

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-1-6-25>

УДК 678:537.8.029.6

РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ (ОБЗОР)

В. А. ГОЛЬДАДЕ¹⁺, В. М. ШАПОВАЛОВ¹, С. В. ЗОТОВ¹, Н. С. ВИНДИКТОВА¹, С.-М. ЧЖУ², Я.-Ф. ЧЖУ²

¹Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

²Чжэцзянский научно-технический университет, Сяша район высшего образования, 310018, г. Ханчжоу, провинция Чжэцзян, КНР

Одним из широко используемых средств решения проблемы электромагнитной безопасности являются радиопоглощающие материалы (РПМ). РПМ на основе полимерных композитов обладают рядом преимуществ по сравнению с ферритовыми, металлическими и керамическими поглотителями электромагнитных волн: низкая масса и материалоемкость, возможность регулирования структуры и поглощающих/отражающих характеристик в широком диапазоне длин волн, технологичность переработки.

Цель работы — анализ достоинств и недостатков различных видов РПМ на основе полимерных композитов, содержащих поглощающие добавки различной природы, структуры и концентрации.

В настоящем обзоре приведена классификация РПМ по различным критериям: по технологическому принципу — собственно РПМ и радиопоглощающие покрытия (РПП), по рабочему диапазону эффективного действия, по структуре (однослойные, многослойные, градиентные, комбинированные), по типу наполнителя/матрицы, по механизму взаимодействия с электромагнитными волнами (резонансные, нерезонансные, рассеивающие). Подробно обсуждаются следующие виды РПМ и РПП: на основе ферритов, проводящих и углеродных наполнителей; на основе гидрогелей и криогелей; на основе метаматериалов; на основе электропроводных полимеров. Показано, что композиты с полимерной матрицей, содержащие ферриты, наночастицы углерода, металлов, полупроводников и оксидов, обладают выраженными радиопоглощающими и экранирующими свойствами благодаря сочетанию различных механизмов поглощения (магнитные, джоулевы и диэлектрические потери). Лучшие образцы РПМ демонстрируют минимальные потери на отражение — ослабление энергии СВЧ излучения до минус 60 дБ при толщине поглотителя от 1 мм до 3 мм, что соответствует поглощению электромагнитных волн на 99,5%.

Ключевые слова: электромагнитная безопасность, электромагнитное излучение, поглощение, ослабление, отражение, полимеры, нанодобавки, криогели, метаматериалы.

RADIOABSORBING MATERIALS BASED ON POLYMER COMPOSITES (REVIEW)

V. A. GOLDADE¹⁺, V. M. SHAPOVALOV¹, S. V. ZOTOV¹, N. S. VINIDIKTOVA¹, X.-M. ZHU², Y.-F. ZHU²

¹V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus

²Zhejiang Sci-Tech University, Xiasha Higher Education Zone, 310018, Hangzhou, Zhejiang, P. R. China

One of the widely used means of solving the problem of electromagnetic safety are radio-absorbing materials (RAMs). RAMs based on polymer composites have a number of advantages compared to ferrite, metal and ceramic absorbers of electromagnetic waves: low weight and material consumption, the ability to regulate the structure and absorption/reflection characteristics in a wide range of wavelengths, and ease of processing.

The purpose of this review is to analyze the advantages and disadvantages of various types of RAMs based on polymer composites containing absorbent additives of various natures, structure and concentrations.

⁺Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: victor.goldade@gmail.com

This review provides a classification of RAMs according to various criteria: by technological principle — RAMs themselves and radio-absorbing coatings (RACs), by effective operating range, by structure (single-layer, multilayer, gradient, combined), by type of filler/matrix, by interaction mechanism with electromagnetic waves (resonant, non-resonant, scattering). The following types of RAMs and RACs are discussed in detail: based on ferrites, conductive and carbon fillers; based on hydrogels and cryogels; based on metamaterials; based on electrically conductive polymers. It has been shown that composites with a polymer matrix containing ferrites, nanoparticles of carbon, metals, semiconductors, and oxides have pronounced radio-absorbing and radio-shielding properties due to a combination of various absorption mechanisms (magnetic, Joule and dielectric losses). The best RAMs samples demonstrate minimal reflection losses (attenuation of microwave radiation energy to minus -60 dB with an absorber thickness of 1 to 3 mm), which corresponds to 99.5% absorption of electromagnetic waves.

Keywords: electromagnetic safety, electromagnetic radiation, absorption, attenuation, reflection, polymers, nanoadditives, cryogels, metamaterials.

Поступила в редакцию 15.11.2024

© В. А. Гольдаде, В. М. Шаповалов, С. В. Зотов, С.-М. Чжу, Я.-Ф. Чжу, 2024

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в [редакцию журнала](#)
Full text of articles can be purchased from the editorial office

Адрес редакции: ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь
Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11

Address: Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus
Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: polmattex@gmail.com
Web: <http://mpri.org.by/izdaniya/pmt/>

Образец цитирования:

Гольдаде В. А., Шаповалов В. М., Зотов С. В., Винидиктова Н. С., Чжу С.-М., Чжу Я.-Ф. Радиопоглощающие материалы на основе полимерных композитов (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2024. Т. 10, № 1. С. 6–25. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-1-6-25>

Citation sample:

Gol'dade V. A., Shapovalov V. M., Zotov S. V., Vinidiktova N. S., Chzhu S.-M., Chzhu Ya.-F. Radiopogloshchayushchie materialy na osnove polimernykh kompozitov (obzor) [Radioabsorbing materials based on polymer composites (review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2024, vol. 10, no. 1, pp. 6–25. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-1-6-25>

Литература

1. Электромагнитные поля и здоровье человека : сборник / под общ. ред. Ю. Г. Григорьева. Москва : РУДН, 2002. 177 с.
2. Wood A., Mate R., Karipidis K. Meta-analysis of in vitro and in vivo studies of the biological effects of low-level millimetre waves // *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2021, vol. 31, pp. 606–613. doi: 10.1038/s41370-021-00307-7
3. Довбыш В. Н., Маслов М. Ю., Сподобаев Ю. М. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем. Самара : Содружество, 2009. 198 с.
4. Иванов В. А., Ильницкий Л. Я., Фузик М. И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Киев : Техніка, 1983. 120 с.
5. Латыпова А. Ф., Калинин Ю. Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2012. Т. 8, № 6. С. 70–76.
6. Краев И. Д., Шульдешов Е. М., Платонов М. М., Юрков Г. Ю. Обзор композиционных материалов, сочетающих звукозащитные и радиозащитные свойства // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 4(45). С. 61–67.
7. Tong X. C. Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding. New York : CRC Press, 2009. 340 p.
8. Yener S. C., Cerezci O. Material analysis and application for radio frequency electromagnetic wave shielding // *Acta Phys. Pol. A*, 2016, vol. 129, no. 4, pp. 635–638. doi: 10.12693/APhysPolA.129.635
9. Богущ В. А., Борботко Т. В., Гусинский А. В., Лыньков Л. М., Тамело А. А. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты / под ред. Л. М. Лынькова. Минск : Бестпринт, 2003. 406 с.
10. Лагарьков А. Н., Погосян М. А. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий // *Вестник РАН*. 2003. Т. 73, № 9. С.

- 779–787.
11. Ahmad H., Tariq A., Shehzad A., Faheem M. S., Shafiq M., Rashid I. A., Afzal A., Munir A., Riaz M. T., Haider H. T., Afzal A., Qadir M. B., Khalil Z. Stealth technology: Methods and composite materials — A review // *Polym. Compos.*, 2019, vol. 40, pp. 4457–4472.
 12. Динамика радиоэлектроники-3 / под общ. ред. Ю. И. Борисова. М.: Техносфера, 2009. 176 с.
 13. Пинчук Л. С., Гольдаде В. А., Шилько С. В., Неверов А. С. Введение в систематику умных материалов / под общ. ред. Л. С. Пинчука. Минск: Беларуская навука, 2013. 399 с.
 14. Goldade V. A., Shil'ko S. V., Neverov A. S. Smart materials taxonomy. Boca Raton; London; New York: CRC Press, 2016. 259 p.
 15. Алексеев А. Г., Штагер Е. А., Козырев С. В. Физические основы технологии stealth. СПб.: BBM, 2007. 284 с.
 16. Федюнин П. А., Степаненко И. Т. Частотный диапазон радиопоглощающих покрытий и оценка их предельных свойств // *Вестник ТГУ*. 2002. Т. 7, вып. 1. С. 102–103.
 17. Аполлонский С. М. Защита техносферы от воздействия физических полей и излучений: монография: в 3 т. Т. 2. Защитные материалы от физических полей и излучений. М.: Русайнс, 2020. С. 77–80.
 18. Silva M. W. B., Kretly L. C. A new concept of RAM-radiation absorbent material: Applying corrugated surfaces to improve reflectivity // 2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011): 29 October–01 November 2011, Natal, Brazil. USA: IEEE, 2012, pp. 556–560. doi: 10.1109/IMOC.2011.6169338
 19. Yao Y., Jin S., Zou H., Li L., Ma X., Lv G., Gao F., Lv X., Shu Q. Polymer-based lightweight materials for electromagnetic interference shielding: a review // *J. Mater. Sci.*, 2021, vol. 56, pp. 6549–6580. doi: 10.1007/s10853-020-05635-x
 20. Delfini A., Albano M., Vricella A., Santoni F., Rubini G., Pastore R., Marchetti M. Advanced Radar Absorbing Ceramic-Based Materials for Multifunctional Applications in Space Environment // *Materials*, 2018, vol. 11. doi: 10.3390/ma11091730
 21. Barudov E., Ivanova M. Study of the parameters of conductive textile fabrics for protection against high-frequency electromagnetic radiation // 13th Electrical Engineering Faculty Conference: proceedings (8–11 September 2021, Varna, Bulgaria). USA: IEEE, 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/BulEEF53491.2021.9690835
 22. Chertov A. N., Gorbunova E. V., Sadovnichii R. V., Rozhkova N. N. Schungite raw material quality evaluation using image processing method // *SPIE Optical Metrology: proceedings*, 25–29 June 2017, Munich, Germany, vol. 10334, pp. 206–215. doi: 10.1117/12.2270389
 23. Kazmina O., Suslyayev V., Dorozhkin K., Kuznetsov V. L., Lebedeva E. The foam-glass material for a radio frequency echoless chambers // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 110. doi: 10.1088/1757-899X/110/1/012086
 24. Geetha S., Kumar S., Rao K. K., Vijayan M., Trivedi D. C. EMI shielding: Methods and materials - A Review // *J. Appl. Polym. Sci.*, 2009, vol. 112, pp. 2073–2086. doi: 10.1002/app.29812
 25. Пинчук Л. С., Банный В. А., Скляр А. В., Гольдаде В. А. Влияние физико-химических процессов на межфазной границе полиэтилен-наполнитель на радиофизические свойства композитов // *Перспективные материалы*, 2009. № 2. С. 5–12.
 26. Горшенев В. Н., Колесов В. В., Фионов А. С., Эрихман Н. С. Многослойные покрытия с изменяемыми электродинамическими характеристиками на основе наполненных полимерных матриц // *Журнал радиоэлектроники*. 2016. № 11. С. 345–354.
 27. Бендерский Г. П., Молостова Ю. М., Румянцев П. А., Серебрянников С. В., Серебрянников С. С. Композиционные радиопоглощающие материалы на основе порошков ферритов // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2022. Т. 16, № 2. С. 13–21. doi: 10.17073/1997-308X-2022-2-13-21
 28. Банный В. А., Гольдаде В. А., Пинчук Л. С. Взаимодействие СВЧ-излучения с полимерным композитным электромагнитным экраном: физические модели и эксперимент // *Материалы. Технологии. Инструменты*. 2008. Т. 13, № 2. С. 45–51.
 29. Богуш В. А., Родионова В. Н., Танана О. В. Радиопоглощающие материалы для практических приложений в СВЧ диапазоне // *Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики: электрон. сб. материалов I междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 27–28 окт. 2022 г. Новополоцк: Полоцкий государственный ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2023. С. 18–22. [Электронный ресурс]. URL: <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/38077/1/18-22.pdf> (дата обращения: 23.09.2023).*
 30. Николайчук Г., Иванов В., Яковлев С. Радиопоглощающие материалы на основе наноструктур // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2010. № 1. С. 92–95.
 31. Choi J. H., Nam Y. W., Jang M. S., Kim C. G. Characteristics of silicon carbide fiber-reinforced composite for microwave absorbing structures // *Compos. Struct.*, 2018, vol. 202, pp. 290–295. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.01.081
 32. Li Z., Haigh A., Soutis C., Gibson A. X-band microwave characterization and analysis of carbon fiber-reinforced polymer composites // *Compos. Struct.*, 2019, vol. 208, pp. 224–232. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.09.099
 33. Setua D. K., Mordina B., Srivastava A. K., Roy D., Prasad N. E. Chapter 18. Carbon nanofibers-reinforced polymer nanocomposites as efficient microwave absorber // *Fiber-Reinforced Nanocomposites: Fundamentals and Applications. Micro and Nano Technologies / edited by: Baoguo Han [et al.]*. Amsterdam: Elsevier, 2020, pp. 395–430. doi: 10.1016/B978-0-12-819904-6.00018-9
 34. Ruiz-Perez F., López-Estrada S. M., Tolentino-Hernández R. V., Caballero-Briones F. Carbon-based radar absorbing materials: A critical review // *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2022, vol. 7, is. 3. doi: 10.1016/j.jsamd.2022.100454
 35. Chung D. D. L. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials // *Carbon*, 2001, vol. 39, pp. 279–285. doi: 10.1016/S0008-6223(00)00184-6
 36. Lagarkov A. N., Semenenko V. N., Kisel V. N., Chistyayev V. A. Development and simulation of microwave artificial magnetic composites utilizing nonmagnetic inclusions // *J. Magn. Magn. Mater.*, 2003, vol. 258–259, pp. 161–166. doi: 10.1016/S0304-8853(02)01031-4
 37. Серебрянников С. В., Бородулин В. Н., Чепарин В. П. [и др.] Физико-механические свойства композиционных радиопоглощающих материалов на основе ферритов // *Радиолокация и радиосвязь: сб. науч. тр. XVI междунар. конф., Москва–Фирсановка, 11–16 ноября 2008 г. Москва: МИРЭА, 2008. С. 579–587.*
 38. Лыньков Л. М., Богуш В. А., Борботько Т. В., Украинцев Е. А., Насонова Н. В. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения // *Доклады БГУИР*. 2004. № 3. С. 152–167.
 39. Краев И. Д., Сорокин А. Е., Олихова Ю. В., Титкова Ю. М. Конструкционные материалы радиотехнического назначения, модифицированные углеродными нанотрубками // *Пластические массы*. 2020. № 9–10. С. 62–66. doi: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-62-66
 40. Лабунов В. А., Комаров Ф. Ф., Карпович В. А., Родионова В. Н., Комиссаров И. В., Карпович В. Б., Становой П. Г., Танана О. В., Марковский А. В. Электромагнитные характеристики нанотрубок композитных материалов в СВЧ-диапазоне // *Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах: сборник научных статей / редкол.: П. А. Витязь (отв.ред.) [и др.]*. Минск: БГУ, 2011. С. 14–22.
 41. Жданок С. А., Крауклис А. В., Буяков И. Ф., Карпович В. А., Родионова В. Н., Танана О. В. Радиопоглощающие свойства углеродных наноматериалов // *Нанотехника*. 2011. № 2. С. 72–75.
 42. Wong K. H., Pickering S. J., Rudd C. D. Recycled carbon fiber reinforced polymer composite for electromagnetic interference shielding // *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, 2010, vol. 41, is. 6, pp. 693–702. doi: 10.1016/j.compositesa.2010.01.012
 43. Танана О. В. Наноструктурные углеродные материалы для практических приложений в СВЧ диапазоне // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки*. 2019. № 4. С. 84–90.
 44. СТБ 1873-2008. Углерод наноструктурированный. Технические условия. Введ. 01-11-2008. Минск: Госстандарт, 2008. 12 с.
 45. Банный В. А., Пинчук Л. С., Гольдаде В. А. Физико-химические и технологические особенности формирования полимерных ком-

- позитных радиопоглощающих материалов // *Материаловедение*. 2007. № 6. С. 17–24.
46. Aneli J., Natriashvili T., Shamanauri L. Radio wave absorbing polymer composites with electric conducting and magnetic particles // *Bull. Georgian National Acad. Sci.*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 47–52.
 47. Kumar D., Moharana A., Kumar A. Current trends in spinel based modified polymer composite materials for electromagnetic shielding // *Mater. Today Chem.*, 2020, vol. 17. doi: 10.1016/j.mtchem.2020.100346
 48. Narang S. B., Pubby K. Nickel Spinel Ferrites: A review // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, vol. 519. doi: 10.1016/j.jmmm.2020.167163
 49. Zeng X., Cheng X., Yu R., Stucky G. D. Electromagnetic microwave absorption theory and recent achievements in microwave absorbers // *Carbon*, 2020, vol. 168, pp. 606–623. doi: 10.1016/j.carbon.2020.07.028
 50. Chung D. D. L. Carbon composites. Composites with carbon fibers, nanofibers, and nanotubes. 2nd edition. Amsterdam [et al.] : Elsevier, 2017. 682 p. doi: 10.1016/C2014-0-02567-1
 51. Lopatin A. V., Kazantseva N. E., Kazantsev Y. N., D'yakonova O. A., Vilčáková J., Sába P. The efficiency of application of magnetic polymer composites as radio-absorbing materials // *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2008, vol. 53, pp. 487–496. doi: 10.1134/S106422690805001X
 52. Qi Zh., Chunbo L., Zhuang W., Yang Y., Zhiyong X. Preparation of rGO/PVA/CIP composites and their microwave absorption properties // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 479, pp. 337–343. doi: 10.1016/j.jmmm.2018.11.129
 53. Lahsmin Y. K., Heryanto H., Ilyas S., Fahri A. N., Abdullah B., Tahir D. Optical properties determined from infrared spectroscopy and structural properties from diffraction spectroscopy of composites Fe/CNs/PVA for electromagnetic wave absorption // *Optical Materials*, 2021, vol. 111. doi: 10.1016/j.optmat.2020.110639
 54. Abdullah B., Ilyas S., Tahir D. Nanocomposites Fe/Activated Carbon/PVA for Microwave Absorber: Synthesis and Characterization // *Journal of Nanomaterials*, 2018, vol. 2018, article 9823263. doi: 10.1155/2018/9823263
 55. Костишин В. Г., Исаев И. М., Шакирзянов Р. И., Салогуб Д. В., Каюмова А. Р., Олицкий В. К. Радиопоглощающие свойства феррит-полимерных композитов поливиниловый спирт/Ni-Zn феррит // *Журнал технической физики*. 2022. Т. 92, вып. 1. С. 131–137. doi: 10.21883/JTF.2022.01.51862.217-21
 56. Костишин В. Г., Шакирзянов Р. И., Налогин А. Г., Щербakov С. В., Исаев И. М., Немирович М. А., Михайленко М. А., Коробейников М. В., Мезенцева М. П., Салогуб Д. В. Электрофизические и диэлектрические свойства поликристаллов железо-иттриевого феррита-граната, полученных по технологии радиационно-термического спекания // *Физика твердого тела*. 2021. Т. 63, вып. 3. С. 356–362. doi: 10.21883/FTT.2021.03.50586.230
 57. Parashar Jyoti, Saxena V. K., Sharma Jyoti, Bhatnagar Deepak, Sharma K. B. Dielectric behaviour of $\text{Ni}_{0.2} \text{Cu}_{0.2} \text{Zn}_{0.6} \text{Fe}_2\text{O}_4$ spinel ferrite // *Macromolecular Symposia*, 2015, vol. 357, is. 1, pp. 43–46. doi: 10.1002/masy.201400184
 58. Pengfei P., Ning Z. Magnetodielectric effect of Mn–Zn ferrite at resonant frequency // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 416, pp. 256–260. doi: 10.1016/j.jmmm.2016.05.018
 59. Dosoudil R., Ušáková M. High-frequency absorbing performances of carbonyl iron/MnZn ferrite/PVC polymer composites // *Acta Phys. Pol. A*, 2017, vol. 131, no. 4, pp. 687–689. doi: 10.12693/APhysPolA.131.687
 60. Ghorbel N., Kallel A., Boufi S. Molecular dynamics of poly(vinyl alcohol)/cellulose nanofibrils nanocomposites highlighted by dielectric relaxation spectroscopy // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 124, article 105465. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.05.033
 61. Акулов М. А., Кулешов Г. Е. Защитные покрытия на основе композиционных радиоматериалов для снижения уровня электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне // *Актуальные проблемы радиофизики : труды Международной молодежной научной школы, Томск, 25–26 сентября 2017 г. Томск, 2017. С. 9–12.*
 62. Банный В. А., Макаревич А. В., Пинчук Л. С. Влияние размерных и рецептурных параметров полимерных композиционных материалов на их радиофизические характеристики // *Доклады НАН Беларуси*. 2000. Т. 44, № 4. С. 109–111.
 63. Bannyi V. A., Makarevich A. V., Pinchuk L. S., Ahn B. G. Radioabsorbing non-woven composite polymer materials // *Electrostatic and electromagnetic fields – new materials and technologies (EL-TEX'2002) : abstr. of 5th Int. Symp. Lodz, Poland, 2002*, pp. 107–108.
 64. Банный В. А., Ходакова И. Н., Макаревич А. В. Электромагнитные экраны на основе нетканых композиционных материалов // *Химические волокна*. 2002. № 4. С. 54–57.
 65. Fionov F. S., Kraev I. D., Yurkov G. Yu., Solodilov V., Zhukov A., Surgay A., Kuznetsova I., Kolesov V. Radio-absorbing materials based on polymer composites and their application to solving the problems of electromagnetic compatibility // *Polymers*, 2022, vol. 14, is. 15. doi: 10.3390/polym14153026
 66. Kabirov Y. V., Sidorenko E. N., Prutsakova N. V., Belokobylsky M., Letovaltsev A., Chebanova E., Rusakova E. Elastoelectric composite materials with a polymer matrix based on ultrafine iron and polyethylene // *Letters on Materials*, 2021, vol. 11, pp. 17–21. doi: 10.22226/2410-3535-2021-1-17-21
 67. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / под ред. Л. М. Лынькова. Минск : БГУИР, 2000. 283 с.
 68. Ломач В. А., Пинчук Л. С., Гольдаде В. А., Банный В. А. Эффективность несвязанной воды как радиопоглощающего компонента электромагнитных экранов при отрицательных температурах // *Материалы. Технологии. Инструменты*. 2011. Т. 16, № 4. С. 41–44.
 69. Пашкова Л. И. Полимерные гидрогели на основе сшитого поливинилового спирта : дис. канд. хим. наук : 02.00.06. М., 2012. 154 с.
 70. Николаев А. Ф., Мосягина Л. П. Поливиниловый спирт и сополимеры винилового спирта в медицине // *Пластические массы*. 2000. № 3. С. 34–42.
 71. Маленков Г. Г., Яковлев С. В., Гладков В. А. Вода // *Химическая энциклопедия : в 5 т. Т. 1. / гл. ред. И. Л. Кнунянц. М. : Советская энциклопедия*. 1988. С. 394–397.
 72. Fletcher N. H. *The Chemical Physics of Ice*. London : Cambridge University Press, 1970. 288 p.
 73. Пинчук Л. С., Гольдаде В. А. Вода как активный элемент радиопоглощающих материалов // *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Я. Купалы. Серыя 6. Тэхніка*. 2012. № 4. С. 32–42.
 74. Pinchuk L., Goldade V., Kestelman V. Radiation reflection and absorption of materials based on polyvinyl alcohol hydrogels // *Scientific Israel – Technological Advantages*, 2013, vol. 15, no. 1, pp. 1–12.
 75. Пинчук Л. С., Бондаренко П. И., Гольдаде В. А. Радиопоглощающие материалы на основе гидрогелей поливинилового спирта // *Материаловедение*. 2013. № 3. С. 19–27.
 76. Лозинский В. И. Криотропное гелеобразование растворов поливинилового спирта // *Успехи химии*. 1998. Т. 67, № 7. С. 641–655.
 77. Kumar A., Mishra R., Reinwald Yu., Bhat S. Cryogels: Freezing unveiled by trawing // *Materials today*, 2010, vol. 13, no 11, pp. 42–44. doi: 10.1016/S1369-7021(10)70202-9
 78. Бондаренко П. И., Фенок Д. А., Пинчук Л. С., Гольдаде В. А., Овчинников К. В. Эффективность криогелевых сегнетоуполненных радиопоглощающих материалов в СВЧ-диапазоне // *Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития : материалы II республиканской научно-технической конференции (Гродно, 17–18 мая 2012 г.)*. Гродно : ГрГУ им. Янки Купалы, 2012. С. 14–16.
 79. Пинчук Л. С., Гольдаде В. А. Радиопоглощающие материалы на основе криогелей поливинилового спирта // *Доклады НАН Бела-*

- рус. 2013. Т. 57, № 4. С. 114–118.
80. Патент 19894 РБ, МПК D 06M 15/333. Способ модифицирования текстиля / Пинчук Л. С., Гольдаде В. А., Насонова Н. В.; заявитель Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси. N а 20121515; заявл. 31.10.2012; опубл. 28.02.2016.
 81. Патент 18776 РБ, МПК H 01Q 17/00, C 08J 3/075. Способ получения полимерного радиопоглощающего материала / Бондаренко П. И., Пинчук Л. С., Гольдаде В. А., Лыньков Л. М.; заявитель Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси. N а 20120540; заявл. 04.04.2012; опубл. 30.12.2014.
 82. Патент 19730 РБ, МПК D 06M 15/333, H 01Q 17/00. Способ получения радиопоглощающего текстиля / Пинчук Л. С., Гольдаде В. А.; заявитель Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси. N а 20121481; заявл. 25.10.2012; опубл. 30.12.2015.
 83. Патент 15555 РБ, МПК C08J3/075. Способ изготовления криогеля поливинилового спирта / Бондаренко П. И., Пинчук Л. С., Цветкова Е. А., Гольдаде В. А., Дворник А. М.; заявитель Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси. N а 20100310; заявл. 2010.03.04; опубл. 2011.10.30.
 84. Lujun Yu, Qixin Yang, Jinlong Liao, Yaofeng Zhu, Xiang Li, Wentong Yang, Yaqin Fu. A novel 3D silver nanowires@polypyrrole sponge loaded with water giving excellent microwave absorption properties // *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 352, pp. 490–500. doi: 10.1016/j.cej.2018.07.047
 85. Kumar R., Kumar M., Chohan J. S., Kumar S. Overview on metamaterial: History, types and applications // *Mater. Today: Proc.*, 2022, vol. 56, pp. 3016–3024. doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.423
 86. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2009. № 7. С. 70–79.
 87. Smith D. R., Padilla Willie J., Vier D. C., Nemat-Nasser S. C., Schultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity // *Physical Review Letters*, 2000, vol. 84, no. 18, pp. 4184–4187. doi: 10.1103/PhysRevLett.84.4184
 88. *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations* / edited by N. Engheta and R. W. Ziolkowski. USA : John Wiley & Sons, 2006. 440 p.
 89. Vendik I. B., Vendik O. G. Metamaterials and Their Application in Microwaves: A Review // *Technical Physics*, 2013, vol. 58, no. 1, pp. 1–24. doi: 10.1134/S1063784213010234
 90. Семченко И. В., Хахомов С. А. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах : монография. Минск : Белорусская наука, 2019. 279 с.
 91. Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // *Успехи физических наук*. 1967. Т. 92, № 7. С. 517–526.
 92. Stewart R. US Navy ensists Swedish ‘stealth’ technology // *Reinforced Plastics*, 2002, vol. 46, no. 12, pp. 8.
 93. Alitalo P., Tretyakov S. Electromagnetic cloaking with metamaterials // *Materials today*, 2009, vol. 12, is. 3, pp. 22–29. doi: 10.1016/S1369-7021(09)70072-0
 94. Sarychev A. K., Shalaev V. M. *Electrodynamics of metamaterials*. New Jersey [et al.] : World Scientific Publ., 2007. 273 p.
 95. Sun J., Litchinitser N. M. 9 – Metamaterials // *Fundamentals and Applications of Nanophotonics* / ed. J. W. Haus. UK : Woodhead Publ, 2016, pp. 253–307.
 96. Semchenko I. V., Khakhomov S. A., Tretyakov S. A. Chiral metamaterial with unit negative refraction index // *The European Physical Journal. Applied Physics*, 2009, vol. 46, no. 3. doi: 10.1051/epjap:2008131
 97. Saenz E., Semchenko I. V., Khakhomov S. A., Guven K., Gonzalo R., Ozbay E., Tretyakov S. Modeling of Spirals with Equal Dielectric, Magnetic, and Chiral Susceptibilities // *Electromagnetics*, 2008, vol. 28, is. 7, pp. 476–493. doi: 10.1080/02726340802322528
 98. Кившарь Ю. С., Орлов А. А. Перестраиваемые и нелинейные метаматериалы // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2012. № 3 (79). С. 1–10.
 99. Bradley D. Visibly invisible: optical materials // *Materials today*, 2011, vol. 14, is. 3, pp. 65. doi: 10.1016/S1369-7021(11)70047-5
 100. Двойное лучепреломление // *Оптика жизни: руководство биолога по свету в природе* : Гл. 8. Поляризация / С. Джонсен. 2012. [Электронный ресурс] URL: <https://babylonzoo.blog/optics/birefringence.html> (дата обращения: 23.09.2023).
 101. Rainwater D., Kerkhoff A., Melin K., Soric J. C., Moreno G., Alù A. Experimental verification of three-dimensional plasmonic cloaking in free-space // *New Journal of Physics*, 2012, vol. 14. doi: 10.1088/1367-2630/14/1/013054
 102. Сонгсонг Цянь, Банный В. А., Самофалов А. Л., Семченко И. В., Хахомов С. А. Поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе полимерных композитов и киральных структур // *Проблемы физики, математики и техники*. 2014. № 4 (21). С. 40–45.
 103. Xiang Li, Lujun Yu, Laiming Yu, Yubing Dong, Qiang Gao, Qixin Yang, Wentong Yang, Yaofeng Zhu, Yaqin Fu. Chiral polyaniline with superhelical structures for enhancement in microwave absorption // *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 352, pp. 745–755. doi: 10.1016/j.cej.2018.07.096
 104. Barathi Dassan E. G., Anjang Ab Rahman A., Abidin M. S. Z., Akil H. M. Carbon nanotube–reinforced polymer composite for electromagnetic interference application: A review // *Nanotechnology Reviews*, 2020, vol. 9, pp. 768–788. doi: 10.1515/ntrev-2020-0064
 105. Zakharychev E. A., Razov E. N., Semchikov Y. D., Zakharycheva N. S., Kabina M. A., Bakina L. I., Zefirov V. L. Radar absorbing properties of carbon nanotubes/polymer composites in the V-band // *Bull. Mater. Sci.*, 2016, vol. 39, pp. 451–456. doi: 10.1007/s12034-016-1168-0
 106. Yankai Zhao, Song Bi, Genliang Hou, Zhaohui Liu, Hao Li, Yongzhi Song, Zhiling Hou. Preparation and absorption performance of CNTs/PUR honeycomb composite absorbing material // *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2076. doi: 10.1088/1742-6596/2076/1/012026
 107. Kallumottakkal M., Hussein M. I., Haik Y., Latif T. B. A. Functionalized-CNT polymer composite for microwave and electromagnetic shielding // *Polymers*, 2021, vol. 13. doi: 10.3390/polym13223907
 108. Wentong Yang, Qianhe Ji, Keyi Xiong, Yubing Dong, Yaqin Fu, Yaofeng Zhu. Development of a short carbon fiber@polyaniline/polydimethylsiloxane flexible composite film with excellent microwave absorption properties at an ultralow filler content // *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, vol. 5, is. 12, pp. 10265–10275. doi: 10.1021/acsapm.3c02046
 109. Yue Yang, Chen Qian, Puqi Hu, Wentong Yang, Zimo He, Yubing Dong, Yaqin Fu, Yaofeng Zhu. Nitrogen-doped core-shell Fe/Fe₃C@C nanocomposites for electromagnetic wave absorption // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2023, vol. 34. doi: 10.1007/s10854-023-11263-3
 110. Zimo He, Yiyuan Shi, Wentong Yang, Chen Qian, Yaofeng Zhu Multifunctional lightweight PANI/Ti₃C₂T_x-PVDF composite foam for efficient microwave absorption // *Polymer Composites*, 2023, vol. 44, is. 7, pp. 3990–4000.
 111. Wentong Yang, Jiawen Sun, Wenyu Xu, Zimo He, Yubing Dong, Yaqin Fu, Yaofeng Zhu. Development of wrinkled reduced graphene oxide wrapped polymer-derived carbon microspheres as viable microwave absorbers via a charge-driven self-assembly strategy // *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, vol. 630, pp. 34–45. doi: 10.1016/j.jcis.2022.09.144
 112. Wentong Yang, Jiawen Sun, Deyun Liu, Wenwen Fu, Yubing Dong, Yaqin Fu, Yaofeng Zhu. Rational design of hierarchical structure of carbon@polyaniline composite with enhanced microwave absorption properties // *Carbon*, 2022, vol. 194, pp. 114–126. doi: 10.1016/j.carbon.2022.03.061

113. Yiyuan Shi, Sisi Li, Zhimiao Tian, Xiansen Yang, Yubing Dong, Yaofeng Zhu, Yaqin Fu. Self-assembled lightweight three-dimensional hierarchically porous $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene@polyaniline hybrids for superior microwave absorption // *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 892. doi: 10.1016/j.jallcom.2021.162194
114. Xiang Li, Laiming Yu, Weikun Zhao, Yiyuan Shi, Lujun Yu, Yubing Dong, Yaofeng Zhu, Yaqin Fu, Xiangdong Liu, Feiya Fu. Prism-shaped hollow carbon decorated with polyaniline for microwave absorption // *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 379. doi: 10.1016/j.cej.2019.122393
115. Qixin Yang, Yiyuan Shi, Yu Fang, Yubing Dong, Qingqing Ni, Yaofeng Zhu, Yaqin Fu. Construction of polyaniline aligned on magnetic functionalized biomass carbon giving excellent microwave absorption properties // *Composites Science and Technology*, 2019, vol. 174, pp. 176–183. doi: 10.1016/j.compscitech.2019.02.031
116. Lujun Yu, Laiming Yu, Yubing Dong, Yaofeng Zhu, Yaqin Fu, Qingqing Ni. Compressible polypyrrole aerogel as a lightweight and wide-band electromagnetic microwave absorber // *Journal of Materials Science. Materials in Electronics*, 2019, vol. 30, is. 6, pp. 5598–5608. doi: 10.1007/s10854-019-00853-9
117. Lujun Yu, Yaofeng Zhu, Yaqin Fu. Waxberry-like carbon@polyaniline microspheres with high-performance microwave absorption // *Applied Surface Science*, 2018, vol. 427, pp. 451–457. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.08.078

References

1. *Elektromagnitnye polya i zdorov'e cheloveka* [Electromagnetic fields and human health]. Ed. Yu. G. Grigor'ev. Moscow : RUDN Publ., 2002. 177 p.
2. Wood A., Mate R., Karipidis K. Meta-analysis of in vitro and in vivo studies of the biological effects of low-level millimetre waves. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2021, vol. 31, pp. 606–613. doi: 10.1038/s41370-021-00307-7
3. Dovbysh V. N., Maslov M. Yu., Spodobaev Yu. M. *Elek-tromagnitnaya bezopasnost' elementov energeticheskikh sistem* [Electromagnetic safety of elements of energy systems]. Samara : Sodruzhestvo Publ., 2009. 198 p.
4. Ivanov V. A., Il'inskiy L. Ya., Fuzik M. I. *Elektro-magnitnaya sovместimost' radioelektronnykh sredstv* [Electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment]. Kiev : Tekhnika Publ., 1983. 120 p.
5. Latypova A. F., Kalinin Yu. E. Analiz perspektivnykh radiopogloshchayushchikh materialov [Analysis of promising radio-absorbing materials]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2012, vol. 8, no. 6, pp. 70–76.
6. Kraev I. D., Shul'deshov E. M., Platonov M. M., Yurkov G. Yu. Obzor kompozitsionnykh materialov, sochetayushchikh zvukozashchitnye i radiozashchitnye svoystva [Review of composite materials combining sound-protective and radioprotective properties]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2016, no. 4(45), pp. 61–67.
7. Tong X. C. *Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding*. New York : CRC Press, 2009. 340 p.
8. Yener S. C., Cerezci O. Material analysis and application for radio frequency electromagnetic wave shielding. *Acta Phys. Pol. A*, 2016, vol. 129, no. 4, pp. 635–638. doi: 10.12693/APhysPolA.129.635
9. Bogush V. A., Borbot'ko T. V., Gusinskiy A. V., Lyn'kov L. M., Tamelo A. A. *Elektromagnitnye izlucheniya. Metody i sredstva zashchity* [Electromagnetic radiation. Methods and means of protection]. Ed. L. M. Lyn'kov. Minsk : Bestprint Publ., 2003. 406 p.
10. Lagar'kov A. N., Pogosyan M. A. Fundamental'nye i prikladnye problemy stels-tekhnologii [Fundamental and applied problems of stealth technologies]. *Vestnik RAN* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2003, vol. 73, no. 9, pp. 779–787.
11. Ahmad H., Tariq A., Shehzad A., Faheem M. S., Shafiq M., Rashid I. A., Afzal A., Munir A., Riaz M. T., Haider H. T., Afzal A., Qadir M. B., Khaliq Z. Stealth technology: Methods and composite materials — A review. *Polym. Compos.*, 2019, vol. 40, pp. 4457–4472.
12. *Dinamika radioelektroniki-3* [Dynamics of radioelectronics-3]. Ed. Yu. I. Borisov. Moscow : Tekhnosfera Publ., 2009. 176 p.
13. Pinchuk L. S., Gol'dade V. A., Shil'ko S. V., Neverov A. S. *Vvedenie v sistematiku umnykh materialov* [Introduction to the taxonomy of smart materials]. Ed. L. S. Pinchuk. Minsk : Belaruskaya navuka Publ., 2013. 399 p.
14. Goldade V. A., Shil'ko S. V., Neverov A. S. *Smart materials taxonomy*. Boca Raton ; London ; New York : CRC Press, 2016. 259 p.
15. Alekseev A. G., Shtager E. A., Kozyrev S. V. *Fizicheskie osnovy tekhnologii stealth* [Physical foundations of stealth technology]. Saint-Petersburg : VVM Publ., 2007. 284 p.
16. Fedyunin P. A., Stepanenko I. T. Chastotnyy diapazon radiopogloshchayushchikh pokrytiy i otsenka ikh predel'nykh svoystv [Frequency range of radio-absorbing coatings and assessment of their limiting properties]. *Vestnik TGU* [Bulletin of TSU], 2002, vol. 7, is. 1, pp. 102–103.
17. Appolonskiy S. M. *Zashchita tekhnosfery ot vozdeystviya fizicheskikh poley i izlucheniya. T. 2. Zashchitnye materialy ot fizicheskikh poley i izlucheniya* [Protection of the technosphere from the effects of physical fields and radiation. Vol. 2. Protective materials from physical fields and radiation]. Moscow : Rusayns Publ., 2020, pp. 77–80.
18. Silva M. W. B., Kretly L. C. A new concept of RAM-radiation absorbent material: Applying corrugated surfaces to improve reflectivity. *2011 SBMO/IEEE MTT-S Interna-tional Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011)*. USA : IEEE, 2012, pp. 556–560. doi: 10.1109/IMOC.2011.6169338
19. Yao Y., Jin S., Zou H., Li L., Ma X., Lv G., Gao F., Lv X., Shu Q. Polymer-based lightweight materials for electromagnetic interference shielding: a review. *J. Mater. Sci.*, 2021, vol. 56, pp. 6549–6580. doi: 10.1007/s10853-020-05635-x
20. Delfini A., Albano M., Vricella A., Santoni F., Rubini G., Pastore R., Marchetti M. Advanced Radar Absorbing Ceramic-Based Materials for Multifunctional Applications in Space Environment. *Materials*, 2018, vol. 11. doi: 10.3390/ma11091730
21. Barudov E., Ivanova M. Study of the parameters of conductive textile fabrics for protection against high-frequency electromagnetic radiation. *13th Electrical Engineering Faculty Conference*. USA : IEEE, 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/BulEF53491.2021.9690835
22. Chertov A. N., Gorbunova E. V., Sadovnichii R. V., Rozhkova N. N. Schungite raw material quality evaluation using image processing method. *SPIE Optical Metrology*. 2017, Munich, Germany, vol. 10334, pp. 206–215. doi: 10.1117/12.2270389
23. Kazmina O., Suslyayev V., Dorozhkin K., Kuznetsov V. L., Lebedeva E. The foam-glass material for a radio frequency echoless chambers. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 110. doi: 10.1088/1757-899X/110/1/012086
24. Geetha S., Kumar S., Rao K. K., Vijayan M., Trivedi D. C. EMI shielding: Methods and materials - A Review. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2009, vol. 112, pp. 2073–2086. doi: 10.1002/app.29812
25. Pinchuk L. S., Bannyi V. A., Sklyar A. V., Gol'dade V. A. Vliyaniye fiziko-khimicheskikh protsessov na mezhfaznoy granitse polietilen-napolnitel' na radiofizicheskie svoystva kompozitov [The influence of physical and chemical processes at the polyethylene-filler interface on the radiophysical properties of composites]. *Perspektivnye materialy* [Perspective Materials], 2009, no. 2, pp. 5–12.
26. Gorshenev V. N., Kolesov V. V., Fionov A. S., Erikhman N. S. Mnogosloynnye pokrytiya s izmenyaemymi elektro-dinamicheskimi kharakteristikami na osnove napolnen-nykh polimernykh matrits [Multilayer coatings with variable electrodynamic characteristics based on filled polymer matrices]. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2016, no. 11, pp. 345–354.
27. Benderskiy G. P., Molostova Yu. M., Rumyantsev P. A., Se-rebryannikov S. V., Serebryannikov S. S. Kompozitsionnye radiopogloshchayushchie materialy na osnove poroshkov ferritov [Composite radio-absorbing materials based on ferrite powders]. *Izvestiya*

- vuzov. *Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya* [News of universities. Powder metallurgy and functional coatings], 2022, vol. 16, no. 2, pp. 13–21. doi: 10.17073/1997-308X-2022-2-13-21
28. Banny V. A., Gol'dade V. A., Pinchuk L. S. Vzaimodeystvie SVCh-izlucheniya s polimernym kompozitnym elek-tromagnitnym ekranom: fizicheskie modeli i eksperiment [Interaction of microwave radiation with a polymer composite electromagnetic screen: physical models and experiment]. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty* [Materials. Technologies. Instruments], 2008, vol. 13, no. 2, pp. 45–51.
 29. Bogush V. A., Rodionova V. N., Tanana O. V. Radiopogloshchayushchie materialy dlya prakticheskikh prilozheniy v SVCh diapazone [Radio-absorbing materials for practical applications in the microwave range]. Available at: <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/38077/1/18-22.pdf> (accessed 23.09.2023).
 30. Nikolaychuk G., Ivanov V., Yakovlev S. Radiopogloshchayu-shchie materialy na osnove nanostruktur [Radio-absorbing materials based on nanostructures]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: science, technology, business], 2010, no. 1, pp. 92–95.
 31. Choi J. H., Nam Y. W., Jang M. S., Kim C. G. Characteristics of silicon carbide fiber-reinforced composite for microwave absorbing structures. *Compos. Struct.*, 2018, vol. 202, pp. 290–295. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.01.081
 32. Li Z., Haigh A., Soutis C., Gibson A. X-band microwave characterization and analysis of carbon fiber-reinforced polymer composites. *Compos. Struct.*, 2019, vol. 208, pp. 224–232. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.09.099
 33. Setua D. K., Mordina B., Srivastava A. K., Roy D., Prasad N. E. Chapter 18. Carbon nanofibers-reinforced polymer nanocomposites as efficient microwave absorber. *Fiber-Reinforced Nanocomposites: Fundamentals and Applications. Micro and Nano Technologies*. Eds. Baoguo Han [et al.]. Amsterdam : Elsevier, 2020, pp. 395–430. doi: 10.1016/B978-0-12-819904-6.00018-9
 34. Ruiz-Perez F., López-Estrada S. M., Tolentino-Hernández R. V., Caballero-Briones F. Carbon-based radar absorbing materials: A critical review. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2022, vol. 7, is. 3. doi: 10.1016/j.jsamd.2022.100454
 35. Chung D. D. L. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*, 2001, vol. 39, pp. 279–285. doi: 10.1016/S0008-6223(00)00184-6
 36. Lagarkov A. N., Semenenko V. N., Kisel V. N., Chistyayev V. A. Development and simulation of microwave artificial magnetic composites utilizing nonmagnetic inclusions. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2003, vol. 258–259, pp. 161–166. doi: 10.1016/S0304-8853(02)01031-4
 37. Serebryannikov S. V., Borodulin V. N., Cheparin V. P. [et al.] Fiziko-mekhanicheskie svoystva kompozitsionnykh radiopogloshchayushchikh materialov na osnove ferritov [Physical-mechanical properties of composite radio-absorbing materials based on ferrites]. *Sbornik trudov XVI mezhdunar. konf. «Radiolokatsiya i radiosvyaz»* [Collection of scientific works of XVI international Conf. “Radiolocation and radio communications”]. Moscow : MIREA Publ., 2008, pp. 579–587.
 38. Lyn'kov L. M., Bogush V. A., Borbot'ko T. V., Ukrainets E. A., Nasonova N. V. Noveye materialy dlya ekranov elektromagnitnogo izlucheniya [New materials for electromagnetic radiation screens]. *Doklady BGUIR* [Reports of BSUIR], 2004, no. 3, pp. 152–167.
 39. Kraev I. D., Sorokin A. E., Olikhova Yu. V., Titkova Yu. M. Konstruktsionnye materialy radiotekhnicheskogo naznacheniya, modifitsirovannye uglerodnymi nanotrubkami [Structural materials for radio engineering purposes modified with carbon nanotubes]. *Plasticheskie massy* [Plastics], 2020, no. 9–10, pp. 62–66. doi: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-62-66
 40. Labunov V. A., Komarov F. F., Karpovich V. A., Rodionova V. N., Komissarov I. V., Karpovich V. B., Stanovoy P. G., Tanana O. V., Markovskiy A. V. Elektromagnitnye kharakteristiki nanouglerodnykh kompozitnykh materialov v SVCh-diapazone [Electromagnetic characteristics of nanocarbon composite materials in the microwave range]. *Fullereny i nanostrukturny v kondensirovannykh sredakh* [Fullerenes and nanostructures in condensed matter]. Eds: P. A. Vityaz' [et al.]. Minsk : BGU Publ., 2011, pp. 14–22.
 41. Zhdanok S. A., Krauklis A. V., Buyakov I. F., Karpovich V. A., Rodionova V. N., Tanana O. V. Radiopogloshchayushchie svoystva uglerodnykh nanomaterialov [Radio-absorbing properties of carbon nanomaterials]. *Nanotekhnika* [Nanotechnology], 2011, no. 2, pp. 72–75.
 42. Wong K. H., Pickering S. J., Rudd C. D. Recycled carbon fiber reinforced polymer composite for electromagnetic in-terference shielding. *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, 2010, vol. 41, is. 6, pp. 693–702. doi: 10.1016/j.compositesa.2010.01.012
 43. Tanana O. V. Nanostrukturnye uglerodnye materialy dlya prakticheskikh prilozheniy v SVCh diapazone [Nanostructured carbon materials for practical applications in the microwave range]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya S. Fundamental'nye nauki* [Bulletin of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences], 2019, no. 4, pp. 84–90.
 44. STB 1873-2008. Uglerod nanostrukturirovanny. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 1873-2008. Nanostructured carbon. Technical conditions]. Minsk : Gosstandart Publ., 2008. 12 p.
 45. Banny V. A., Pinchuk L. S., Gol'dade V. A. Fiziko-khimicheskie i tekhnologicheskie osobennosti formirovaniya polimernykh kompozitnykh radiopogloshchayushchikh materialov [Physical-chemical and technological features of the formation of polymer composite radio-absorbing materials]. *Materialovedenie* [Materials Science], 2007, no. 6, pp. 17–24.
 46. Aneli J., Natriashvili T., Shamaauri L. Radio wave absorbing polymer composites with electric conducting and magnetic particles. *Bull. Georgian National Acad. Sci.*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 47–52.
 47. Kumar D., Moharana A., Kumar A. Current trends in spinel based modified polymer composite materials for electro-magnetic shielding. *Mater. Today Chem.*, 2020, vol. 17. doi: 10.1016/j.mtchem.2020.100346
 48. Narang S. B., Pubby K. Nickel Spinel Ferrites: A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, vol. 519. doi: 10.1016/j.jmmm.2020.167163
 49. Zeng X., Cheng X., Yu R., Stucky G. D. Electromagnetic microwave absorption theory and recent achievements in microwave absorbers. *Carbon*, 2020, vol. 168, pp. 606–623. doi: 10.1016/j.carbon.2020.07.028
 50. Chung D. D. L. *Carbon composites. Composites with carbon fibers, nanofibers, and nanotubes*. 2nd edition. Amsterdam [et al.] : Elsevier, 2017. 682 p. doi: 10.1016/C2014-0-02567-1
 51. Lopatin A. V., Kazantseva N. E., Kazantsev Y. N., D'yakonova O. A., Vilčáková J., Sába P. The efficiency of application of magnetic polymer composites as radio-absorbing materials. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2008, vol. 53, pp. 487–496. doi: 10.1134/S106422690805001X
 52. Qi Zh., Chunbo L., Zhuang W., Yang Y., Zhiyong X. Prepa-ration of rGO/PVA/CIP composites and their microwave absorption properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 479, pp. 337–343. doi: 10.1016/j.jmmm.2018.11.129
 53. Lahsmin Y. K., Heryanto H., Ilyas S., Fahri A. N., Abdul-lah B., Tahir D. Optical properties determined from infrared spectroscopy and structural properties from diffraction spectroscopy of composites Fe/CNs/PVA for electromag-netic wave absorption. *Optical Materials*, 2021, vol. 111. doi: 10.1016/j.optmat.2020.110639
 54. Abdullah B., Ilyas S., Tahir D. Nanocomposites Fe/Activated Carbon/PVA for Microwave Absorber: Synthesis and Characterization. *Journal of Nanomaterials*, 2018, vol. 2018, article 9823263. doi: 10.1155/2018/9823263
 55. Kostishin V. G., Isaev I. M., Shakirzyanov R. I., Salogub D. V., Kayumova A. R., Olitskiy V. K. Radiopogloshchayushchie svoystva ferrit-polimernykh kompozitov polivinilovyy spirt/Ni-Zn ferrit [Radio absorption properties of ferrite-polymer composites polyvinyl alcohol/Ni-Zn ferrite]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2022, vol. 92, is. 1, pp. 131–137. doi: 10.21883/JTF.2022.01.51862.217-21
 56. Kostishin V. G., Shakirzyanov R. I., Nalagin A. G., Shcher-bakov S. V., Isaev I. M., Nemirovich M. A., Mikhaylenko M. A., Korobeynikov M. V., Mezentsseva M. P., Salogub D. V. Elektrofizicheskie i dielektricheskie svoystva polikristallov zhelezo-itrivogo ferrita-granata,

- poluchennykh po tekhnologii radiatsionno-termicheskogo spekaniya [Electrophysical and dielectric properties of polycrystals of yttrium iron garnet obtained using radiation-thermal sintering technology]. *Fizika tverdogo tela* [Solid State Physics], 2021, vol. 63, vis. 3, pp. 356–362. doi: 10.21883/FTT.2021.03.50586.230
57. Parashar Jyoti, Saxena V. K., Sharma Jyoti, Bhatnagar Deepak, Sharma K. B. Dielectric behaviour of $\text{Ni}_{0.2}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ spinel ferrite. *Macromolecular Symposia*, 2015, vol. 357, is. 1, pp. 43–46. doi: 10.1002/masy.201400184
 58. Pengfei P., Ning Z. Magnetodielectric effect of Mn–Zn ferrite at resonant frequency. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 416, pp. 256–260. doi: 10.1016/j.jmmm.2016.05.018
 59. Dosoudil R., Ušáková M. High-frequency absorbing per-formances of carbonyl iron/MnZn ferrite/PVC polymer composites. *Acta Phys. Pol. A*, 2017, vol. 131, no. 4, pp. 687–689. doi: 10.12693/APhysPolA.131.687
 60. Ghorbel N., Kallel A., Boufi S. Molecular dynamics of poly(vinyl alcohol)/cellulose nanofibrils nanocomposites highlighted by dielectric relaxation spectroscopy. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 124, art. 105465. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.05.033
 61. Akulov M. A., Kuleshov G. E. Zashchitnye pokrytiya na osnove kompozitsionnykh radiomaterialov dlya snizheniya urovnya elektromagnitnogo izlucheniya v SVCh-diapazone [Protective coatings based on composite radio materials to reduce the level of electromagnetic radiation in the microwave range]. *Trudy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy shkoly «Aktual'nye problemy radiofiziki»* [Proceedings of the International Youth Scientific “Current problems of radiophysics”]. Tomsk, 2017, pp. 9–12.
 62. Bannyy V. A., Makarevich A. V., Pinchuk L. S. Vliyanie razmernykh i retsepturnykh parametrov polimernykh kom-pozitsionnykh materialov na ikh radiofizicheskie kharakteristiki [Influence of dimensional and formulation parameters of polymer composites on their radiophysical characteristics]. *Doklady NAN Belarusi* [Reports of the National Academy of Sciences of Belarus], 2000, vol. 44, no. 4, pp. 109–111.
 63. Bannyy V. A., Makarevich A. V., Pinchuk L. S., Ahn B. G. Radioabsorbing non-woven composite polymer materials. *Abstr. of 5th Int. Symp “Electrostatic and electromagnetic fields – new materials and technologies” (EL-TEX'2002)*. Lodz, Poland, 2002, pp. 107–108.
 64. Bannyy V. A., Khodakova I. N., Makarevich A. V. Elektro-magnitnye ekrany na osnove netkanykh kompozitsionnykh materialov [Electromagnetic screens based on non-woven composite materials]. *Khimicheskie volokna* [Chemical fibers], 2002, no. 4, pp. 54–57.
 65. Fionov F. S., Kraev I. D., Yurkov G. Yu., Solodilov V., Zhukov A., Surgay A., Kuznetsova I., Kolesov V. Radio-absorbing materials based on polymer composites and their application to solving the problems of electromagnetic compatibility. *Polymers*, 2022, vol. 14, is. 15. doi: 10.3390/polym14153026
 66. Kabirov Y. V., Sidorenko E. N., Prutsakova N. V., Beloko-bylsky M., Letovaltsev A., Chebanova E., Rusakova E. Elastoelectric composite materials with a polymer matrix based on ultrafine iron and polyethylene. *Letters on Materials*, 2021, vol. 11, pp. 17–21. doi: 10.22226/2410-3535-2021-1-17-21
 67. *Gibkie konstruksii ekranov elektromagnitnogo izlucheniya* [Flexible designs of electromagnetic radiation screens]. Ed. L. M. Lyn'kov. Minsk : BGUR Publ., 2000. 283 p.
 68. Lomach V. A., Pinchuk L. S., Gol'dade V. A., Bannyy V. A. Effektivnost' nesvyazannoy vody kak radiopogloshchayu-shchego komponenta elektromagnitnykh ekranov pri otri-tsatel'nykh temperaturakh [Efficiency of unbound water as a radio-absorbing component of electromagnetic screens at subzero temperatures]. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty* [Materials. Technologies. Instruments], 2011, vol. 16, no. 4, pp. 41–44.
 69. Pashkova L. I. Polimernye gidrogeli na osnove sshitogo polivinilovogo spirta. Diss. kand. khim. nauk [Polymer hydrogels based on cross-linked polyvinyl alcohol. Ph.D chem. sci. diss.]. Moscow, 2012. 154 p.
 70. Nikolaev A. F., Mosyagina L. P. Polivinilovyy spirt i sopolimery vinilovogo spirta v meditsine [Polyvinyl alcohol and vinyl alcohol copolymers in medicine]. *Plasticheskie massy* [Plastics], 2000, no. 3, pp. 34–42.
 71. Malenkov G. G., Yakovlev S. V., Gladkov V. A. Voda [Water]. *Khimicheskaya entsiklopediya* [Chemical Encyclopedia]. Ed. I. L. Knunyants. Moscow : Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1988, vol. 1, pp. 394–397.
 72. Fletcher N. H. *The Chemical Physics of Ice*. London : Cambridge University Press, 1970. 288 r.
 73. Pinchuk L. S., Gol'dade V. A. Voda kak aktivnyy element radiopogloshchayushchikh materialov [Water as an active element of radio-absorbing materials]. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhavnaga universiteta imya Ya. Kupaly. Seryya 6. Tekhnika* [Bulletin of the Ya. Kupala Grodno State University. Series 6: Technology], 2012, no. 4, pp. 32–42.
 74. Pinchuk L., Goldade V., Kestelman V. Radiation reflection and absorption of materials based on polyvinyl alcohol hydrogels. *Scientific Israel – Technological Advantages*, 2013, vol. 15, no. 1, pp. 1–12.
 75. Pinchuk L. S., Bondarenko P. I., Gol'dade V. A. Radio-pogloshchayushchie materialy na osnove gidrogeley polivi-nilovogo spirta [Radio-absorbing materials based on polyvinyl alcohol hydrogels]. *Materialovedenie* [Materials Science], 2013, no. 3, pp. 19–27.
 76. Lozinskiy V. I. Kriotropnoe geleobrazovanie rastvo-rov polivinilovogo spirta [Cryotropic gelation of polyvinyl alcohol solutions]. *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews], 1998, vol. 67, no. 7, pp. 641–655.
 77. Kumar A., Mishra R., Reinwald Yu., Bhat S. Cryogels: Freezing unveiled by trawing. *Materials today*, 2010, vol. 13, no 11, pp. 42–44. doi: 10.1016/S1369-7021(10)70202-9
 78. Bondarenko P. I., Fenyuk D. A., Pinchuk L. S., Gol'dade V. A., Ovchinnikov K. V. Effektivnost' kriogelevykh se-gnetonapolnennykh radiopogloshchayushchikh materialov v SVCh-diapazone [Efficiency of cryogel ferroelectric-filled radio-absorbing materials in the microwave range]. *Materialy II respublikanskoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Promyshlennost' regiona: problemy i perspektivy innovatsionnogo razvitiya»* [Materials of the II Republican Scientific and Technical Conference “Industry of the region: problems and prospects for innovative development”]. Grodno, 2012, pp. 14–16.
 79. Pinchuk L. S., Gol'dade V. A. Radiopogloshchayushchie mate-rialy na osnove kriogeley polivinilovogo spirta [Radio-absorbing materials based on polyvinyl alcohol cryogels]. *Doklady NAN Belarusi* [Reports of the National Academy of Sciences of Belarus], 2013, vol. 57, no. 4, pp. 114–118.
 80. Pinchuk L. S., Gol'dade V. A., Nasonova N. V. Sposob modifitsirovaniya tekstilya [Method of modifying textiles]. Patent BY, no. 19894, 2016.
 81. Bondarenko P. I., Pinchuk L. S., Gol'dade V. A., Lyn'kov L. M. Sposob polucheniya polimernogo radiopogloshchayushchego materiala [Method for producing polymeric radio-absorbing material]. Patent BY, no. 18776, 2014.
 82. Pinchuk L. S., Gol'dade V. A. Sposob polucheniya radiopogloshchayushchego tekstilya [Method for producing radio-absorbing textiles]. Patent BY, no. 19730, 2015.
 83. Bondarenko P. I., Pinchuk L. S., Tsvetkova E. A., Gol'dade V. A., Dvornik A. M. Sposob izgotovleniya kriogelya polivinilovogo spirta [Method for producing polyvinyl alcohol cryogel]. Patent BY, no. 15555, 2011.
 84. Lujun Yu, Qixin Yang, Jinlong Liao, Yaofeng Zhu, Xiang Li, Wentong Yang, Yaqin Fu. A novel 3D silver nan-owires@polypyrrole sponge loaded with water giving excellent microwave absorption properties. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 352, pp. 490–500. doi: 10.1016/j.cej.2018.07.047
 85. Kumar R., Kumar M., Chohan J. S., Kumar S. Overview on metamaterial: History, types and applications. *Mater. Today: Proc.*, 2022, vol. 56, pp. 3016–3024. doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.423

86. Slyusar V. Metamaterialy v antennoy tekhnike: istoriya i osnovnye printsipy [Metamaterials in antenna technology: history and basic principles]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: science, technology, business], 2009, no. 7, pp. 70–79.
87. Smith D. R., Padilla Willie J., Vier D. C., Nemat-Nasser S. C., Schultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical Review Letters*, 2000, vol. 84, no. 18, pp. 4184–4187. doi: 10.1103/PhysRevLett.84.4184
88. *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*. Eds. N. Engheta and R. W. Ziolkowski. USA : John Wiley & Sons, 2006. 440 p.
89. Vendik I. B., Vendik O. G. Metamaterials and Their Application in Microwaves: A Review. *Technical Physics*, 2013, vol. 58, no. 1, pp. 1–24. doi: 10.1134/S1063784213010234
90. Semchenko I. V., Khakhomov S. A. *Elektromagnitnye volny v metamaterialakh i spiral'nykh strukturakh* [Electromagnetic waves in metamaterials and spiral structures: monograph]. Minsk : Belaruskaya navuka, 2019. 279 p.
91. Veselago V. G. Elektrodinamika veshchestv s odnovenno otritsatel'nyimi znacheniyami ϵ i μ [Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)], 1967, vol. 92, no. 7, pp. 517–526.
92. Stewart R. US Navy ensists Swedish 'stealth' technology. *Reinforced Plastics*, 2002, vol. 46, no. 12, pp. 8.
93. Alitalo P., Tretyakov S. Electromagnetic cloaking with met-amaterials. *Materials today*, 2009, vol. 12, is. 3, pp. 22–29. doi: 10.1016/S1369-7021(09)70072-0
94. Sarychev A. K., Shalaev V. M. Electrodynamics of met-amaterials. New Jersey [et al.] : World Scientific Publ., 2007. 273 p.
95. Sun J., Litchinitser N. M. 9 – Metamaterials. *Fundamentals and Applications of Nanophotonics*. Ed. J. W. Haus. UK : Woodhead Publ, 2016, pp. 253–307.
96. Semchenko I. V., Khakhomov S. A., Tretyakov S. A. Chiral metamaterial with unit negative refraction index. *The European Physical Journal. Applied Physics*, 2009, vol. 46, no. 3. doi: 10.1051/epjap:2008131
97. Saenz E., Semchenko I. V., Khakhomov S. A., Guven K., Gonzalo R., Ozbay E., Tretyakov S. Modeling of Spirals with Equal Dielectric, Magnetic, and Chiral Susceptibilities. *Electromagnetics*, 2008, vol. 28, is. 7, pp. 476–493. doi: 10.1080/02726340802322528
98. Kivshar' Yu. S., Orlov A. A. Perestraivaemye i nelineynye metamaterialy [Tunable and nonlinear metamaterials]. *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics], 2012, no. 3 (79), pp. 1–10.
99. Bradley D. Visibly invisible: optical materials. *Materials today*, 2011, vol. 14, is. 3, pp. 65. doi: 10.1016/S1369-7021(11)70047-5
100. Dvoynoe lucheprelomlenie [Birefringence]. Johnsen S. Optika zhizni: rukovodstvo biologa po svetu v prirode Gl. 8. Poliarizatsiya [The Optics of Life: A Biologist's Guide to Light in Nature. Ch. 8. Polarization]. (2012) Available at: <https://babylonzoo.blog/optics/birefringence.html> (accessed 23.09.2023).
101. Rainwater D., Kerkhoff A., Melin K., Soric J. C., Moreno G., Alù A. Experimental verification of three-dimensional plasmonic cloaking in free-space. *New Journal of Physics*, 2012, vol. 14. doi: 10.1088/1367-2630/14/1/013054
102. Songsong Tsyau, Banny V. A., Samofalov A. L., Semchenko I. V., Khakhomov S. A. Poglotiteli elektromagnitnogo izlucheniya SVCh-diapazona na osnove polimernykh kompozitov i kiral'nykh struktur [Microwave electromagnetic radiation absorbers based on polymer composites and chiral structures]. *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki* [Problems of physics, mathematics and technology], 2014, no. 4 (21), pp. 40–45.
103. Xiang Li, Lujun Yu, Laiming Yu, Yubing Dong, Qiang Gao, Qixin Yang, Wentong Yang, Yaofeng Zhu, Yaqin Fu. Chiral polyaniline with superhelical structures for enhancement in microwave absorption. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 352, pp. 745–755. doi: 10.1016/j.cej.2018.07.096
104. Barathi Dassan E. G., Anjang Ab Rahman A., Abidin M. S. Z., Akil H. M. Carbon nanotube-reinforced polymer composite for electromagnetic interference application: A review. *Nanotechnology Reviews*, 2020, vol. 9, pp. 768–788. doi: 10.1515/ntrev-2020-0064
105. Zakharychev E. A., Razov E. N., Semchikov Y. D., Zakharycheva N. S., Kabina M. A., Bakina L. I., Zefirov V. L. Radar absorbing properties of carbon nanotubes/polymer composites in the V-band. *Bull. Mater. Sci.*, 2016, vol. 39, pp. 451–456. doi: 10.1007/s12034-016-1168-0
106. Yankai Zhao, Song Bi, Genliang Hou, Zhaohui Liu, Hao Li, Yongzhi Song, Zhiling Hou. Preparation and absorption performance of CNTs/PUR honeycomb composite absorbing material. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2076. doi: 10.1088/1742-6596/2076/1/012026
107. Kallumottakkal M., Hussein M. I., Haik Y., Latef T. B. A. Functionalized-CNT polymer composite for microwave and electromagnetic shielding. *Polymers*, 2021, vol. 13. doi: 10.3390/polym13223907
108. Wentong Yang, Qianhe Ji, Keyi Xiong, Yubing Dong, Yaqin Fu, Yaofeng Zhu. Development of a short carbon fiber@polyaniline/polydimethylsiloxane flexible composite film with excellent microwave absorption properties at an ultralow filler content. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, vol. 5, is. 12, pp. 10265–10275. doi: 10.1021/acsapm.3c02046
109. Yue Yang, Chen Qian, Puqi Hu, Wentong Yang, Zimo He, Yubing Dong, Yaqin Fu, Yaofeng Zhu. Nitrogen-doped core-shell Fe/Fe₃C@C nanocomposites for electromagnetic wave absorption. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2023, vol. 34. doi: 10.1007/s10854-023-11263-3
110. Zimo He, Yiyuan Shi, Wentong Yang, Chen Qian, Yaofeng Zhu Multifunctional lightweight PANI/Ti3C2Tx-PVDF composite foam for efficient microwave absorption. *Polymer Composites*, 2023, vol. 44, is. 7, pp. 3990–4000.
111. Wentong Yang, Jiawen Sun, Wenyu Xu, Zimo He, Yubing Dong, Yaqin Fu, Yaofeng Zhu. Development of wrinkled reduced graphene oxide wrapped polymer-derived carbon microspheres as viable microwave absorbers via a charge-driven self-assembly strategy. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, vol. 630, pp. 34–45. doi: 10.1016/j.jcis.2022.09.144
112. Wentong Yang, Jiawen Sun, Deyun Liu, Wenwen Fu, Yubing Dong, Yaqin Fu, Yaofeng Zhu. Rational design of hierarchical structure of carbon@polyaniline composite with enhanced microwave absorption properties. *Carbon*, 2022, vol. 194, pp. 114–126. doi: 10.1016/j.carbon.2022.03.061
113. Yiyuan Shi, Sisi Li, Zhimiao Tian, Xiansen Yang, Yubing Dong, Yaofeng Zhu, Yaqin Fu. Self-assembled lightweight three-dimensional hierarchically porous Ti3C2Tx MXene@polyaniline hybrids for superior microwave absorption. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 892. doi: 10.1016/j.jallcom.2021.162194
114. Xiang Li, Laiming Yu, Weikun Zhao, Yiyuan Shi, Lujun Yu, Yubing Dong, Yaofeng Zhu, Yaqin Fu, Xiangdong Liu, Feiya Fu. Prism-shaped hollow carbon decorated with pol-yaniline for microwave absorption. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 379. doi: 10.1016/j.cej.2019.122393
115. Qixin Yang, Yiyuan Shi, Yu Fang, Yubing Dong, Qingqing Ni, Yaofeng Zhu, Yaqin Fu. Construction of polyaniline aligned on magnetic functionalized biomass carbon giving excellent microwave absorption properties. *Composites Science and Technology*, 2019, vol. 174, pp. 176–183. doi: 10.1016/j.compscitech.2019.02.031
116. Lujun Yu, Laiming Yu, Yubing Dong, Yaofeng Zhu, Yaqin Fu, Qingqing Ni. Compressible polypyrrole aerogel as a lightweight and wideband electromagnetic microwave absorber. *Journal of Materials Science. Materials in Electronics*, 2019, vol. 30, is. 6, pp. 5598–5608. doi: 10.1007/s10854-019-00853-9
117. Lujun Yu, Yaofeng Zhu, Yaqin Fu. Waxberry-like car-bon@polyaniline microspheres with high-performance microwave absorption. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 427, pp. 451–457. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.08.078
