоями (до 7) [16, 17]. Оценка латеральных размеров sp^2 -кристаллитов, найденных из отношения интенсивностей основных пиков (I_D/I_G) [17] показывает, что средние размеры графеновых доменов составляют 46,6 нм.

На рис. 2в показаны спектры КРС после СВЧ-обработки образца *PET1*. Аналогичная картина наблюдалась и при использовании более длительной обработки в СВЧ (*PET2*). Из спектра видно, что на фоне широкой полосы люминесценции наблюдаются основные пики графитовых структур D (1359 см^{-1}) и G (1600 см^{-1}). Это позволяет утверждать, что степень аморфности структуры остается все еще высокой, но в то же время СВЧ-обработка стимулирует переход в кристаллическую структуру графита. Небольшое смещение D- и G-пиков в сторону высоких частот относительно графеновых наблюдается при увеличении количества sp^3 -гибридизированного углерода в структуре [19]. Кроме того, природа широкой и интенсивной полосы поглощения, локализованной в области от 2690 см^{-1} до 3150 см^{-1} , связана с наличием неупорядоченной нанокристаллической структуры, состоящей из sp^3/sp^2 -гибридизированных фаз углерода различного соотношения [20].

УФ-спектры графена и его производных материалов обладают ярко выраженным пиком поглощения с максимумом в области $\sim 230\text{ нм}$ [18, 19]. На рисунке 3 приведены спектры оптической плотности исследуемых порошков, измеренные в диапазоне от 200 до 800 нм. Как видно из рис. 3, во всех образцах наблюдаются интенсивные пики, локализованные в диапазоне 230–245 нм. Природу данного возмущения можно отнести к характерному отклику плазменного резонанса связей типа $\pi-\pi^*$, соответствующего вынужденным колебаниям sp^2 -кристаллитов графита [21]. При дальнейшем увеличении длины волны до 800 нм интенсивности оптической плотности снижаются до постоянной величины и остаются неизменными.

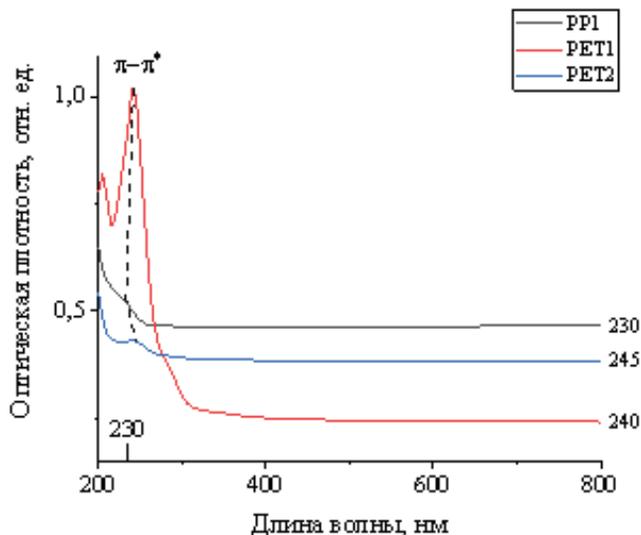


Рис. 3. Зависимости нормированной оптической плотности порошков *PP*, *PET1*, *PET2* в зависимости от длины волны излучения

Fig. 3. Dependence of normalized optical density of *PP*, *PET1*, *PET2* powders on the wavelength of radiation

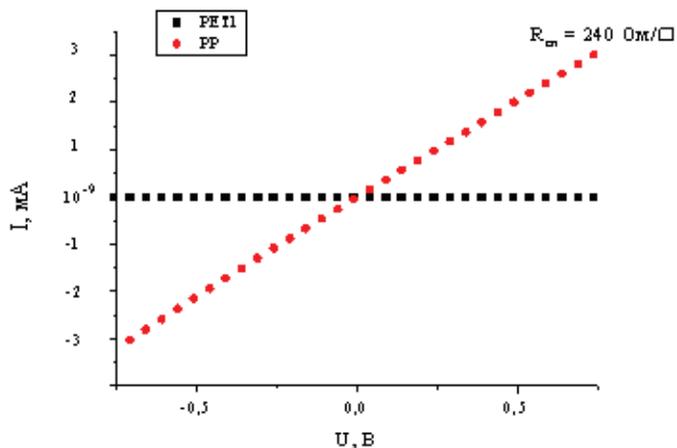


Рис. 4. ВАХ порошков *PP* и *PET1*, измеренные после СВЧ-воздействия мощностью 1 кВт, 5 мин
Fig. 4. I-V characteristics of *PP* and *PET1* powders measured after microwave exposure with a power of 1 kW for 5 minutes

На рис. 4 приведены вольтамперные характеристики порошков, измеренные при комнатной температуре. Значения слоевых сопротивлений ($R_{ср}$) образцов различались на 6–10 порядков для *PP* и *PET* образцов. Оценка сопротивлений, определенная из наклона ВАХ, показала, что порошок *PP* имеет наименьшее сопротивление, уменьшаясь от ~6 кОм/кв до 240 Ом/кв до и после СВЧ-обработки соответственно. *PET* образцы, имеющие высокую степень аморфности, как и ожидалось, были изоляторами тока до СВЧ обработки. После СВЧ-обработки сопротивление составило более единиц ГОм. Для *PET2* образца измерения не дали результатов из-за ограничения установки (сопротивление было выше значений допустимого диапазона измерения). Малые значения сопротивления, наблюдаемые в порошках *PP*, достигаются за счет более высокой степени графитизации структуры, как следует из результатов КРС. Сопоставляя результаты КРС и электрических измерений, можно сделать вывод, что полученный углеродный порошок *PP* является турбостратным графеном [5–8]. Таким образом, предложенной в работе методикой возможно получение углеродных порошков с турбостратной графеновой структурой различной проводимости. Изолирующие свойства *PET* образцов, вероятно, связаны с наличием большого количества а:С в структуре материала.

Заключение

В работе исследованы углеродные порошки, полученные из пластиковых отходов *PP* и *PET* методами пиролиза, термообработки и последующего СВЧ-воздействия. Из результатов КРС, УФ- ИК-микроскопии следует, что полученные образцы по своей структуре наиболее близки к показателям турбостратного графена с содержанием sp^3 -гибридизированного углерода, зависящим от условий синтеза. Показано, что СВЧ-воздействие влияет на структуру образцов *PET* и повышает электропроводность материалов, полученных из ПО *PP*. Предложенная в работе методика термообработки и последующего СВЧ-воздействия позволяет синтезировать турбостратный графен различной степени электропроводности. Полученные результаты могут быть полезны при синтезе из ПО как проводящих, так и изолирующих материалов. Разработанная методика в дальнейшем может применяться для переработки пластиковых отходов.

Л и т е р а т у р а

1. Vieira, O., Riberio, S. R., Diaz de Tuesta, J. L. (2022). A systematic literature review on the conversion of plastic wastes into valuable 2D graphene-based materials. *Chemical Engineering Journal*. V. 428. P. 131399.
2. Tiwari, S., Sahoo S Wang, N., Huczko, A. (2020). Graphene research and their outputs: Status and prospect. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. V. 5. No 1. Pp. 10–29.
3. Pandey, S., Karakoti, M., Surana, K. (2021). Graphene nanosheets derived from plastic waste for the application of DSSCs and supercapacitors Scientific Reports. 11. P. 3916.
4. Zhuo, C., Levendis, Y.A. (2014). Upcycling waste plastics into carbon nanomaterials: a review. *J. Appl. Polym. Sci.* 131 (4).
5. Luong, D. X., Bets, K. V., Algozeeb, W. A. (2020). Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis. *Nature*. V. 577. No 7792. Pp. 647–651.
6. Wyss, K. M., Chen, W., Beckham, J. L. (2022). Holey and wrinkled flash graphene from mixed plastic waste. *ACS nano*. V. 16. No 5. Pp. 7804–7815.
7. Advincula, P.A., Luong, D.X., Chen, W. (2021). Flash graphene from rubber waste. *Carbon*. V. 178. Pp. 649–656.
8. Algozeeb, W.A., Savas, P.E., Luong, D.X. (2020). Flash graphene from plastic waste ACS nano. V. 14. No 11, pp. 15595–15604.
9. Cui, L., Wang, X., Chen, N. (2017). Trash to treasure: converting plastic waste into a useful graphene foil *Nanoscale*. V. 26. No 5. Pp. 9089–9094.
10. Прокопьев, А. Р. Воздействие тепловой и СВЧ-обработки на свойства аморфных алмазоподобных пленок, полученных осаждением в плазме метана / А. Р. Прокопьев, Е. П. Неустроев // Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова. – 2022. – №. 2. – С. 41–46.
11. Бабаев, В. Г. Успехи в синтезе и исследовании свойств карбина-третьей аллотропной модификации углерода / В. Г. Бабаев, М. Б. Гусева, Н. Ф. Савченко // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2005. – № 6. – С. 100–104.
12. Гребенюк, Г. С. Интеркалирование графена на карбиде кремния кобальтом / Г. С. Гребенюк, Е. Ю. Лобанова, Д. А. Смирнов // Физика твердого тела. – 2019. – Т. 61. – №. 7. – С. 1374–1384.
13. Бабаев, А. А. Оптические и электрические свойства оксида графена / А. А. Бабаев, М. Е. Зобов, Д. Ю. Корнилов // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 125. – №. 6 – С. 820.
14. Образцов, А. Н. Автоэлектронная эмиссия в графитоподобных пленках / А. Н. Образцов, И. Ю. Павловский, А. П. Волков // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71. – № 11. – С. 89–95.
15. Ferrari, A. C., Meyer, J. C., Scardaci, V. (2006). Raman spectrum of graphene and graphene layers. *Physical review letters*. V. 97. No18. P. 187401.
16. Ferrari A. C., Basko D. M. (2013). Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene. *Nature nanotechnology*. V. 8. No 4. Pp. 235–246.
17. Beams R., Cañado L. G., Novotny L. (2015). Raman characterization of defects and dopants in graphene. *Journal of Physics: Condensed Matter*. V. 27. No 8. P. 083002.
18. Nair R. R., Blake P., Grigorenko, A. N. (2008). Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*. V. 320. No. 5881. P. 1308.
19. Sheka, E. F., Golubev, Y. A., Popova, N. A. (2020). Graphene domain signature of Raman spectra of sp² amorphous carbons. *Nanomaterials*. V. 10. No. 10, p. 2021
20. Ferrari A. C., Robertson J. (2004). Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 362. No. 1824. Pp. 2477–2512.
21. Acik, M., Lee, G., Mattevi, C. (2011). The role of oxygen during thermal reduction of graphene oxide studied by infrared absorption spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry*. V. 115. No 40, Pp. 19761–19781.

References

1. Vieira, O., Riberio, S. R., Diaz de Tuesta, J. L. (2022). A systematic literature review on the conversion of plastic wastes into valuable 2D graphene-based materials. *Chemical Engineering Journal*. V. 428. P. 131399.
2. Tiwari, S., Sahoo S Wang, N., Huczko, A. (2020). Graphene research and their outputs: Status and prospect. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. V. 5. No 1. Pp. 10–29.
3. Pandey, S., Karakoti, M., Surana, K. (2021). Graphene nanosheets derived from plastic waste for the application of DSSCs and supercapacitors Scientific Reports. 11. P. 3916.
4. Zhuo, C., Levendis, Y.A. (2014). Upcycling waste plastics into carbon nanomaterials: a review. *J. Appl. Polym. Sci.* 131 (4).
5. Luong, D. X., Bets, K. V., Algozeeb, W. A. (2020). Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis. *Nature*. V. 577. No 7792. Pp. 647–651.
6. Wyss, K. M., Chen, W., Beckham, J. L. (2022). Holey and wrinkled flash graphene from mixed plastic waste. *ACS nano*. V. 16. No 5. Pp. 7804–7815.
7. Advincula, P.A., Luong, D.X., Chen, W. (2021). Flash graphene from rubber waste. *Carbon*. V. 178. Pp. 649–656.
8. Algozeeb, W.A., Savas, P.E., Luong, D.X. (2020). Flash graphene from plastic waste ACS nano. V. 14. No 11, pp. 15595–15604.
9. Cui, L., Wang, X., Chen, N. (2017). Trash to treasure: converting plastic waste into a useful graphene foil Nanoscale. V. 26. No 5. Pp. 9089–9094.
10. Prokopyev, A. R. (2022). The effect of thermal and microwave processing on the properties of amorphous diamond-like films obtained by deposition of methane in plasma. *M.K.Ammosov North-Eastern Federal University Bulletin*. No. 2. pp. 41-46. (in Russian)
11. Babaev, V. G. (2005). Successes in the synthesis and study of the properties of carbide-the third allotropic modification of carbon. *Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*. No. 6. pp. 100-104. (in Russian)
12. Grebenyuk, G. S. (2019). Intercalation of graphene on silicon carbide with cobalt. *Solid state Physics*. Vol. 61. No. 7. pp. 1374-1384. (in Russian)
13. Babaev, A. A. (2018). Optical and electrical properties of graphene. *Optics and spectroscopy*. Vol. 125. No. 6. (in Russian)
14. Obratsov, A. N. (2001). Autoelectronic emission in graphite-like films. *Journal of Technical Physics*. Vol. 71. No. 11. – pp. 89-95. (in Russian)
15. Ferrari, A. C., Meyer, J. C., Scardaci, V. (2006). Raman spectrum of graphene and graphene layers. *Physical review letters*. V. 97. No18. P. 187401.
16. Ferrari A. C., Basko D. M. (2013). Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene. *Nature nanotechnology*. V. 8. No 4. Pp. 235–246.
17. Beams R., Cañado L. G., Novotny L. (2015). Raman characterization of defects and dopants in graphene. *Journal of Physics: Condensed Matter*. V. 27. No 8. P. 083002.
18. Nair R. R., Blake P., Grigorenko, A. N. (2008). Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*. V. 320. No. 5881. P. 1308.
19. Sheka, E. F., Golubev, Y. A., Popova, N. A. (2020). Graphene domain signature of Raman spectra of sp² amorphous carbons. *Nanomaterials*. V. 10. No. 10, p. 2021
20. Ferrari A. C., Robertson J. (2004). Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 362. No. 1824. Pp. 2477–2512.
21. Acik, M., Lee, G., Mattevi, C. (2011). The role of oxygen during thermal reduction of graphene oxide studied by infrared absorption spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry*. V. 115. No 40, Pp. 19761–19781.

ПРОКОПЬЕВ Айсен Русланович – н. с. дизайн-центра электроники «СЕВЕР», ведущий инженер ОТК ДЦТ СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: aisenprokopiev@mail.ru

PROKOPYEV Aisen Ruslanovich – Researcher, "NORTH" Design Center of Electronics, Leading Engineer of the Technical Department, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

НЕУСТРОЕВ Ефим Петрович – к. ф.-м. н., доцент кафедры радиофизики и электронных систем СВФУ им. М.К. Аммосова.

NEUSTROEV Efim Petrovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Radiophysics and Electronic Systems, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

ЛОСКИН Николай Николаевич – лаборант дизайн-центра электроники «СЕВЕР», магистрант 2-го курса кафедры радиофизики и электронных систем СВФУ им. М.К. Аммосова.

LOSKIN Nikolay Nikolaevich – Laboratory Assistant, "NORTH" Design Center of Electronics, 2nd Year Master's Student, Department of Radiophysics and Electronic Systems, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

ВИНОКУРОВ Павел Васильевич – н. с. дизайн-центра электроники «СЕВЕР» СВФУ им. М.К. Аммосова, н. с. УНТЛ «Графеновые нанотехнологии».

VINOKUROV Pavel Vasilyevich – Associate Professor, "NORTH" Design Center of Electronics, Associate Professor, "Graphene Nanotechnologies" Educational Scientific and Technical Laboratory.

ЕВСЕЕВ Захар Иванович – н. с., руководитель дизайн-центра электроники «СЕВЕР» СВФУ им. М.К. Аммосова, с. н. с. УНТЛ «Графеновые нанотехнологии».

EVSEEV Zakhar Ivanovich – Researcher, Head of the design Center of electronics "NORTH" of the M.K. Ammosov NEFU, of the UNTL "Graphene Nanotechnologies", M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

ПОПОВ Дмитрий Николаевич – лаборант дизайн-центра электроники «СЕВЕР», магистрант 2-го курса кафедры радиофизики и электронных систем СВФУ им. М.К. Аммосова.

POPOV Dmitry Nikolaevich – Laboratory Assistant, "NORTH" Design Center of Electronics, 2nd Year Master's Student, Department of Radiophysics and Electronic Systems, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.