

Утверждённая научная специальность ВАК: 1.4.4. Физическая химия; 2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов

Дополнительная научная специальность ВАК: 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества; 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы

Идентификатор ссылки на объект – ROI: jbc-01/25-84-10-84

Цифровой идентификатор объекта – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-84

УДК 631.811.94; 631.811.98; 631.879.32. Поступила в редакцию 9 сентября 2025 г.

Идентификация продуктов цепи превращений твёрдых продуктов пиролиза автомобильных шин в полимер-производный нанокуглерод

Якунин^{1*} Иван Николаевич, Курякова² Татьяна Анатольевна

¹ ООО «РН-КрасноярскНИПИНефть». ул. 9 Мая, 65д. г. Красноярск, 660098. Россия.

Тел.: +7 (391) 200-88-30. E-mail: Yakunin21@yandex.ru

² Отделение химической технологии переработки нефти, газа и экологии. Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина. Филиал в г. Оренбург.

ул. Юных Ленинцев, 20. Оренбургская область, 460047. Россия.

Тел.: +7 (3532) 62-94-21. E-mail: Kuryakova.t@gubkin.ru

*Ведущий направление; +Поддерживающий переписку

Ключевые слова: автомобильные шины, переработка, пиролиз, стимуляторы роста, токсиканты, нанокуглерод.

Аннотация

В последние годы наноматериалы привлекают большое внимание исследователей в связи с наличием ряда уникальных свойств, открывающих широкие перспективы их использования. Среди прочих выделяют углеродные наночастицы, способные стимулировать развитие живых организмов – увеличивать рост, зелёную массу и урожай, удерживать питательные вещества и т.д. Значимость данного направления резко возрастает за счёт экологической и экономической составляющих в тех случаях, когда углеродные наночастицы получают из отходов, например, сажи дизельных двигателей или углеродистых продуктов пиролиза автомобильных шин, непригодных для использования в традиционных отраслях промышленности. Учитывая, что модифицированный твёрдый продукт пиролиза шин стимулирует рост растений и, вместе с тем, в больших концентрациях проявляет признаки экотоксиканта, проводился топологический, спектрометрический и элементный анализ сырья и продуктов преобразования твёрдого продукта пиролиза шин. Методами электронной микроскопии, ИК- и атомно-эмиссионной спектроскопии показано, что конечный продукт состоит преимущественно из углеродистых частиц размером от 50 до 100 нм. Последовательная обработка твёрдого продукта пиролиза шин H_2SO_4 и $NaOH$ разрушает ароматическую структуру сырья и формирует карбонильные группы на поверхности наноразмерного образца, что может служить залогом биологической активности. Токсические свойства полимер-производного нанокуглерода могут быть обусловлены как высоким остаточным содержанием атомов Zn (~8000 мг/кг), так и непосредственным влиянием наноразмерного активированного углеродного продукта.

Выходные данные для цитирования русскоязычной печатной версии статьи:

Якунин И.Н., Курякова Т.А. Идентификация продуктов цепи превращений твёрдых продуктов пиролиза автомобильных шин в полимер-производный нанокуглерод. *Бутлеровские сообщения*. **2025**. Т.84. №10. С.84-94. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-84

Выходные данные для цитирования русскоязычной электронной версии статьи:

Якунин И.Н., Курякова Т.А. Идентификация продуктов цепи превращений твёрдых продуктов пиролиза автомобильных шин в полимер-производный нанокуглерод. *Бутлеровские сообщения В*. **2025**. Т.11. №4. Id.4. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-84/ROI-jbc-RB/25-11-4-4

The output for citing the English online version of the article:

Ivan N. Yakunin, Tatyana A. Kuryakova. Components identification of the transformations chain for solid products of tires pyrolysis into polymer-derived nanocarbon. *Butlerov Communications В*. **2025**. Vol.11. No.4. Id.4. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-84/ROI-jbc-B/25-11-4-4

Литература

- [1] Иванищев В.В. Наночастицы и их влияние на характеристики растений. *Бутлеровские сообщения*. **2024**. Т.80. №12. С.99-107. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/24-80-12-99 [V.V. Ivanishchev. Nanoparticles and their impact on plant characteristics. *Butlerov Communications C*. **2024**. Vol.9. No.4. Id.19. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/24-80-12-99/ROI-jbc-C/24-9-4-19]
- [2] R.V. Bordiwala. Green synthesis and Applications of Metal Nanoparticles. – A Review Article. *Results in Chemistry*. **2023**. Vol.5. 100832. <https://doi.org/10.1515/ZPCH-2018-1238>
- [3] A. Rastogi, M. Zivcak, O. Sytar, H.M. Kalaji, X. He, S. Mbarki, M. Brestic. Impact of Metal and Metal Oxide Nanoparticles on Plant: A Critical Review. *Front. Chem.* **2017**. Vol.5. 78p. DOI: 10.3389/fchem.2017.00078
- [4] Y. Bao, J. He, K. Song, J. Guo, X. Zhou, S. Liu. Plant-Extract-Mediated Synthesis of Metal Nanoparticles. *Journal of Chemistry*. **2021**. Article ID 6562687. DOI:10.1155/2021/6562687
- [5] Баранов М.В., Бекетов А.Р., Боков М.С., Лисин В.Л., Марков В.Ф., Старостин С.П., Филатова Д.А. Исследование электрокинетических свойств наночастиц тантала в водных растворах. *Бутлеровские сообщения*. **2010**. Т.21. №8. С.12-16. ROI: jbc-01/10-21-8-12 [M.V. Baranov, A.R. Beketov, M.S. Bokov, V.L. Lisin, V.F. Markov, S.P. Starostin, D.A. Filatova. Investigation of electrokinetic properties of tantalum nanoparticles in aqueous solutions. *Butlerov communications*. **2010**. Vol.21. No.8. P.12-16. (Russian)]
- [6] N.H. Nam, N.H. Luong. Nanoparticles: synthesis and applications. *Materials for Biomedical Engineering*. **2019**. P.211-240. DOI: 10.1016/B978-0-08-102814-8.00008-1
- [7] Гизатуллин А.Р., Акентьева Н.П., Санина Н.А., Дремова Н.Н., Торбов В.И., Шкондина Н.И., Приходченко Т.Р., Алдошин С.М. Дизайн наночастиц (хитозан-гиалуроновая кислота) для таргетной доставки динитрозильных комплексов железа, потенциальных кардиологических препаратов. *Бутлеровские сообщения*. **2018**. Т.54. №6. С.138-143. <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/18-54-6-138> [A.R. Giztullin, N.P. Akentyeva, N.A. Sanina, N.N. Dremova, V.I. Torbov, N.I. Shkondina, T.R. Prikhoschenko, S.M. Aldoshin. Design of nanoparticles (chitosan-hyaluronic acid) for targeted delivery of dinitrozy iron complexes, potential cardiac drugs. *Butlerov communications*. **2018**. Vol.54. No.6. P.138-143. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/18-54-6-138 (Russian)]
- [8] Массалимов И.А., Берестова Т.В., Ахметшин Б.С., Садилов Э.И., Мустафин А.Г. Получение наночастиц серы в реакции тиосульфата натрия с одно- и двухосновными кислотами в области низких концентраций и изучение их антифунгальной активности. *Бутлеровские сообщения*. **2018**. Т.54. №5. С.74-81. ROI: jbc-01/18-54-5-74 [I.A. Masslimov, T.V. Berestova, B.S. Ahmetshin, E.I. Sadikov, A.G. Mustafin. Production of sulfur nanoparticles in the reaction of sodium thiosulfate with monobasic and dibasic acids in low concentrations and study of their antifungal activity. *Butlerov Communications*. **2018**. Vol.54. No.5. P.74-81. ROI: jbc-01/18-54-5-74 (Russian)]
- [9] V.V. Makarov, A.J. Love, O.V. Sinitsyna, S.S. Makarova, I.V. Yaminsky, M.E. Tiliansky, N.O. Kalinina. “Green” Nanotechnologies: Synthesis of Metal Nanoparticles Using Plants. *Acta Naturae*. **2014**. Vol.6(1). P.35-44. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3999464/>
- [10] P. Zhou, M. Adeel, N. Shakoor, M. Guo, Y. Hao, I. Azeem, M. Li, M. Liu, Y. Rui. Application of Nanoparticles Alleviates Heavy Metals Stress and Promotes Plant Growth: An Overview. *Nanomaterials*. **2021**. Vol.11. 26p. DOI:10.3390/nano11010026
- [11] K. Gunture, A.K. Garg, R. Aggarwal, J. Kaushik, R.K. Prajapati, S.K. Sonkar. Non-aqueous onion like nano-carbons from waste diesel-soot used as FRET-based sensor for sensing of nitro-phenols. *Env. Research*. Vol.212. 113308. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113308
- [12] M. Chandel, K. Kaur, B.K. Sahu, S. Sharma, R. Panneerselvam, V. Shanmugam. Promise of nano-carbon to the next generation sustainable agriculture. *Carbon*. Vol.188. **2022**. P.461-481. DOI: 10.1016/j.carbon.2021.11.060
- [13] A.K. Mishra, Monika, B.S. Patial. A review on recent advances in anode materials in lithium ion batteries. *Materials Today Electronics*. **2024**. Vol.7. 100089. DOI: 10.1016/j.mtelec.2024.100089
- [14] X. Ma, J.G. Lee, Y. Deng, A. Kolmakov. Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: Phytotoxicity, uptake and accumulation. *Science of the Total Environment*. **2010**. Vol.480. Iss.16. P.3053-3061. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.03.031
- [15] S.K. Verma, S. Gantait, V. Kumar, E. Gurel. Applications of carbon nanomaterials in the plant system: a perspective view on the pros and cons. *Science of the Total Environment*. **2019**. Vol.667. P.485-499. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.409
- [16] M. Khodakovskaya, M. Mahmood, Y. Xu, Z. Li. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano*. **2009**. Vol.3. 3221-7. DOI: 10.1021/nn900887m
- [17] J.E. Cañas, S. Nations, R. Vadan, L. Dai, M. Luo, R. Ambikapathi, E.H. Lee, D. Olszyk. Effects of functionlized and nonfunctionlized single-walled carbon nonatubes on root elongation of select crop species. *Environ Toxicol Chem*. **2008**. Vol.27(1). 1922-31. DOI: 10.1897/08-117.1

- [18] R. Acharya, H. Chhipa. Nanocarbon fertilizers: Implications of carbon nanomaterials in sustainable agriculture production. *Carbon Nanomaterials for Agri-Food and Environmental Applications*. Elsevier. **2020**. P.297-321. DOI: 10.1016/B978-0-12-819786-8.00015-3
- [19] B. Guo, G. Liu, W. Li, C. Hu, B. Lei, J. Zhuang, M. Zheng, Y. Liu. The role of carbon dots in the life cycle of crops. *Industrial Crops and Products. Part A*. **2022**. Vol.187. 115427. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115427
- [20] Gunture, C. Dalal, J. Kaushik, A.K. Garg, S.K. Sonkar. Pollutant-Soot-Based Nontoxic Water-Soluble Onion-like Nanocarbons for Cell Imaging and Selective Sensing of Toxic Cr(VI). *ACS Applied Bio Mater.* **2020**. Vol.3. P.3906-3913. DOI: 10.1021/acsabm.0c00456
- [21] D. Saini, Gunture, J. Kaushik, R. Aggarwal, K. Malika Tripathi, S.K. Sonkar. Carbon Nanomaterials Derived from Black Carbon Soot. A Review of Materials and Applications. *ACS Appl. Nano Mater.* **2021**. 4. 12. 12825-12844. DOI: 10.1021/acsanm.1c02840
- [22] Gunture, R. Aggarwal, A.K. Garg, J. Kaushik, S.K. Sonkar. Pollutant-based onion-like nanocarbons for improving the growth of gram plants. *Materials Today Chemistry*. **2020**. Vol.18. 100352. DOI: 10.1016/j.mtchem.2020.100352
- [23] B. Dellinger, A. D'Alessio, A. D'Anna, A. Ciajolo, B. Gullett, H. Henry, *et al.* Combustion Byproducts and their Health Effects: Summary of the 10th International Congress. *Environ. Eng. Sci.* Vol.25(8). **2008**. 1107-1114. DOI: 10.1089/ees.2008.0233.
- [24] M. Saxena, S. Maity, S. Sarkar. Carbon nanoparticles in 'biochar'boost wheat (*Triticum aestivum*) plant growth. *RSC Advances*. **2014**. 4 (75). 39948-39954. DOI: 10.1039/C4RA06535B.
- [25] A. Singh, A. Bhati, K.M. Tripathi, S.K. Sonkar. Nanocarbons in agricultural plants: can be a potential nanofertilizer? *Nanotechnology in Environmental Science*. **2018**. P.153-190. DOI: 10.1002/9783527808854.ch6.
- [26] A. Bhati, Gunture, K.M. Tripathi, A. Singh, S. Sarkar, S.K. Sonkar. Exploration of nano carbons in relevance to plant systems. *New Journal of Chemistry*. **2018**. Vol.42(20). P.16411-16427. DOI: 10.1039/C8NJ03642J
- [27] G.F. Hartmann, F.K. Ricachenevsky, N.M. Silveira *et al.* Phytotoxic effects of plastic pollution in crops: what is the size of the problem? *Environ Pollut.* **2022**. Jan 1.292(Pt B):118420. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118420.
- [28] S. Selonen, A. Dolar, A.J. Kokalj, *et al.* Exploring the impacts of microplastics and associated chemicals in the terrestrial environment – Exposure of soil invertebrates to tire particles. *Environ Res.* **2021**. Oct.201:111495. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111495.
- [29] Мазлова Е.А., Лобанов А.В., Усманов Р.Р. Современный взгляд на отходы автомобильных шин через призму экологической проблемы. *Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России»*. Москва. **2024**. С.328-343. [Е.А. Mazlova, A.V. Lobanov, R.R. Usmanov. A modern view of car tire waste through the prism of an environmental problem. *All-Russian Scientific and Technical Conference "Actual problems of development of the Russian oil and gas complex"*. Moscow. **2024**. P.328-343. (Russian)]
- [30] C. Johannessen, J. Liggio, X. Zhang, *et al.* Composition and transformation chemistry of tire-wear derived organic chemicals and implications for air pollution. *Atmospheric Pollution Research*. **2022**. Vol.13. Iss.9. DOI: 10.1016/j.apr.2022.101533
- [31] Папин А.В., Игнатова А.Ю., Макаревич Е.А., Неведров А.В. Получение композиционного топлива на основе технического углерода пиролиза автошин. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. **2015**. №3 (109). С.107-114. [A.V. Papin, A.Yu Ignatova, E.A. Makarevich, A.V. Nevedrov. Production of composite fuel based on carbon black pyrolysis of tires. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. **2015**. No.3. P.107-114. (Russian)]
- [32] Курякова Т.А., Якунин И.Н. Получение модифицированного углеродного продукта из автомобильных шин. *Бутлеровские сообщения*. **2025**. Т.82. №6. С.93-103. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-82-6-15 [T.A. Kuryakova, I.N. Yakunin. Obtaining a modified carbon product from automobile tires. *Butlerov Communications A*. **2025**. Vol.10. No.2. Id.15. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-82-6-93/ROI-jbc-A/25-10-2-15]
- [33] Якунин И.Н., Курякова Т.А. Исследование ростостимулирующей способности модифицированного твёрдого продукта пиролиза шин. *Бутлеровские сообщения*. **2025**. Т.84. №10. С.95-102. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-95 [I.N. Yakunin, T.A. Kuryakova. Study of the growth-promoting capacity of a modified solid tire pyrolysis product. *Butlerov Communications C*. **2025**. Vol.11. No.4. Id.1. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-95/ROI-jbc-C/25-11-4-1]
- [34] A. Zeb, W. Liu, N. Ali, *et al.* Integrating metabolomics and high-throughput sequencing to investigate the effects of tire wear particles on mung bean plants and soil microbial communities. *Environ Pollut.* **2024**. Jan 1.340(Pt 1):122872. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.122872
- [35] M. Šourková, D. Adamcová. Establishing Impact of the Long-Term Action of Waste Dumps with the Occurrence of Waste Tires on the Soil Environment. *Polish Journal of Environmental Studies*. **2023**. Vol.32. No.4. P.3787-3798. DOI: 10.15244/pjoes/163567
- [36] I.N. Yakunin, T.A. Kuryakova. Components identification of the transformations chain for solid products

- ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОДУКТОВ ЦЕПИ ПРЕВРАЩЕНИЙ ТВЁРДЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА... 84-94
of tires pyrolysis into polymer-derived nanocarbon. *Butlerov Communications B*. **2025**. Vol.11. No.4. Id.4.
DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-84/ROI-jbc-B/25-11-4-4
- [37] Якунин И.Н., Курякова Т.А. Идентификация продуктов цепи превращений твёрдых продуктов
пиролиза автомобильных шин в полимер-производный наноуглерод. *Бутлеровские сообщения B*.
2025. Т.11. №4. Id.4. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-84/ROI-jbc-RB/25-11-4-4

The English version of the article have been published in the international edition of the journal

Butlerov Communications B
Advances in Chemistry & Thermophysics

The Reference Object Identifier – ROI: jbc-B/25-11-4-4

The Digital Object Identifier – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-84/ROI-jbc-B/25-11-4-4

Components identification of the transformations chain for solid products of tires pyrolysis into polymer-derived nanocarbon

Ivan N. Yakunin,^{1*} Tatyana A. Kuryakova²

¹ RN-KrasnoyarskNIPINeft LLC. 9 May St., 65D. Krasnoyarsk, 660098. Russia.

Phone: +7 (391) 200-88-30. E-mail: Yakunin21@yandex.ru

² Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing and Ecology. Gubkin Russian State University of Oil and Gas. Orenburg Branch. Young Leninsev St., 20. Orenburg Region, 40047. Russia.

Phone: +7 (3532) 62-94-21. E-mail: Kuryakova.t@gubkin.ru

*Supervising author; ⁺Corresponding author

Keywords: car tires, recycling, pyrolysis, growth stimulants, toxicants, nanocarbon.

Abstract

At the recent years, nanomaterials have attracted a lot of attention from researchers due to the presence of a number of unique properties that open up broad prospects for their use. Among others, carbon nanoparticles are distinguished that can stimulate the development of living organisms – increase growth, green mass and yield, retain nutrients, etc. The importance of this area increases dramatically due to environmental and economic components in cases where carbon nanoparticles are obtained from waste, for example, soot from diesel engines or carbon products from pyrolysis of automobile tires, unsuitable for use in traditional industries. Taking into account that the modified solid tire pyrolysis product stimulates plant growth and, at the same time, shows signs of an ecotoxicant in high concentrations, topological, spectrometric and elemental analysis of raw materials and products of transformation of the solid tire pyrolysis product was carried out. Electron microscopy, IR and atomic emission spectroscopy have shown that the final product consists mainly of carbonaceous particles ranging in size from 50 to 100 nm. Sequential treatment of the solid pyrolysis product of H₂SO₄ and NaOH tires destroys the aromatic structure of the raw material and forms carbonyl groups on the surface of a nanoscale sample, which can serve as a guarantee of biological activity. The toxic properties of the polymer-derived nanocarbon may be due to both the high residual content of Zn atoms (~8000 mg/kg) and the direct effect of the nanoscale activated carbon product.