

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Объект авторского права

УДК 539.216.1:546.682; 546.86; 621.315.56; 661.669

РАДЮК
Дарья Владимировна

**ФОРМИРОВАНИЕ ПРИ АКТИВИРОВАНИИ УЛЬТРАЗВУКОМ
И СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ
КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ГРАФЕНА С АТОМАМИ МЕТАЛЛА
И ОРГАНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

по специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы
(по отраслям)

Минск 2026

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный консультант

Лабунов Владимир Архипович, доктор технических наук, профессор, академик Национальной академии наук Беларуси, главный научный сотрудник лаборатории «Интегрированные микро- и наносистемы» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты:

Тихомиров Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент, заместитель академика-секретаря Отделения физики, математики и информатики Национальной академии наук Беларуси

Прищепа Сергей Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Артемьев Михаил Валентинович, доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией нанохимии учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем»

Оппонирующая организация

Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Защита состоится «16» октября 2026 г. в 11:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.07 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. +375-17-293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by,

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «15» сентября 2026 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций
доктор физико-математических наук, профессор



С. К. Лазарук

ВВЕДЕНИЕ

Одним из актуальных направлений в развитии фотоники, электроники и искусственного интеллекта являются формирование и изучение свойств нанокompозитов с гетерогенной наноструктурой на основе 2D материалов (в частности графена) с металлическими и диэлектрическими компонентами, включающие введенные в них органические комплексы, усиливающие химические связи между углеродом, кислородом и металлом. В данном случае используется кислородсодержащий графен, получаемый методом Хаммерса, обеспечивающим широкое масштабирование. Кроме того, основным преимуществом подобных графеновых наноструктур является их амфифильность, что позволяет использовать широкий спектр химических методов для их функционализации и получения заданных характеристик.

В качестве дополнительной к графеновым наноструктурам компоненты используется серебро или оксиды переходных металлов (медь, железо, цинк), которые при взаимодействии с кислородсодержащим графеном за счет механизмов хемисорбции придают гетероструктуре новые бифункциональные свойства, определяемые параметрами обеих частей. В формировании подобной гетероструктуры важную роль играет процесс комплексообразования с органическими соединениями. В большом количестве работ проводились исследования по введению органических соединений в различные нанокompозиты. Однако эффективность процесса такого введения была невысокой в связи с его длительностью и многостадийностью. Для преодоления этих проблем в работе предложен и осуществлен альтернативный подход, связанный с применением ультразвука, что повысило эффективность процесса введения за счет обеспечения одностадийности. Другим предложенным методом получения нанокompозитов на основе кислородсодержащего графена с атомами металла является введение в них органических комплексов в процессе их формирования. Однако оптические, электрические, каталитические и биофункциональные свойства металлографеновых нанокompозитов с органическими комплексами оставались неизученными до настоящего времени. Для изучения функциональности полученных нанокompозитов в работе используется моделирование их электрических свойств при воздействии на них электромагнитным полем.

К настоящему времени закономерности формирования нанокompозита на основе кислородсодержащего графена с атомами металла при одностадийном комплексообразовании с ним органического соединения под действием ультразвука остаются неизученными. Кроме того, не установлены зависимости типов связи органических комплексов, введенных в нанокompозиты на основе легированного графена, от их оптических, электрических и каталитических свойств по сравнению с исходными органическими веществами. Без знания принципов ультразвукового комплексообразования органических соединений в нанокompозитах на основе кислородсодержащего графена с атомами металла невозможно

сформировать материалы с требуемой функциональностью. Таким образом, диссертация посвящена изучению закономерностей формирования нанокompозитов на основе кислородсодержащего графена с атомами металла и органическими комплексами методами жидкофазных процессов при активировании ультразвуком и исследованию оптических, электрических, каталитических и биофункциональных свойств этих нанокompозитов для создания материалов электроники и фотоники.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 годы, утвержденным Указом Президента Республики Беларусь № 156 от 07.05.2020 г. пункту 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: лазерные, плазменные, оптические технологии и оборудование; микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика; наноматериалы и нанотехнологии, нанодиагностика». Диссертация включает в себя результаты, полученные в ходе проведения государственных программ научных исследований (ГПНИ). Результаты исследований, представленные в диссертации, были получены в лаборатории «Интегрированные микро- и наносистемы» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (БГУИР) в рамках следующих научно-исследовательских работ (НИР): ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», задание 3.3.01 «Исследование процессов формирования, электромагнитных и транспортных свойств наноструктур углерода и графеновых слоев, создание на их основе интегральных элементов для электронной обработки информации» (№ ГР 20162963 от 02.08.2016, 04.01.2016–31.12.2018, Радюк Д. В. – исполнитель); европейской программы CERIC-ERIC по темам «Функциональные композитные наноматериалы на основе графена и его окислов» (№ 20177024, 01.01.2018–31.12.2018), «Влияние ультразвука на свойства органических соединений в комплексах оксидов металлов и кислородсодержащего графена» (№ 20192043, 01.01.2019–31.12.2019), «Стабильность ультразвуком сформированных серебряно-ибупрофеновых комплексов» (№ 20222070, 01.01.2020–31.12.2022) (Радюк Д. В. – научный руководитель и обладатель грантов по конкурсу); БРФФИ T18APMG-001 по теме «Гибридные суперконденсаторы с электродной системой на базе вертикально ориентированных графеновых наностенок и углеродных нанотрубок» (№ ГР 20190118 от 07.12.2018, 07.12.2018–30.06.2020, Радюк Д. В. – исполнитель); ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» на 2021–2025 гг., подпрограмма «Фотоника и ее применения» (№ ГР 20212767 от 22.07.2021, 01.04.2021–31.12.2025 Радюк Д. В. – ответственный исполнитель), задание 1.17 «Моделирование и разработка методов интегрирования графеноподобных материалов в фотонные и оптоэлектронные наноструктуры для управления оптическим излучением»,

НИР «Разработка и формирование композиционных материалов с наноразмерными компонентами на основе оксида графена»; БРФФИ «Ученый-2022» по теме «Разработка процессов формирования и исследование электрокинетических свойств наночастиц с металлографеновой структурой в органических комплексах ибупрофена, индометацина, напроксена для улучшения противовоспалительных и антипролиферативных эффектов в онкологических заболеваниях» (№ ГР 20221013 от 28.06.2022 г., 04.05.2022–31.03.2024 г., Радюк Д. В. – научный руководитель и обладатель гранта развития по конкурсу).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель работы заключается в установлении закономерностей, включающих формирование, морфологию, состав, структуру и функциональные свойства нанокompозитов на основе кислородсодержащего графена, оксидов переходных металлов (меди, железа, цинка) или серебра с комплексами производной органической кислоты – уксусной, пропионовой или салициловой методами жидкофазных процессов при активировании ультразвуком с возможностью их применения для создания материалов электроники и фотоники, и каталитических покрытий с улучшенными характеристиками.

Для достижения цели требуется решение следующих *задач*.

1. Провести анализ современного состояния исследований по формированию и свойствам нанокompозитов на основе кислородсодержащего графена, оксидов переходных металлов (меди, железа, цинка) или серебра и органических соединений, включая их комплексы с металлами, и выделить перспективы их применения.

2. Разработать методы исследования, включающие синтез наноразмерных модификаций кислородсодержащего графена; жидкофазного формирования наноструктур на основе кислородсодержащего графена, оксидов переходных металлов (меди, железа, цинка) или серебра с комплексами органических кислот при активировании ультразвуком; выбрать информативные методы анализа морфологии, состава и структуры, а также оптических и электрических свойств синтезированных нанокompозитов; выработать методы моделирования электромагнитных свойств нанокompозитов и оценки каталитических свойств, а также их биофункциональности.

3. Выявить особенности жидкофазного формирования, структуры и свойств кислородсодержащего графена и определить условия стабильности его структуры.

4. Установить закономерности формирования нанокompозитов на основе кислородсодержащего графена, оксидов переходных металлов (меди, железа, цинка) или серебра с комплексами производной органической кислоты (уксусной, пропионовой или салициловой) при активировании ультразвуком, а также их морфологии, состава и структуры.

5. Исследовать оптические, электрические и каталитические свойства синтезированных нанокompозитов на основе кислородсодержащего графена с атомами металла и органическими комплексами.

6. Оценить биофункциональность сформированных нанокompозитов и возможности их практического применения.

Объектом исследования являются нанокompозиты на основе кислородсодержащего графена, оксидов переходных металлов (меди, железа, цинка) или серебра с комплексами производной органической кислоты (уксусной, пропионовой или салициловой) с разными морфологией, составом и структурой, сформированные жидкофазными методами при активировании ультразвуком.

Предметом исследования являются закономерности формирования нанокompозитов на основе кислородсодержащего графена, оксидов переходных металлов (меди, железа, цинка) или серебра с комплексами производной уксусной, пропионовой или салициловой кислоты жидкофазными методами при активировании ультразвуком; особенности морфологии, состава, структуры и свойств синтезированных нанокompозитов; возможности их применения для создания материалов электроники и фотоники, и каталитических покрытий с улучшенными характеристиками.

Научная новизна

Концептуально развито актуальное научное направление в области нанотехнологий и наноматериалов, включающее разработку научной и технологической базы формирования нанокompозитов на основе кислородсодержащего графена, оксидов металлов (меди, железа, цинка) или серебра с органическими комплексами производной пропионовой, уксусной или салициловой кислоты, и в разработке методов жидкофазных процессов при активировании ультразвуком, что позволило получать функциональные наноматериалы с контролируемыми структурными, оптическими, электрическими, каталитическими и биофункциональными свойствами для электроники и фотоники. В рамках выполненных работ были получены новые результаты в областях исследований, соответствующих паспорту специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям), перечисленные ниже.

1. Определены условия формирования методом жидкофазного окисления графита и стабильности структуры кислородсодержащего графена (<500 нм), легированного азотом и серой, и состава его функциональных групп в зависимости от С/О отношения, изменяющегося от 1,1 до 6,2, параметров ультразвукового воздействия (7–36 Вт/см², 1–120 мин), нагревания (70–700 °С) в рамках динамической модели Лерфа – Клиновски.

2. Установлены закономерности формирования нанокompозитов на основе кислородсодержащего графена с атомами металла, используя методы жидкофазных процессов химического восстановления, гидротермального растворения – осаждения, дегидратационного осаждения катионов металлов при одностадийном комплексообразовании производных пропионовой,

уксусной или салициловой кислоты под действием ультразвука (20 кГц, 7–27 Вт/см², 1–5 мин), с контролируемой сферической, кубической, конусообразной или эллипсоидной формой, размером 10–80 нм и 300–580 нм с беспримесными кристаллическими фазами серебра, куприта, тенорита, магнетита или вюрцита, гомогенных по составу или «ядро/оболочка».

3. Выявлена зависимость поглощения света в нанокompозитах на основе кислородсодержащего графена с органическими комплексами от входящего в их состав металла (серебро, медь, железо, цинк) и присоединенной производной кислоты (пропионовой, уксусной или салициловой), что позволило обнаружить электронные переходы в ароматических кольцах, карбоксильных и гидроксильных группах, а также межзонные переходы в оксидах металлов (меди(II), железа(III)) и кислородсодержащем графене и идентифицировать связи (ковалентные, ионные и водородные) в таких нанокompозитах, продукты окисления и ступенчатую ионизацию органических кислот.

4. Предложена модель возникновения электрического тока в поверхностном слое сферических нанокompозитов на основе кислородсодержащего графена с атомами металла и комплексами пропионовой или салициловой кислоты при изменении во времени приложенного к ним потенциала, которая позволила определить плотность индуцированных поляризационных токов в этих слоях в зависимости от входящего в их состав металла с диаметром нанокompозитов (1–100 нм) и подтвердить избирательную электромагнитную активизацию органических молекул при их оптическом возбуждении.

5. Установлена закономерность увеличения каталитической активности от одного до нескольких порядков в одноэлектронном обмене между аквакомплексами и гидратированными соединениями в водных растворах, содержащих окислитель (гексацианоферрат) и металлографеновые нанокompозиты с органическими комплексами производных пропионовой или уксусной кислоты с наибольшей эффективностью в случае кластеров серебра 10 нм в отличие от традиционно используемых наночастиц.

6. Методом моделирования электрохимического разложения воды, катализируемого металлографеновыми нанокompозитами «ядро/оболочка» с комплексами пропионовой или салициловой кислоты, определена зависимость концентраций ионов водорода, образующихся в таких нанокompозитах, от органических комплексов ($2,8 \times 10^{-5}$ – $2,0 \times 10^{-1}$ моль/л), что позволило контролировать антиоксидантные свойства наноматериалов при добавлении в них аскорбиновой кислоты за счет связывания трехвалентного железа этими комплексами и дезактивации двухвалентного железа, что на один – три порядка понижает скорость образования гидроксильных радикалов.

7. Экспериментально подтверждена возможность применения сформированных металлографеновых нанокompозитов с комплексами производных салициловой кислоты в качестве бактериостатических покрытий путем образования ковалентных и водородных связей между

атомами металла, углерода и кислорода этих нанокомпозитов и клеточной мембраной за счет ингибирования ими гидроксильных радикалов и амфифильности кислородсодержащего графена.

8. Дана оценка онкопротекторной активности металлографеновых нанокомпозитов с комплексами производных салициловой кислоты в зависимости от их концентрации для подавления развития и апоптоза малигнизированных клеток (шейки матки, печени и аденокарциномы толстой кишки человека) за счет воздействия органических комплексов с трех- и двухвалентным железом на митохондрии и клеточные мембраны, а также выявлено свойство аскорбиновой кислоты, действующей как молекулярный переключатель на поверхности нанокомпозитов в процессе генерации ионов водорода и торможении образования гидроксильных радикалов, что приводит к не менее чем десятикратному снижению жизнеспособности малигнизированных клеток в водной среде.

9. Продемонстрирована возможность селективного и более эффективного уничтожения малигнизированных клеток за счет применения металлографеновых нанокомпозитов с комплексами пропионовой кислоты для создания покрытия металлического зонда, введенного в биологическую ткань, при подаче на него электрического потенциала 0,5–0,6 В при сверхвысокочастотном излучении (0,1–1,0 ГГц) в зависимости от типа металла или его оксида в такой наноструктуре, обеспечивающей локальное повышение напряженности электрического поля и тока, а также десятикратное увеличение тепловыделения в окрестности атомов металла в сочетании с увеличением на три порядка концентрации ионов водорода.

Положения, выносимые на защиту

1. Формирование, активированное ультразвуком, металлографеновых нанокомпозитов при химическом восстановлении, гидротермальном растворении – осаждении и дегидратационном осаждении катионов металлов в присутствии производной пропионовой, уксусной или салициловой кислоты идет путем стимулированного ультразвуковыми волнами создания связей между группами органических соединений (карбоксильными, гидроксильными) с атомами металла, кислородом, углеродом и водородом, расположенным в ароматическом кольце, и обеспечивает одностадийное образование из них органических комплексов, присоединенных через атомы металлов и кислорода к графену, что позволяет создавать структуры сферической или кубической формы с мономодальным распределением по размерам (10–120 нм, 10–1120 нм), а также конусообразной или эллипсоидной формы с бимодальным распределением по размерам (10–70 нм, 300–580 нм) в форме гомогенной системы или со структурой «ядро/оболочка».

2. Абсорбция электромагнитного излучения металлографеновыми нанокомпозитами, сформированными в условиях ультразвукового воздействия, при их оптическом возбуждении в диапазоне длин волн от 190 до 1100 нм характеризуется пиками поглощения в полосе 215–305 нм и на длинах волн 370, 380, 390, 400, 411, 456, 495, 580 нм, обусловленных

электронными переходами в ароматических кольцах и между атомами углерода, кислорода и металла, а также межзонными переходами в оксидах металлов (меди(II), железа(III)) и кислородсодержащем графене на длинах волн 333 и 336 нм, и сопровождается сдвигом положения этих пиков в длинноволновую область спектра по мере уменьшения концентрации функциональных групп в кислородсодержащем графене и увеличением интенсивности поглощения вследствие стимулированного ультразвуком окисления органических комплексов гидроксильными радикалами, что позволяет контролировать ионную, электронную, молекулярную металлографеновую наноструктуру в водной среде при нормальных условиях в отличие от имеющихся аналогов, созданных на основе нелегированного графена.

3. Электрические свойства сферических металлографеновых нанокомпозитов могут быть описаны в рамках модели возникновения электрического тока в поверхностном слое таких композитов при изменении в нем потенциала во времени, показавшей, что удельная электропроводность поверхностного слоя таких нанокомпозитов, определяемая поляризацией связей между атомами углерода, кислорода и металла, изменяется от 3×10^2 до 2×10^5 См/м, а плотность индуцированного поляризационного тока может достигать величины 8×10^6 А/м², которая экспоненциально уменьшается с увеличением диаметра сфер от 1 до 100 нм и зависит от электронных свойств атомов металла, что обеспечивает избирательную активизацию органических молекул при их оптическом возбуждении.

4. Электронные процессы в нанокомпозитах из кислородсодержащего графена с поверхностными кластерами металла в органических комплексах определяются перераспределением электронной плотности в связях между углеродом и кислородом в карбоксильных и гидроксильных группах органического соединения и графена на поверхности этих нанокомпозитов, приводя в случае кластеров серебра размером 10 нм к увеличению в 42 раза скорости одноэлектронного обмена между аквакомплексами, а также ионами водорода и образующимся гидратированным органическим соединением, что повышает фотокаталитическую активность таких материалов в сравнении с традиционно используемыми наночастицами серебра.

5. Нанокомпозиты размером 10–70 нм из кислородсодержащего графена с производными из комплексообразующих органических кислот (пропионовой, салициловой) с оксидами железа и других металлов понижают не менее чем на порядок концентрацию гидроксильных радикалов в водных растворах за счет их связывания на поверхности наноструктур путем комплексообразования и дезактивации катионов железа, участвующих в образовании гидроксильных радикалов, что делает возможным применение этих нанокомпозитов в каталитических устройствах с контролируемыми антиоксидантными свойствами.

6. Модель электрохимического разложения воды, катализируемого сферическими нанокомпозитами размером от 10 до 50 нм с ядром из кислородсодержащего графена и магнетита и оболочкой из комплексов

пропионовой или салициловой кислоты, отличающаяся учетом генерации ионов водорода вследствие взаимодействия атомов железа с органическими комплексами, предсказывает возможность контролировать дезактивацию железа в связях с кислородом и углеродом на поверхности таких нанокompозитов и связанное с ним увеличение концентрации протонированного двухвалентного железа в 161,2 раза в комплексах с пропионовой кислотой и в 23,5 раза в комплексах салициловой кислоты при добавлении в них аскорбиновой кислоты, что дает возможность оптимизировать условия функционирования электронных устройств для генерации водорода.

7. Воздействие металлографеновых нанокompозитов с органическими комплексами на бактерии кишечной палочки штамма M-17, взятых в качестве модельного микроорганизма, определяется образованием связей (ковалентных, водородных) между атомами металла, углерода и кислорода этих нанокompозитов и клеточной мембраной, а также ослаблением окислительного процесса генерации гидроксильных радикалов на поверхности нанокompозитов, что в случае их конусообразной формы и размера от 15 до 70 нм с комплексами производной 2-(ацетилокси)бензойной кислоты и атомами цинка обеспечивает семикратное уменьшение количества колоний и позволяет использование нанокompозитов в каталитических материалах с контролируемой пассивацией бактериостатических и окислительных процессов.

8. Поведение графеновых нанокompозитов, содержащих органические комплексы и частицы оксида железа (магнетит) размером 10–15 нм с малигнизированными клетками (шейки матки, печени и аденокарциномы толстой кишки человека) при добавлении аскорбиновой кислоты контролируется торможением образования гидроксильных радикалов и генерацией ионов водорода на поверхности таких нанокompозитов и приводит к регулируемому снижению концентрации малигнизированных клеток в водной среде, что обусловлено воздействием органических комплексов с трех- и двухвалентным железом на внутриклеточные структуры (митохондрии, клеточные мембраны), способствуя окислительно-восстановительной дезактивации железа, что позволяет использовать молекулы аскорбиновой кислоты как молекулярные переключатели в процессе генерации ионов водорода для комбинированной онкопротекторной хемодинамической терапии.

9. Покрытие металлографеновыми нанокompозитами с органическими комплексами размером от 10 до 50 нм металлического зонда, введенного в биологическую опухолевую ткань, при подаче на него электрического потенциала 0,5–0,6 В в условиях электромагнитного излучения с частотой 0,1–1,0 ГГц обеспечивает повышение локальной напряженности электрического поля и индуцированных им поверхностных токов за счет дополнительного к графену поглощения сверхвысокочастотного излучения поляризующимися органическими комплексами, что позволяет более эффективно осуществлять генерацию ионов водорода электролизом воды и

сочетать ее с повышенным локальным тепловыделением в окрестности атомов металла, обуславливая таким образом селективное уничтожение малигнизированных клеток.

Личный вклад соискателя ученой степени

Диссертация является обобщением результатов научных работ, выполненных непосредственно автором, личный вклад которого заключается в определении цели и научного направления, постановке задач исследования, разработке методов формирования нанокompозитов на основе кислородсодержащего графена с атомами металла и органическими комплексами и изучения их свойств. Соискатель выполнил основные экспериментальные и теоретические исследования, проводил расчеты и моделирование, планировал и контролировал работы, связанные с синтезом и характеризацией морфологии, структуры и свойств наноматериалов. Интерпретация и характер представления полученных результатов осуществлялись автором совместно с д. ф.-м. н., профессором В. Е. Борисенко и научным консультантом д. т. н., профессором, академиком В. А. Лабуновым. Синтез кислородсодержащего графена был проведен автором лично и совместно с ведущим научным сотрудником научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) «Интегрированные микро- и наносистемы» к. х. н. Л. В. Табулиной. Анализ морфологии, структуры и элементного состава образцов методами электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и масс-спектрометрии вторичных ионов был выполнен совместно с начальником сектора физико-технического анализа государственного центра «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» к. т. н. Д. В. Жигулиным и к. х. н. К. В. Скроцкой в Научно-исследовательском институте физико-химических проблем учреждения Белорусского государственного университета (НИИ ФХП БГУ). Измерения и анализ дифракционных рентгенограмм образцов были выполнены автором совместно с в. н. и. Г. К. Тучковским и к. х. н. Л. С. Ивашкевич в НИИ ФХП БГУ, а химической структуры их поверхности – совместно с к. ф.-м. н. К. Вельтрушкой и д. ф.-м. н., профессором В. Матолиным с применением метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии в Карловом университете (г. Прага, Республика Чехия). Морфологию образцов автор изучал лично с помощью метода оптической фазово-контрастной микроскопии в НИЛ «Интегрированные микро- и наносистемы» БГУИР. Электронная, молекулярная структура образцов и их каталитическая активность были изучены с помощью метода молекулярной абсорбционной спектроскопии автором лично, а регистрация спектров была выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники БГУИР. Анализ молекулярной структуры образцов с помощью метода инфракрасной спектроскопии был выполнен автором самостоятельно, а проведение измерений по регистрации ИК-спектров – в НИИ ФХП БГУ, государственном научном учреждении Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси и совместно с к. т. н. Н. А. Крекотень. Стабильность молекулярной

структуры образцов была исследована с помощью метода комбинационного рассеяния света автором лично. Анализ антиоксидантного действия образцов в электрохимическом процессе Фентона был проведен автором лично с помощью метода циклической вольтамперометрии в НИЛ «Материалы и структуры наноэлектроники» БГУИР. Определение дзета-потенциала синтезированных наноматериалов и изучение их флуоресцентных свойств в малигнизированных клетках были выполнены автором лично и совместно с заведующим НИЛ «Нанобиотехнологий» к. б. н. В. М. Абашкиным и заведующим научно-исследовательским отделом «Медицинских биотехнологий» д. б. н., профессором Д. Г. Щербиным в Институте биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси. Антибактериальные свойства образцов были изучены автором лично и совместно с к. б. н. Т. А. Хрусталёвой в Институте физиологии Национальной академии наук Беларуси. Синтез кислородсодержащего графена и исследования по определению структуры, каталитических и антиоксидантных свойств синтезированных наноматериалов были проведены при руководстве студентами и магистрантами кафедры микро- и наноэлектроники БГУИР А. С. Дринеvским, В. Ю. Калискаровым, Л. А. Михновец, А. Н. Ткач и Е. А. Зелковским, а также студентами химического факультета БГУ Е. С. Карпиловой и В. С. Колосеем. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертацию не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, выполненных в рамках работы над диссертацией, докладывались и обсуждались на 17 международных научных мероприятиях и конференциях, включая научно-технические семинары по новым материалам в департаменте «Новые материалы и биосистемы» института Макса Планка, 2014 г., г. Штутгарт, ФРГ (приглашенный доклад); по биофизике в департаменте физики свободного университета в Берлине, 2014 г., г. Берлин, ФРГ (приглашенный доклад); по формированию и свойствам мягкого конденсированного вещества в университете Утрехта, 2015 г., г. Утрехт, Нидерланды (приглашенный доклад); «EMN Prague Meeting on Nanoparticles», 2019 г., г. Прага, Республика Чехия (приглашенный доклад); «29th European Advanced Nanomaterials Congress», 2019 г., г. Стокгольм, Швеция (приглашенный доклад); «Медэлектроника – 2020 и Медэлектроника – 2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии» в БГУИР, 2020 г. и 2022 г., г. Минск (устный доклад); «Молекулярные, мембранные и клеточные основы функционирования биосистем» и XV съезд Белорусского общественного объединения фотобиологов и биофизиков» в Институте биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси, 2022 г., г. Минск (устный доклад); международный симпозиум «16th International Symposia on Applied Bioinorganic Chemistry» (16-ISABC) в университете Янина, 2023 г., г. Янина, Греция (устный доклад); «Molecular Biophysics»

немецкого общества биофизиков, 2024 г., г. Хюнфелд, ФРГ (устный доклад); всероссийская конференция по люминесценции с международным участием «LUMOS-2026» в Физико-техническом институте имени А. Ф. Иоффе и Санкт-Петербургском Национальном исследовательском Академическом университете имени Ж. И. Алфёрова РАН, 2026 г., г. Санкт-Петербург, Российская Федерация (устный доклад).

Результаты диссертационной работы были представлены в виде устных докладов при руководстве студентами и магистрантами на международных конференциях: «55-й и 60-й юбилейных конференциях аспирантов, магистрантов и студентов» в БГУИР, 2019 г. и 2024 г., г. Минск; молодых ученых «Инновационные материалы и технологии ИМТ – 2022 и ИМТ – 2024» в БГТУ, 2022 г. и 2024 г., г. Минск; «Физика конденсированного состояния» в ГГУ им. Янки Купалы, 2023 г., г. Гродно; XI международной школы-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики – 2024» в Институте физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, 2024 г., г. Минск и 15-й международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения», 2024 г., г. Москва.

Результаты диссертационной работы используются в Институте биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси и на кафедре микро- и нанoeлектроники БГУИР, что подтверждается приложенными актами.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 40 научных работах, из которых: 2 – единоличные монографии, 1 – глава в книжном издании, 22 статьи в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 10 статей в сборниках материалов научных конференций. Общий объем опубликованных монографий и статей составил 39,39 авторского листа. Оценка научного рейтинга соискателя с использованием наукометрической базы данных Google Scholar по состоянию на 31 марта 2026 г. показала, что на ее работы, опубликованные в период 2008–2026 г., сделано 1403 ссылки, h -фактор = 17.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из разделов, включающих в себя термины и определения, перечень сокращений и обозначений, введение, общую характеристику работы, 6 глав, заключение, список использованных источников и 8 приложений. Полный объем диссертационной работы составляет 393 страницы, в которые входят 198 страниц текста, 131 рисунок на 126 страницах, 42 таблицы на 37 страницах и 8 приложений на 52 страницах. Список использованных источников содержит 519 наименований на 50 страницах, включая собственные публикации соискателя ученой степени.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** изложены результаты анализа особенностей формирования кислородсодержащего графена (КГ) и становление его динамической структурной модели, позволяющей интерпретировать его катионообменную емкость. Выявлены достоинства улучшенного метода Хаммерса для масштабируемого формирования КГ в отличие от графена. Сделан вывод о мобильном характере функциональных групп КГ как ключевом факторе понимания его химических, физических и каталитических свойств. Аргументирована необходимость в проведении исследований для установления взаимосвязи состава КГ и его эффективности как катализатора в процессе Фентона.

На основании изученных недостатков неорганических структур обоснован выбор КГ и оксидов переходных металлов (медь, железо, цинк) или серебра для формирования контролируемых металлографеновых нанокомпозитов, обладающих улучшенной амфифильностью и функциональностью, недоступных для КГ и наночастиц оксидов металлов или серебра по отдельности. В результате сравнительного анализа стандартных методов восстановления КГ и синтеза оксидов переходных металлов или серебра выделены преимущества и недостатки методов функционализации металлографеновой наноструктуры. Несмотря на контролируемые морфологию, состав и структуру, металлографеновые нанокомпозиты имеют ограниченную функциональность, что требует введение органических комплексов в гетерогенную наноструктуру.

Существующие методы не преодолевают проблемы процессов введения из-за длительности, многостадийности и низкой эффективности. Следовательно, структура и природа связей органических комплексов с металлами в КГ являются неизученными. В результате сравнительного анализа технологий продемонстрированы преимущества метода с применением ультразвука и акустической кавитации как наиболее эффективной технологии.

На основании выявленных нерешенных проблем выделено перспективное направление исследования каталитической активности металлографеновых нанокомпозитов с органическими комплексами. Предложена гипотеза активизации исходных органических соединений при ультразвуковом комплексообразовании с металлографеновой наноструктурой, что позволило определить цель и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** представлено описание примененных в ходе выполнения диссертационного исследования методик синтеза КГ и формирования нанокомпозитов на его основе с использованием ультразвукового диспергатора, включая калибровку его интенсивности методом калориметрии. Подробно описана разработанная методология формирования металлографеновых нанокомпозитов с комплексами пропионовой, салициловой или уксусной кислоты. Впервые

продемонстрирован метод безмасляного акустического эмульгирования «растворитель/антирастворитель» для формирования сфер.

Закономерности формирования, а также оптические, электрические, каталитические и биофункциональные свойства объектов исследования установлены с помощью методов электронной микроскопии (растровой – РЭМ и просвечивающей – ПЭМ), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) и оптической фазово-контрастной микроскопии, рентгеновской порошковой дифрактометрии, дзета-потенциала, оптической спектроскопии в ультрафиолетовом (УФ), видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах, а также комбинационного рассеяния света (КРС), рентгеновской фотоэлектронной (РФЭС) и флуоресцентной спектроскопии, термогравиметрического анализа (ТГА). Антиоксидантные свойства объектов исследования установлены с помощью метода циклической вольтамперометрии в процессе электро-Фентона, для изучения которого разработана трехэлектродная электрохимическая система.

Моделирование электрических свойств полученных наноматериалов было выполнено при использовании программы *COMSOL Multiphysics 4.3* (модули «*Equation-Based*», «*Chemical Reaction Engineering – Electrochemical Engineering*», «*Heat Transfer*» и «*RF and Microwave Engineering*») с учетом сверхвысокочастотного излучения (0,1–1,0 ГГц). Проведено моделирование образования ионов водорода на поверхности полученных наноматериалов в процессе электролиза в биологической ткани.

Третья глава содержит результаты выявленных закономерностей формирования КГ с С/О отношением 1,12–6,22, латеральным размером его пластин в диапазоне 200–600 нм и количеством слоев, не превышающим 30, используя жидкофазный улучшенный метод Хаммерса. Аналитическими методами спектроскопии (абсорбционной, инфракрасной) и рентгеновской дифрактометрии подтверждено образование ковалентной связи между атомами кислорода и углерода в графене, модифицированном функциональными группами (рисунок 1).

Выявлена закономерность стабильности структуры КГ и функциональных групп в ней в зависимости от температуры в процессах горения (в атмосфере O_2) и термического разложения (в атмосфере N_2), показывающая, что при нагреве в кислородсодержащей атмосфере химический состав КГ сохраняется до 70 °С, а в диапазоне 120–140 °С происходит десорбция гидроксильных групп и частичное отшелушивание пластин графена, при этом нагрев до 400 °С приводит к удалению карбоксильных групп, а эпоксидные и карбонильные группы удерживаются в структуре графена даже при 600–700 °С.

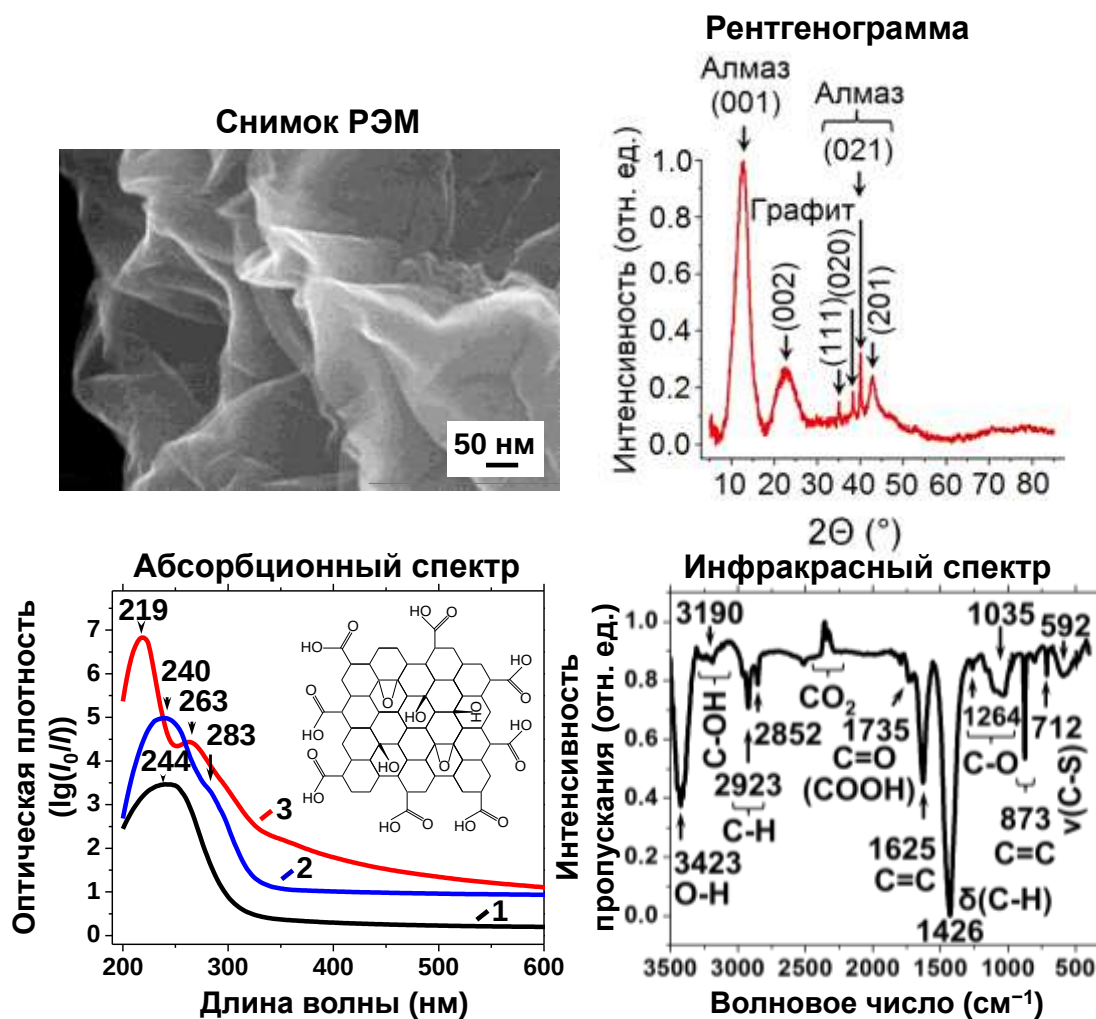


Рисунок 1 – Синтезированный КГ с С/О отношением, равным 1,9, морфология и структура которого подтверждены методами рентгеновской дифрактометрии ($\text{Cu } K_{\alpha} = 1,54 \text{ \AA}$), абсорбционной и инфракрасной спектроскопии

В **четвертой главе** на основании главного принципа воздействия ультразвука на КГ с хемисорбированными катионами металлов разработаны методы функционализации его структуры оксидами переходных металлов (меди, железа, цинка) с контролируемой морфологией и фазовым составом (рисунок 2). Преимуществом разработанного ультразвукового метода является возможность контролирования морфологии нанокompозитов, например $\text{CuS-Cu}_2\text{O-CuO-KГ}$, от рисообразной до сферической в зависимости от концентрации катионов меди, адсорбированных на поверхности КГ, не повреждая углеродную решетку посредством удаления или замещения атомов углерода. В таком процессе тип металла определяет морфологию нанокompозитов: мелкое зерно $\sim 460 \text{ нм}$ с оксидами меди или железа, сфера $\sim 300 \text{ нм}$ и рисообразная форма $\sim 580 \text{ нм}$ с оксидами железа.

Формирование чистой фазы магнетита методом дегидратационного совместного осаждения солей двух- и трехвалентного железа возможно осуществить при ультразвуковой конъюгации с КГ в водной среде. В результате сформированные $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-КГ}$ нанокompозиты имеют

квазимономодальное распределение по латеральному размеру со средним значением (90 ± 25) нм и незначительной фракцией с (230 ± 15) нм. При этом среднее количество пластин КГ в полученных Fe_3O_4 -КГ нанокompозитах не превышает четырех. Достоинством ультразвукового метода является эффективная конъюгация отрицательно заряженных КГ и магнетита в единую стабильную коллоидную систему. Установлена закономерность уменьшения латерального размера, повышения монодисперсности и коллоидной стабильности по мере увеличения продолжительности ультразвукового воздействия на КГ и магнетит.

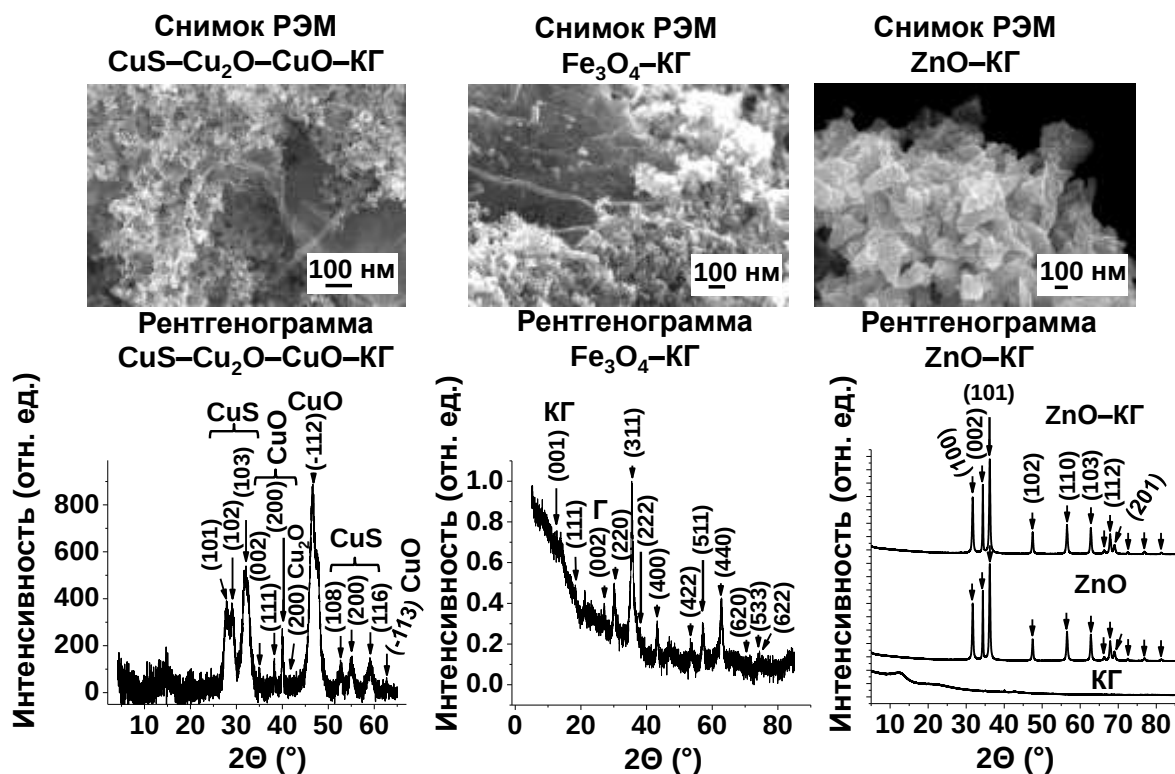


Рисунок 2 – Морфология и фазовый состав металлографеновых нанокompозитов $\text{CuS-Cu}_2\text{O-CuO-KG}$, $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-KG}$ и ZnO-KG , синтезированных с применением дегидратационного совместного осаждения солей двух- и трехвалентного железа и гидротермального методов при активировании ультразвуком

Активированный ультразвуком гидротермальный процесс, основанный на механизме растворения – осаждения ZnO из водного раствора, позволяет сформировать нанокompозиты ZnO-KG . В отличие от традиционных технологий разработанный метод с применением ультразвука позволяет сформировать фазу оксида цинка на последней стадии гидротермального процесса, а также в *in situ* синтезе наносфер при взаимодействии оксида цинка с КГ. Данным методом можно контролировать диаметр ZnO наносфер от 15 до 40 нм в порядке добавления соли цинка и щелочи, а их форму – от сферической до конусообразной, варьируя продолжительность и интенсивность ультразвукового действия. Преимуществом данного метода является ультразвуковое образование конусообразных ZnO-KG

нанокompозитов без замещения атомов углерода в целостной углеродной решетке.

Тенденция неразрушающего воздействия ультразвука на металлографеновую наноструктуру сохраняется при формировании с ней органических комплексов (рисунок 3). А именно формирование серебряных наносфер со средним диаметром ~ 10 нм на поверхности графеновых пластин со структурой МПФПК–Ag–КГ происходит с сохранением кристалличности серебра и углеродной решетки под действием ультразвука. Методом одностадийного комплексообразования под действием ультразвука можно получить сферы ДФК–CuO–КГ (~ 340 нм), образованные в результате гидротермального осаждения оксида меди(II) из водного раствора. При формировании сфер происходит адсорбция КГ на поверхности CuO с образованием связи C–O или C=O под действием ультразвука.

Методом дегидратационного соосаждения при активации ультразвуком происходит формирование нанокompозитов СК–Fe₃O₄–КГ, включающей беспримесную фазу магнетита, КГ и СК-комплексы, с формой, контролируемой от кубической до сферической с мономодальным распределением по латеральному размеру и диаметру (10–120 нм) в зависимости от продолжительности синтеза и концентрации гидроксильных ионов (см. рисунок 3). Установлены зависимости уменьшения диаметра нанокompозитов и увеличения их коллоидной стабильности от продолжительности ультразвукового действия. Нанокompозитами СК–Fe₃O₄–КГ можно управлять в водном растворе с помощью внешнего магнита.

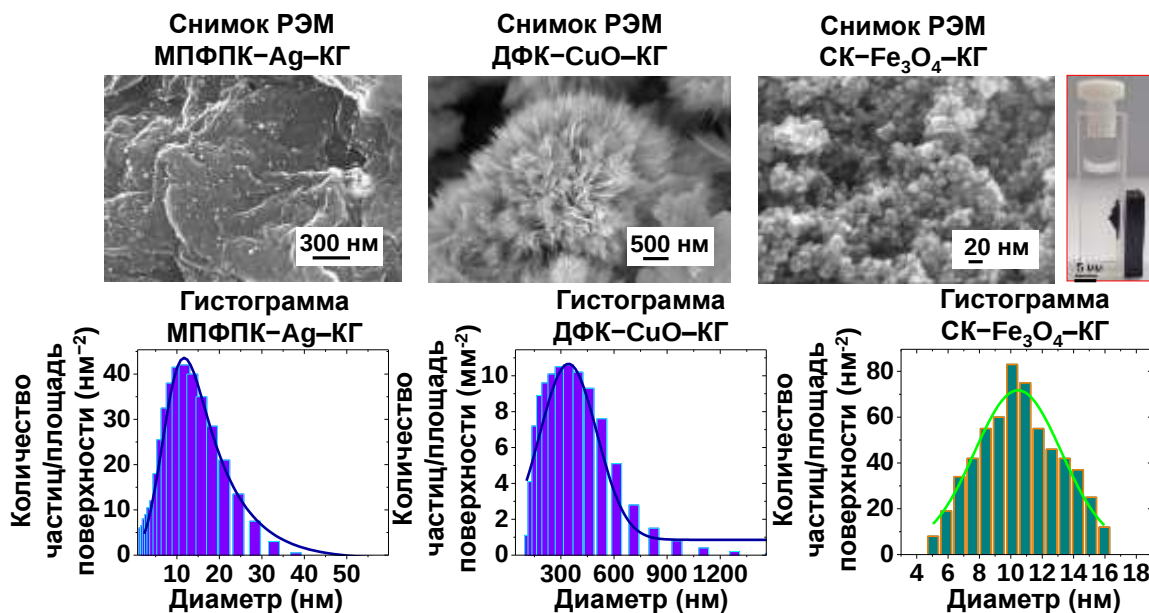


Рисунок 3 – Морфология избранных металлографеновых нанокompозитов, содержащих органические комплексы, МПФПК–Ag–КГ, ДФК–CuO–КГ и СК–Fe₃O₄–КГ, образованных при активировании ультразвуком

Методом акустического безмасляного эмульгирования продемонстрировано формирование сфер со структурой «ядро/оболочка» и мономодальным распределением по диаметру (10–1120 нм), определяемым параметрами ультразвука и типом металла или его оксида с органическим комплексом (рисунок 4). Обнаружено, что по мере химического восстановления катионов серебра при комплексообразовании с производной пропионовой кислоты и термически расплавленным полиэтиленгликолем ($6,0 \times 10^3$ Да) происходит формирование сфер со структурой «ядро/оболочка». При отсутствии полиэтиленгликоля структура «ядро/оболочка» сфер становится инверсной, что обусловлено разницей в вязкости и плотности двух жидкостей, состоящих из водного раствора катионов серебра и этанола с органическим комплексом.

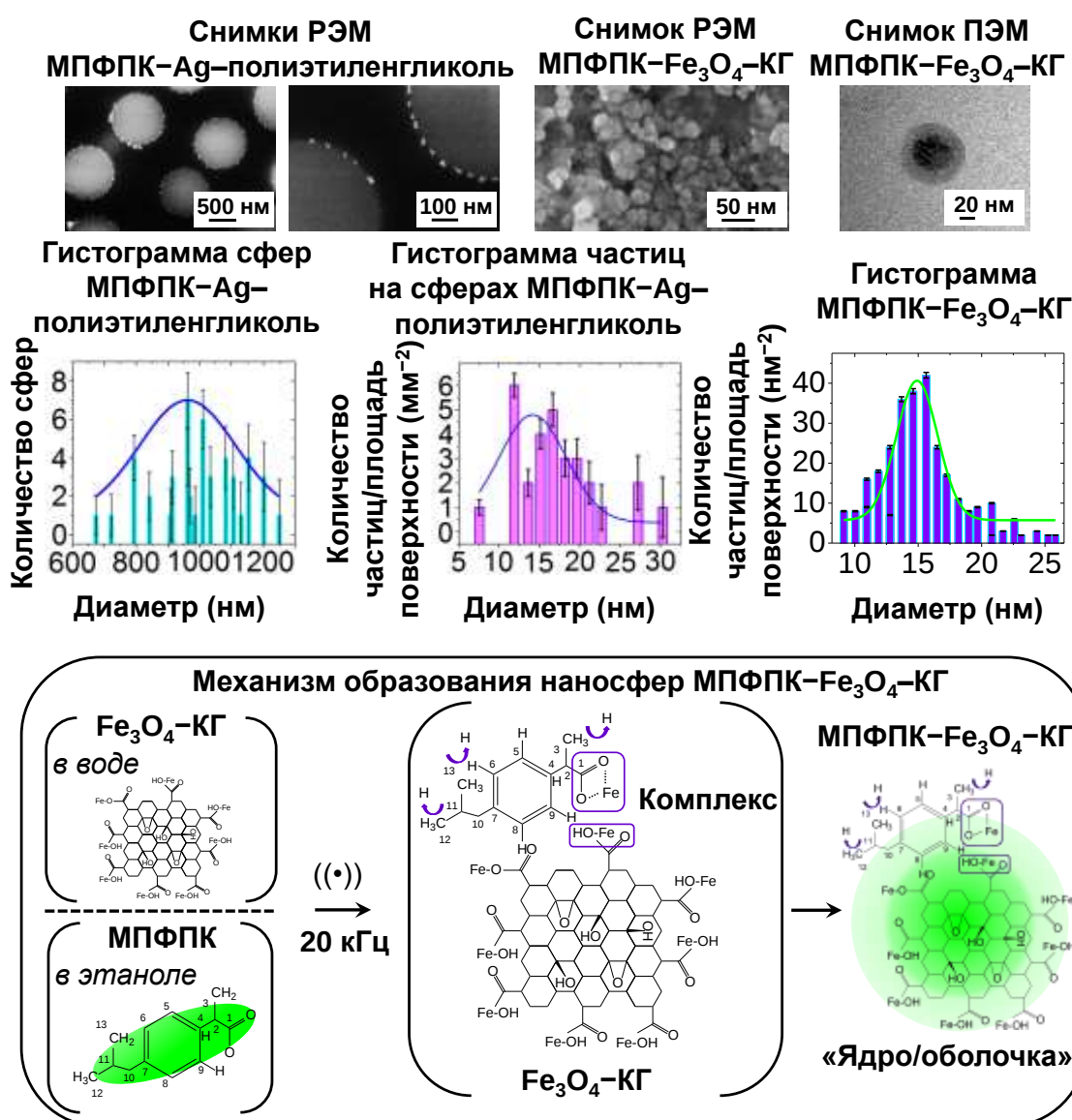


Рисунок 4 – Морфология синтезированных сфер МПФПК–Ag–полиэтиленгликоль и МПФПК–Fe₃O₄–КГ и их механизм образования под действием ультразвука

В случае замены серебра на магнетит акустическое эмульгирование приводит к формированию наносфер с инверсной структурой «ядро/оболочка» согласно выявленному механизму. Сравнительный анализ молекулярной структуры синтезированных наноматериалов позволил определить общий принцип, согласно которому формирование органических комплексов в КГ, модифицированном серебром или оксидами меди, железа, цинка, происходит одностадийно под действием ультразвука в течение 3–5 мин в водной или водно-этанольной среде.

При этом комплексообразование органических соединений в металлографеновых нанокompозитах происходит путем взаимодействия карбоксильных групп с атомами металла и кислорода с формированием водородной связи (таблица 1).

Таблица 1 – Особенности ультразвукового комплексообразования, обусловленного типом связи в металлографеновых нанокompозитах

Нанокompозиты	Тип связи	Группы
МПФПК–Ag–КГ	Водородная, С-С, С-Н	Карбоксильные МПФПК и КГ, гидроксильная КГ
ДФК–CuO–КГ	Водородная, Cu-O и С-Н	С=C-OH и -C=O карбоксильные ДФК и КГ
АСК–CuO–КГ	Водородная, Cu-O и Cu-OH	-C=O карбоксильная АСК, гидроксильная КГ
СК–Fe ₃ O ₄ –КГ	Водородная, Fe-O в Fe ₃ O ₄ и FeO ₂ , С-O и О-Н	O=C-O карбоксильная СК, гидроксильная КГ
МПФПК–Fe ₃ O ₄ –КГ	Водородная, Fe-O и С-O-Fe	CH, CH ₂ и CH ₃ МПФПК, -C=O карбоксильная МПФПК, гидроксильная КГ
АСК–ZnO–КГ	Водородная, Zn-O, С-O и О-Н	O=C-O карбоксильная АСК, гидроксильная КГ
СК–ZnO–КГ	Водородная, Zn-O, С-O и О-Н	O=C-O карбоксильная СК, гидроксильная КГ

В пятой главе представлены результаты исследований оптических и электрических свойств КГ и металлографеновых нанокompозитов с органическими комплексами. На рисунке 5 показаны абсорбционные спектры металлографеновых нанокompозитов с комплексами пропионовой и

салициловой кислот и приведена их схематическая структура. На примере серебра, магнетита и оксида цинка показаны характеристические пики поглощения в полосе 215–305 нм и на длинах волн 370, 385, 390 и 411 нм, обусловленные электронными переходами в ароматических кольцах и между атомами углерода, кислорода и металла, а также межзонными переходами в оксидах металлов и КГ. Выявлена закономерность наибольшего увеличения электронных переходов в полосе 215–305 нм в МПФПК–Fe₃O₄–КГ и МПФПК–Ag–КГ нанокompозитах, что обусловлено окислением МПФПК гидроксильными радикалами. Абсорбция электромагнитного излучения в металлографеновых нанокompозитах с комплексами салициловой (СК) или ацетилсалициловой кислоты (АСК) характеризуется пиками поглощения на длинах волн 231, 242, 278, 297, 370, 385 и 390 нм, обусловленными электронными переходами в ароматических кольцах ($\pi_{C=C}-\pi_{C=C}^*$, $\pi_{C=C}-\pi_{C=O}^*$) и между атомами углерода, кислорода и металла (железа, цинка) (см. рисунок 5). Выявлена закономерность батохромного сдвига абсорбционных пиков, обусловленных межзонными переходами в оксидах металлов по мере уменьшения концентрации функциональных групп в КГ.

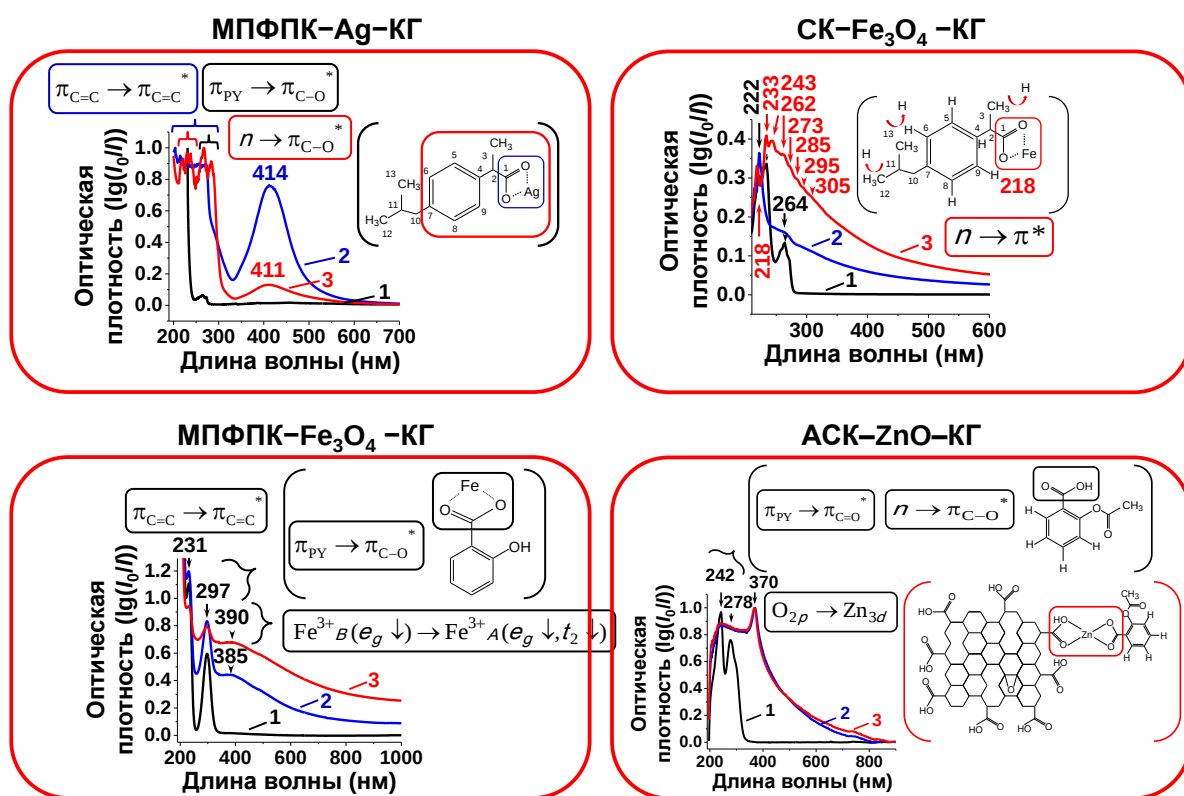


Рисунок 5 – Абсорбционные спектры водных растворов, содержащих нанокompозиты (3) МПФПК–Ag–КГ, СК–Fe₃O₄–КГ, МПФПК–Fe₃O₄–КГ и АСК–ZnO–КГ в сравнении с исходным органическим соединением (1) и нанокompозитами без КГ (2)

Электрические свойства металлографеновых нанокompозитов с органическими комплексами могут быть описаны в рамках модели

возникновения электрического тока в их поверхностном слое при изменении в нем потенциала во времени, используя программный инструмент «*Comsol Multiphysics*» (рисунок 6).

Установлено, что на поверхности нанокомпозитов СК *per se* плотность электрического тока j изменяется в диапазоне $(2,28 \times 10^{-8} - 6,72) \text{ A/m}^2$, а в результате комплексообразования с ZnO–КГ она увеличивается от $3,93 \times 10^{-2} \text{ A/m}^2$ до $3,98 \times 10^3 \text{ A/m}^2$. Выявлено, что величина j достигает наибольших значений в диапазоне $(4,17 - 4,22) \times 10^5 \text{ A/m}^2$ в нанокомпозитах ZnO–КГ. Следовательно, увеличение электрического поля комплексообразующих молекул СК в нанокомпозитах СК–ZnO–КГ происходит в $5,92 \times 10^2$ раза. Для сравнения в наносферах ZnO максимальная величина j достигает значения $8,39 \times 10^3 \text{ A/m}^2$, а в СК–ZnO – $7,93 \times 10^1 \text{ A/m}^2$. Таким образом, комплексообразование СК в ZnO–КГ нанокомпозитах приводит к избирательной активизации ее молекул.

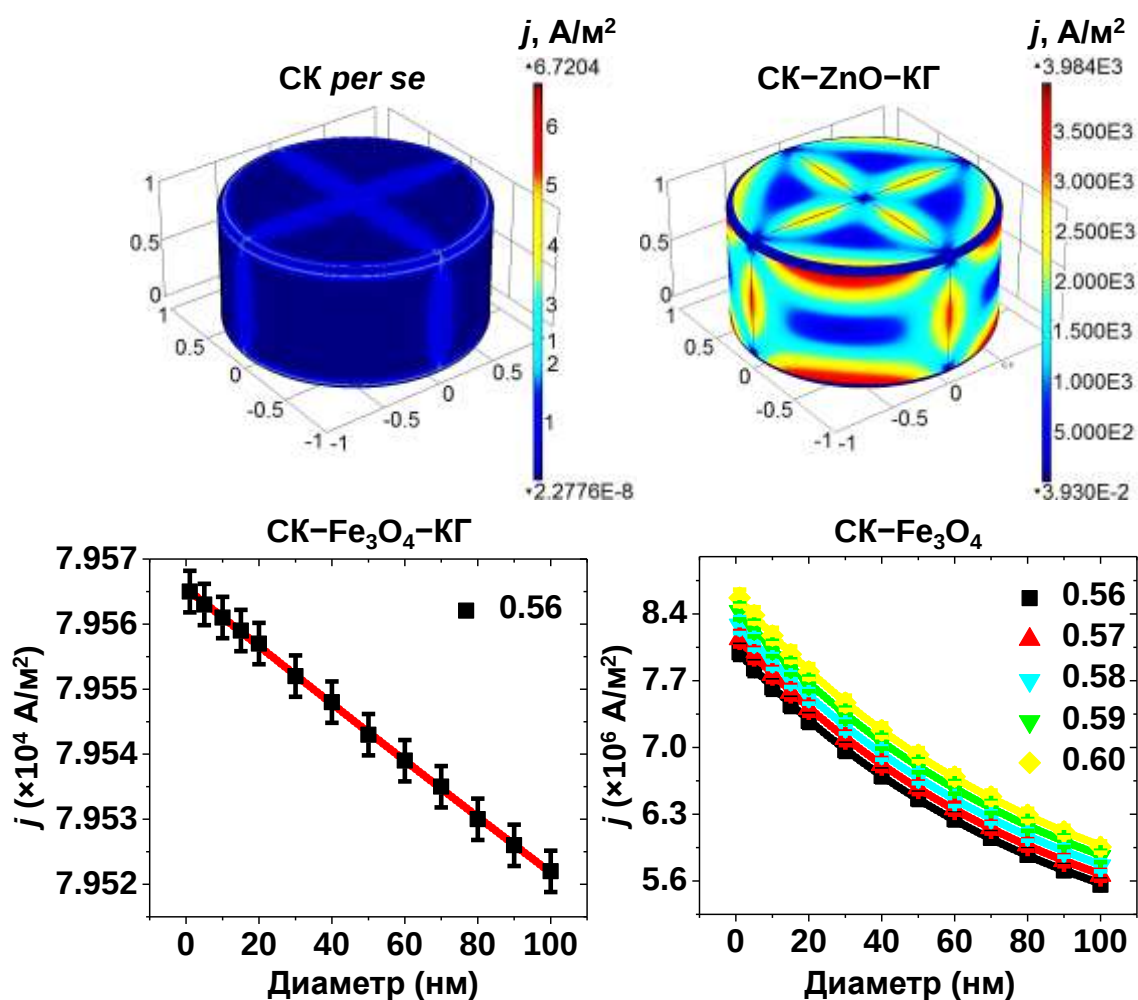


Рисунок 6 – Результаты моделирования распределения плотности электрического тока j (A/m^2) на поверхности синтезированных нанокомпозитов, состоящих из салициловой кислоты (СК) *per se*, СК–ZnO–КГ, СК–Fe₃O₄–КГ и СК–Fe₃O₄ в диапазоне потенциала от 0,53 В до 0,60 В со скоростью его изменения 0,01 В/с в течение 250 с

При замещении ZnO на Fe₃O₄ с учетом удельной электропроводности, изменяющейся в диапазоне $(3,0 \times 10^2 - 3,0) \times 10^4$ См/м, получено, что величина j в наносферах, включающих комплексы СК с Fe(II)/Fe(III), достигает значения $7,5 \times 10^6$ А/м², а при комплексообразовании с КГ уменьшается до $8,0 \times 10^4$ А/м². Установлена обратно пропорциональная зависимость уменьшения величины j по мере увеличения диаметра наносфер (см. рисунок 6). Величина j , рассчитанная в СК-Fe₃O₄-КГ, уменьшается на два порядка в отличие от Fe₃O₄ и СК-Fe₃O₄, что обусловлено диэлектрическими свойствами КГ. В целом величина j в СК-Fe₃O₄-КГ уменьшается в небольшом диапазоне ($7,96 \times 10^4 - 7,95 \times 10^4$) А/м² в отличие от СК-Fe₃O₄ ($7,99 \times 10^6 - 5,55 \times 10^6$ А/м²), что обусловлено взаимодействием КГ с комплексом СК в процессе переноса электронов.

Шестая глава посвящена изучению антиоксидантной и каталитической активности синтезированных металлографеновых нанокмпозитов с органическими комплексами и исследованию их взаимосвязи с бактериостатической и флуоресцентной эффективностью для онкопротекторной хемодинамической терапии. Антиоксидантная активность полученных наноматериалов была изучена в процессе электро-Фентона при ингибировании гидроксильных радикалов и в моделировании образования ионов водорода в нанокмпозитах с разным составом в зависимости от их концентрации органической кислоты *per se* и нанокмпозитов (рисунок 7).

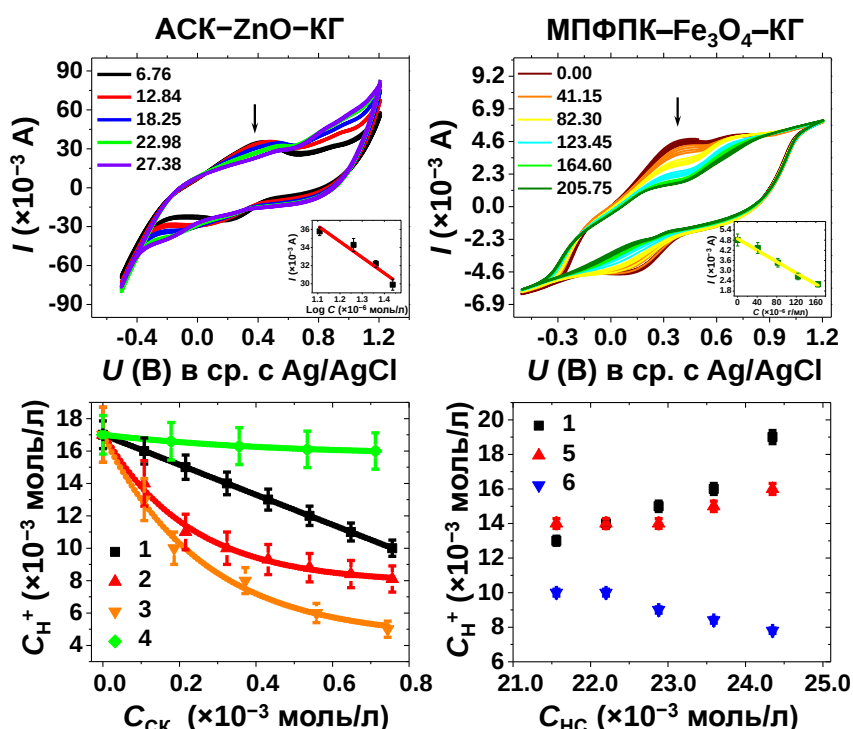


Рисунок 7 – Циклические вольтамперограммы реакции Фентона в водных растворах нанокмпозитов АСК-ZnO-КГ и МПФПК-Fe₃O₄-КГ и результаты моделирования генерации ионов водорода в СК *per se* (1) и Fe₃O₄ (2), СК-Fe₃O₄ (3) и СК-Fe₃O₄-КГ (4) нанокмпозитах до и после добавления аскорбиновой кислоты в СК-Fe₃O₄ + АК (5) и СК-Fe₃O₄-КГ + АК (6) в зависимости от их концентрации C ($\times 10^{-3}$ моль/л)

Установлена закономерность уменьшения пика катодного тока, обусловленного образованием гидроксильных радикалов $\cdot\text{OH}$, по мере увеличения концентрации органических комплексов в металлографеновых нанокompозитах. На примере нанокompозитов АСК–ZnO–КГ выявлена эффективная нейтрализация гидроксильных радикалов $\cdot\text{OH}$ в процессе электро-Фентона в отличие от АСК *per se* и АСК–ZnO с концентрацией органических комплексов, равной $\sim 2,8 \times 10^{-5}$ моль/л, которая является ниже минимальной концентрации ингибирования $\sim 1,0 \times 10^{-4}$ моль/л.

В случае нанокompозитов МПФПК–Fe₃O₄–КГ зависимость уменьшения пика катодного тока от концентрации МПФПК *per se* можно описать экспоненциальной функцией $y = 6,26 - 0,17 \exp(-x / 113,00)$, наночастиц МПФПК – функцией $y = 1,32 + 2,45 \exp(-x / 16,50)$ и нанокompозитов МПФПК–Fe₃O₄–КГ – $y = -41,06 + 45,95 \exp(-x / 2,66 \times 10^3)$. Таким образом, ингибирование гидроксильных радикалов $\cdot\text{OH}$ в нанокompозитах МПФПК–Fe₃O₄–КГ в $\sim 23,5$ раза выше, чем в МПФПК *per se*, и в $\sim 161,2$ раза выше, чем в наночастицах МПФПК.

Для выявления закономерности антиоксидантного действия наноматериалов в процессе электро-Фентона проведено теоретическое моделирование образования ионов водорода в электролизе на поверхности электрода. На примере нанокompозитов СК–Fe₃O₄–КГ обнаружено образование наибольшего количества ионов водорода $C_{\text{H}^+} \sim 1,6 \times 10^{-2}$ моль/л в отличие от СК–Fe₃O₄ ($C_{\text{H}^+} \sim 5,1 \times 10^{-3}$ моль/л), что обусловлено ускорением переноса электронов в реакции дисмутации салицилатных комплексов железа, тем самым препятствуя их взаимодействию с H₂O₂. Следовательно, в салицилатных комплексах железа в нанокompозитах СК–Fe₃O₄–КГ это может вызвать окислительно-восстановительную дезактивацию железа в процессе Фентона в отличие от СК *per se* и СК–Fe₃O₄.

Установлено, что концентрация C_{H^+} увеличивается на поверхности СК с физисорбированными молекулами аскорбиновой кислоты АК ($\sim 1,3 \times 10^{-2}$ – $1,9 \times 10^{-2}$ моль/л), а также в СК–Fe₃O₄ с АК ($1,4 \times 10^{-2}$ – $1,6 \times 10^{-2}$ моль/л), но уменьшается в СК–Fe₃O₄–КГ с АК ($9,9 \times 10^{-3}$ – $7,8 \times 10^{-3}$ моль/л). Следовательно, АК действует как электронный молекулярный переключатель антиоксидантной активности металлографеновых нанокompозитов с органическими комплексами в зависимости от их концентрации и электронной, молекулярной структуры.

Результаты анализа каталитической активности k (A/($\times 10^{-3}$ кг/л)) металлографеновых нанокompозитов показали ее увеличение от 6,7 в СК–Fe₃O₄ + АК до $2,7 \times 10^3$ в МПФПК–Fe₃O₄–КГ в отличие от органических соединений *per se*. Высокая каталитическая активность металлографеновых нанокompозитов с органическими комплексами обусловлена их способностью эффективно переносить электроны к близлежащим окружающим атомам и молекулам, что приводит к их активизации.

Отличительной особенностью работы является проверка гипотезы активизации молекул МПФПК при изучении каталитической активности нанокompозитов МПФПК–Ag–КГ–N,S в реакции одноэлектронного переноса между ионами $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ и $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ в сравнении с МПФПК *per se* методом абсорбционной спектроскопии (рисунок 8).

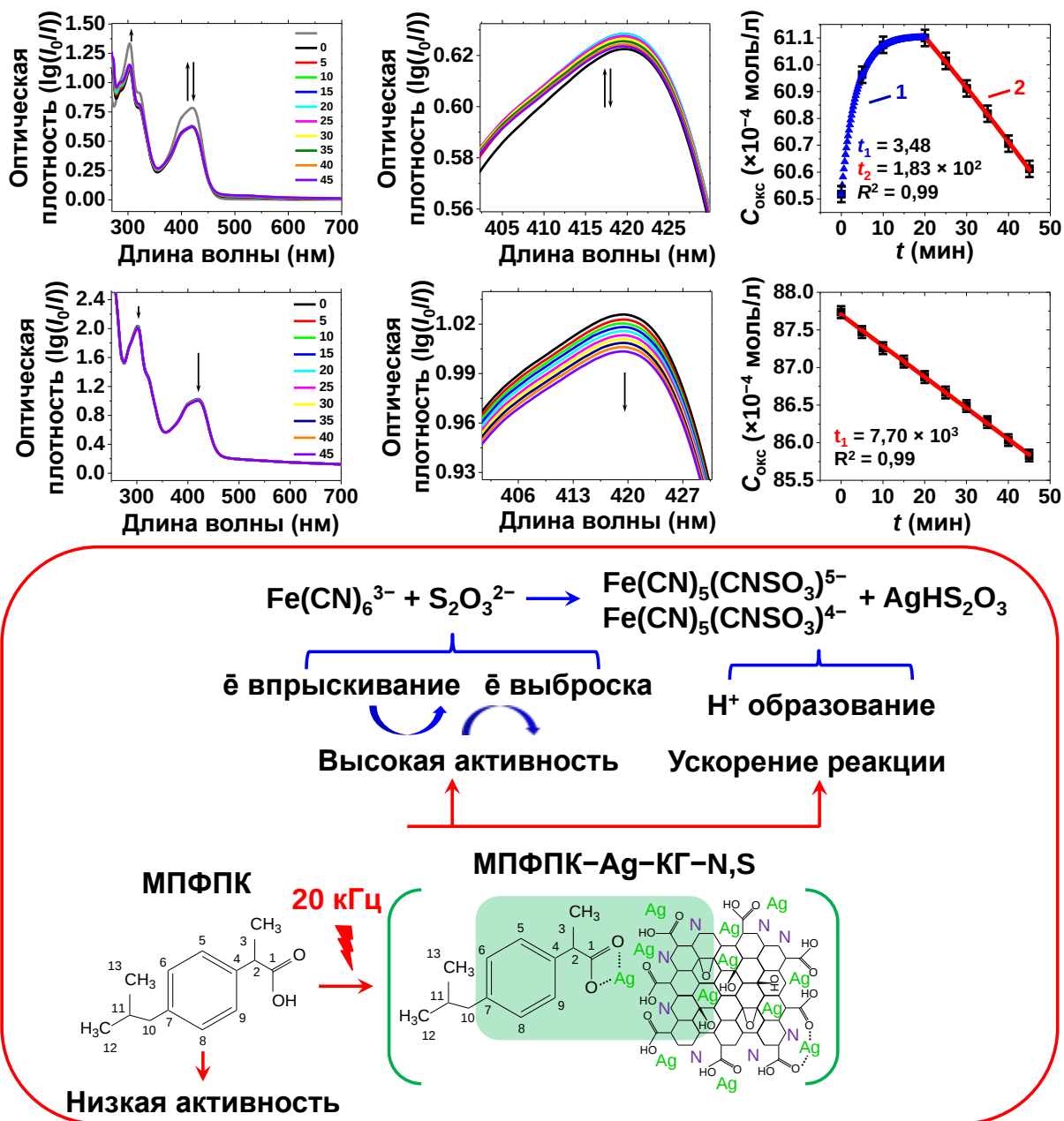


Рисунок 8 – Абсорбционные спектры водных реакционных растворов с $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ ($2,0 \times 10^{-4}$ л, $1,0 \times 10^{-2}$ моль/л) и $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ($2,0 \times 10^{-4}$ л, $1,0 \times 10^{-1}$ моль/л) при добавлении МПФПК *per se* ($6,0 \times 10^{-4}$ л, $5,0 \times 10^{-3}$ моль/л) или МПФПК–Ag–КГ–N,S и результаты их анализа, представленные в виде схемы обнаруженного механизма

Анализ аналитического пика на 420 нм, обусловленного электронными переходами $3t_{1u} \rightarrow 2t_{2g} d^5$ в ионных комплексах ферроцианида(III), позволил выявить, что его интенсивность увеличивается в течение первых 20 мин

реакции, а затем уменьшается в течение 25 мин при взаимодействии с МПФПК *per se*, но уменьшается в течение 45 мин реакции с МПФПК–Ag–КГ–N,S. Установлена зависимость увеличения концентрации окислителя в течение первых 20 мин реакции, которую можно описать экспоненциальной функцией $y_1 = 61 - 0,59 \exp(x / -3,48)$, а в последующие 25 мин – $y_2 = 65 - 3,02 \exp(x / -183,25)$ ($R^2 = 0,99$). Рассчитанная каталитическая активность МПФПК *per se* на первой стадии равна $V_0 = 3,48 \times 10^{-2}$ (моль/л)/мин и на второй имеет значение 1,83 (моль/л)/мин. Следовательно, ускорение одноэлектронного процесса в МПФПК *per se* на второй стадии происходит в ~52,66 раза быстрее, чем на первой.

В случае нанокompозитов МПФПК–Ag–КГ–N,S выявлена зависимость уменьшения концентрации инов окислителя от ~ $87,7 \times 10^{-4}$ моль/л до ~ $85,8 \times 10^{-4}$ моль/л по мере увеличения продолжительности каталитической реакции от 0 до 45 мин, которую можно описать функцией $y = -232 + 319,16 \exp(x / -7,7 \times 10^3)$. Таким образом, каталитическая активность МПФПК–Ag–КГ–N,S составляет $V_0 = 7,7 \times 10^1$ (моль/л)/мин, которая в ~42 раза выше, чем в МПФПК *per se*.

Установлен принцип активизации МПФПК *per se* в нанокompозитах МПФПК–Ag–КГ–N,S (см. рисунок 8). Активизация комплексообразующей МПФПК проявляется через высокую каталитическую активность в одноэлектронном переносе между ионами $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ и $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ и опосредована избытком образования H^+ , что приводит к формированию промежуточных продуктов реакции, таких как $\text{Fe}(\text{CN})_5(\text{CNSO}_3)^{x-}$ ($x = 4$ или 5) и AgHS_2O_3 , которые увеличивают окислительное действие ионов $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$.

Морфология, состав и кристалличность металлографеновых нанокompозитов с выявленными электрическими и оптическими свойствами служат пограничным случаем для изучения взаимодействия с клеточными мембранами. При этом ключевыми параметрами металлографеновых нанокompозитов с органическими комплексами являются связи С–О, С–ОН, О–С=О, С–С и ОН группы, участвующие в формировании водородных связей, а также выявленные электрические и каталитические свойства подобных нанокompозитов в ингибировании гидроксильных радикалов.

На примере нанокompозитов АСК–ZnO–КГ, характеризующихся конусообразной морфологией и беспримесной фазой вюрцита, обнаружено уменьшение площади поверхности колоний бактерий с 58,07 до 7,98 % в отличие от АСК–ZnO (до 10,02 %) и АСК *per se* (до 23,93 %) (рисунок 9). Установлено, что образование ковалентных и водородных связей между атомами цинка, углерода, кислорода и водорода в нанокompозитах АСК–ZnO–КГ способствует взаимодействию с клеточной мембраной, что приводит к бактериостатическому действию, усиленному в 7,3 раза.

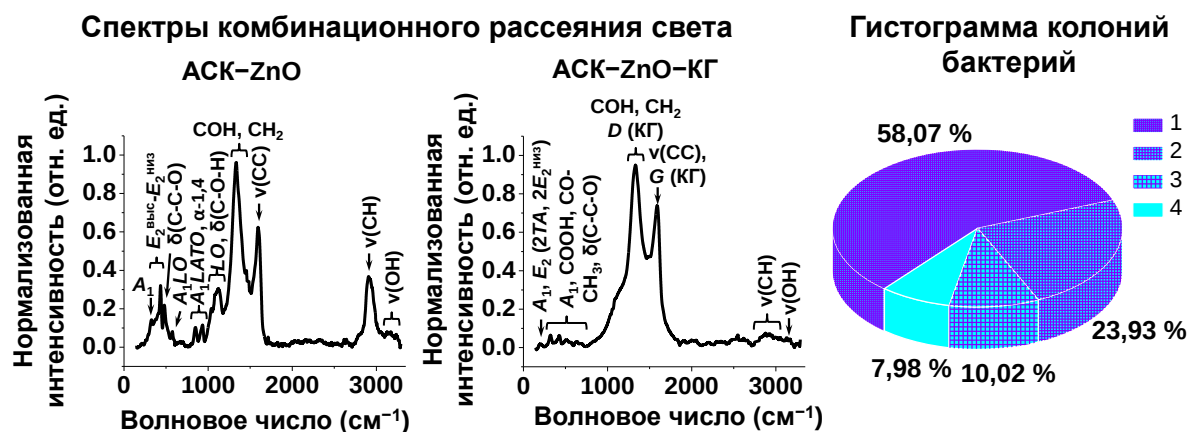


Рисунок 9 – Спектры комбинационного рассеяния света нанокмпозитов ACK-ZnO и ACK-ZnO-KГ и гистограмма колоний бактерий штамма кишечной палочки M-17 (1) после инкубации с ACK *per se* (2), ACK-ZnO (3) или ACK-ZnO-KГ (4)

Используя выявленные электрические свойства и антиоксидантную активность металлографеновых нанокмпозитов, сформированных на основе СК-комплексов, выявлено, что фенильное кольцо, связанное с карбоксильной группой, и Fe-O способствуют образованию ионов H^+ при окислительно-восстановительной дезактивации железа. На основании данных каталитической активности в ингибировании гидроксильных радикалов проведена оценка флуоресцентной эффективности наноматериалов в малигнизированных клетках. В связи с этим обнаружена наиболее высокая интенсивность флуоресценции наносфер СК- Fe_3O_4 -КГ благодаря их улучшенному взаимодействию с липидным слоем мембраны в отличие от наноструктур без КГ или на основе магнетита с СК-комплексом (таблица 2).

На примере СК- Fe_3O_4 -КГ наносфер с беспримесной фазой магнетита изучена их флуоресцентная эффективность в малигнизированных клетках, как показано на снимках конфокального флуоресцентного микроскопа и гистограммах медианной интенсивности флуоресценции (рисунок 10).

Таблица 2 – Медианная интенсивность флуоресценции ($\times 10^4$) полученных наноматериалов в малигнизированных клетках

Клеточная культура	СК- Fe_3O_4	СК- Fe_3O_4 -КГ	Fe_3O_4	Fe_3O_4 -КГ
HeLa	$2,92 \pm 0,05$	$4,18 \pm 0,46$	$1,77 \pm 0,31$	$3,57 \pm 0,29$
HepG2	$2,12 \pm 0,31$	$2,75 \pm 0,27$	$1,41 \pm 0,14$	$2,14 \pm 0,25$

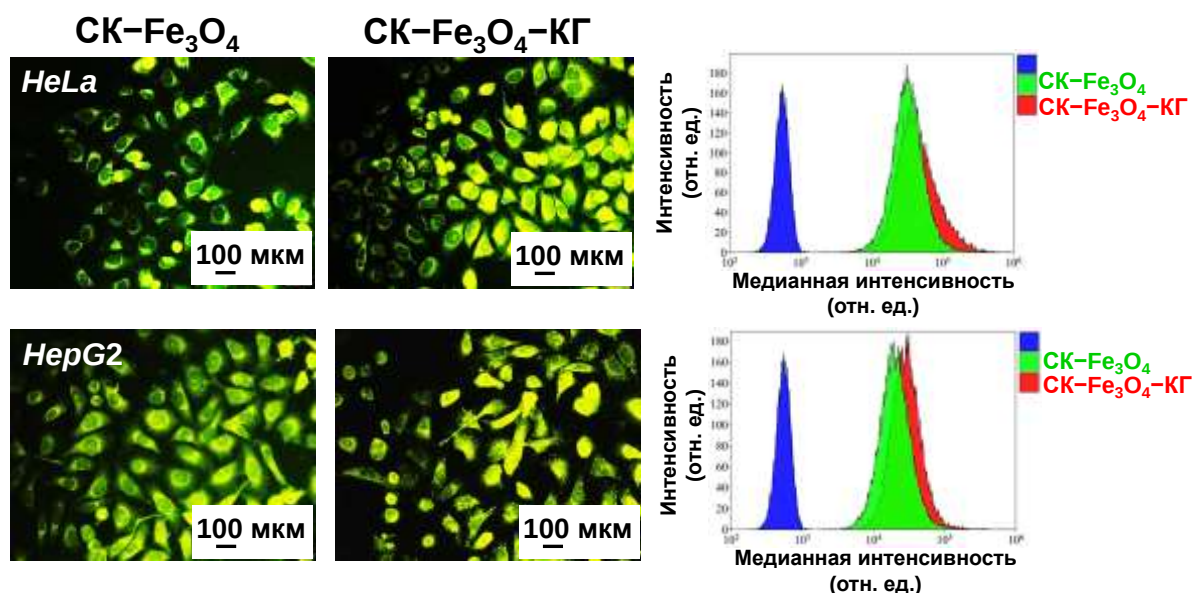


Рисунок 10 – Снимки конфокального флуоресцентного микроскопа и гистограммы медианной интенсивности флуоресценции нанокompозитов CK-Fe₃O₄ и CK-Fe₃O₄-КГ в малигнизированных клетках *HeLa* и *HepG2*

Используя полученные данные о конъюгации монодисперсных наносфер Ag с КГ и амфифильности серебряно-графеновых нанокompозитов с органическими комплексами, приводящие к усилению электрических и оптических свойств, а также каталитической активности в переносе электронов и генерации ионов водорода, недоступных наночастицам серебра или КГ по отдельности, проведена оценка распределения плотности потока рассеиваемой мощности тепла P_{cervix} в опухолевой ткани при СВЧ-излучении в диапазоне (0,1–1,0) ГГц.

Обнаружена зависимость увеличения локальной напряженности электрического поля $E_{\text{макс}}$ (В/м) по мере увеличения удельной электропроводности от $1,0 \times 10^{-3}$ См/м до 1,0 См/м при взаимодействии с МПФПК-Ag-KГ-N,S внутри опухолевой ткани. Установлено, что рассчитанная величина P_{cervix} может достигать наибольшего значения в МПФПК-Ag-KГ-N,S при условии уменьшения поверхностной зоны рассеяния: МПФПК-Ag → МПФПК-Ag-KГ-N,S → МПФПК *per se*. При этом поглощение СВЧ-излучения поляризующимися органическими комплексами в металлографеновых нанокompозитах способствует более эффективному осуществлению генерации ионов водорода электролизом воды и позволяет сочетать ее с повышенным локальным тепловыделением в окрестности атомов металла, обуславливая таким образом селективное уничтожение малигнизированных клеток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Установлено, что пластины кислородсодержащего графена, легированного азотом и серой, с латеральным размером 8–500 нм, сформированные жидкофазным окислением пиролитического графита с функциональными группами (карбоксильными, гидроксильными, эпоксидными, карбонильными) при ультразвуковой обработке в водно-спиртовой среде, характеризуются отношением концентраций атомов углерода и кислорода, изменяющимся от 1,12 до 6,22, и обладают в отличие от нелегированного графена амфифильными свойствами, контролируемые интенсивностью ультразвукового воздействия в диапазоне 7–36 Вт/см² при продолжительности 1–120 мин за счет акустической кавитации, стимулирующей образование связей между углеродом графена и кислородом в функциональных группах и среде синтеза, что согласуется с динамической моделью Лерфа – Клиновски [1–А; 2–А; 11–А; 12–А; 14–А–17–А; 19–А–21–А; 23–А; 26–А; 27–А; 29–А; 32–А].

2. Выявлена зависимость состава функциональных групп и структуры наноматериалов, состоящей из легированного азотом и серой кислородсодержащего графена, от температуры, показывающая, что при нагреве в кислородсодержащей атмосфере химический состав материалов сохраняется до 70 °С, а в диапазоне 120–140 °С происходит десорбция гидроксильных групп и частичное отшелушивание пластин графена, при этом нагрев до 400 °С приводит к удалению карбоксильных групп, а эпоксидные и карбонильные группы удерживаются в структуре графена даже при 600–700 °С, что позволяет использовать такие материалы для последующей высокотемпературной функционализации графена атомами металлов [1–А; 2–А; 11–А; 12–А; 14–А–17–А; 19–А–21–А; 23–А; 26–А; 27–А; 29–А; 32–А].

3. Установлены закономерности формирования металлографеновых нанокомпозитов, содержащих органические комплексы производной пропионовой, уксусной или салициловой кислоты, состоящие в одностадийном образовании связей между группами органических соединений (карбоксильными, гидроксильными) с атомами металла, кислородом, углеродом и водородом, расположенным в ароматическом кольце, путем возбуждения ультразвуковыми волнами (частота 20 кГц, интенсивность 7–27 Вт/см², продолжительность 1–5 мин) атомов металла и кислорода в графене, что позволило разработать методологию получения нанокомпозитов контролируемой сферической, кубической, конусообразной или эллипсоидной формы, размером 10–80 нм и 300–580 нм с беспримесной кристаллической фазой серебра, куприта, тенорита, магнетита или вюрцита, гомогенных по составу или со структурой «ядро/оболочка», описываемых моделью акустического эмульгирования согласно механизму неустойчивости

Рэлея – Тейлора [2–А; 5–А–7–А; 9–А–11–А; 13–А–15–А; 17–А; 19–А–23–А; 26–А–35–А].

4. Установлено, что поглощение света в металлографеновых нанокompозитах с органическими комплексами зависит от входящего в их состав металла (серебро, медь, железо, цинк) и присоединенной производной кислоты (пропионовой, уксусной или салициловой), заключающееся в появлении характеристических абсорбционных пиков благодаря электронным переходам в ароматических кольцах и функциональных группах (карбоксильных, гидроксильных) в полосе 215–305 нм, а также межзонным переходам в оксидах металлов (меди(II), железа(III)) и кислородсодержащем графене на длинах волн 333 и 336 нм, включая переходы между атомами углерода, кислорода, металла и водорода на длинах волн 370, 380, 390, 400, 411, 456, 495, 580 нм, что позволяет идентифицировать связи (ковалентные, ионные и водородные) в таких структурах, продукты окисления и ступенчатую ионизацию органических кислот в содержащей их водной среде в отличие от имеющихся аналогов, созданных на основе нелегированного графена [1–А–4–А; 13–А; 14–А; 16–А; 18–А–23–А; 25–А–31–А; 34–А].

5. Моделированием в рамках представлений о возникновении электрического тока в поверхностном слое металлографеновых наносфер с комплексами пропионовой или салициловой кислоты (диаметром 1–100 нм) при изменении во времени приложенного к ним потенциала установлено, что плотность индуцированных поляризационных токов в этих слоях в зависимости от входящего в их состав металла и диаметра частиц составляет $4,0 \times 10^3$ – $8,0 \times 10^6$ А/м², а соответствующая им удельная электропроводность находится в пределах $3,0 \times 10^2$ – $2,0 \times 10^7$ См/м, увеличиваясь в ряду металлов цинк, железо, серебро и достигая наибольшего значения при минимальном диаметре наносфер, что обеспечивает избирательную электромагнитную активизацию органических молекул при их оптическом возбуждении [2–А; 8–А; 20–А–23–А; 28–А; 31–А; 32–А].

6. Обнаружено ускорение обмена электронами между аквакомплексами и гидратированными соединениями в водных растворах, содержащих нанокompозиты из кислородсодержащего графена с поверхностными кластерами металла в органических комплексах и окислитель (гексацианоферрат) из-за увеличения электронной плотности в частицах с измененными ароматическими кольцами и водородной связью в графене, а также образования ионов водорода и атомной металл-кластерной структуры органических комплексов с окислителем, которые показали, что в рамках модели каталитического процесса в случае кластеров серебра со средним диаметром ~10 нм концентрация ионов окислителя уменьшается от $87,7 \times 10^{-4}$ до $85,8 \times 10^{-4}$ моль/л со скоростью реакции, достигающей $7,7 \times 10^3$ (моль/л)/с, благодаря чему снижается энергетический барьер для переноса электронов и повышается фотокаталитическая активность таких материалов в сравнении с традиционно используемыми наночастицами серебра [2–А; 5–А–7–А; 21–А–24–А; 29–А; 31–А; 32–А; 35–А].

7. Установлено уменьшение концентрации гидроксильных радикалов в водных растворах, включающих нанокomпозиты размером 10–70 нм из кислородсодержащего графена с комплексами 2-(ацетилокси)- или 2-гидроксibenзойной кислоты, а также комплексами пропионовой кислоты и оксидами металлов в зависимости от генерации ионов водорода на поверхности нанокomпозитов, что при концентрации органических комплексов от $2,8 \times 10^{-5}$ до $2,1 \times 10^{-1}$ моль/л в случае оксида железа происходит связывание трехвалентного железа этими комплексами и дезактивации двухвалентного железа, что на один – три порядка понижает скорость образования гидроксильных радикалов, контролируя таким образом антиоксидантные свойства таких нанокomпозитов [1–А; 2–А; 19–А; 20–А; 23–А; 24–А; 34–А].

8. Используя модель электрохимического разложения воды, отличающуюся учетом наличия адсорбированных на электродах каталитически активных нанокomпозитов, получены новые данные о генерации водорода с концентрацией $(0,7–6,0) \times 10^{-3}$ моль/л в присутствии наносфер размером от 10 до 50 нм с ядром из кислородсодержащего графена и магнетита и оболочкой из комплексов пропионовой или салициловой кислоты, которые указывают на определяющую роль в этом процессе взаимодействия атомов железа с органическими комплексами и демонстрируют возможность контролировать дезактивацию железа в связях с кислородом и углеродом на поверхности таких сфер и связанное с ним увеличение концентрации протонированного двухвалентного железа в 161 раз в комплексах с пропионовой кислотой и в 23 раза в комплексах салициловой кислоты при добавлении в них аскорбиновой кислоты, что дает возможность оптимизировать условия функционирования электронных устройств для генерации водорода [1–А; 2–А; 18–А; 20–А; 21–А; 23–А; 30–А; 31–А; 34–А].

9. Показана возможность применения сформированных металло-графеновых наноматериалов размером от 15 до 70 нм с органическими комплексами в качестве бактериостатических покрытий и установлена закономерность уменьшения количества колоний бактерий кишечной палочки штамма, взятых в качестве модельного микроорганизма, на единицу площади поверхности, уменьшающейся от 23,9 до 8,0 % при образовании связей (ковалентных, водородных) между атомами металла, углерода, кислорода и водорода этих материалов и клеточной мембраной, что в случае комплексов производной 2-(ацетилокси)бензойной кислоты с концентрацией $2,1 \times 10^{-4}$ г/мл в цинк-графеновой структуре обеспечивает уменьшение количества колоний в 7,3 раза, при этом комплексы данной кислоты с концентрацией $2,8 \times 10^{-4}$ г/мл без графена замедляют рост бактерий в 5,8 раза благодаря в том числе и конусообразной форме используемых нанокomпозитов, препятствующей генерации гидроксильных радикалов на их поверхности, что позволяет применять такие нанокomпозиты в каталитических материалах для контроля бактериостатических и окислительных процессов [1–А; 18–А; 19–А; 22–А; 28–А; 31–А].

10. Показана возможность применения кислородсодержащих графеновых нанокомпозитов с фазой магнетита и органическими комплексами размером 10–15 нм для подавления развития и апоптоза малигнизированных клеток (шейки матки, печени и аденокарциномы толстой кишки человека) в присутствии аскорбиновой кислоты за счет проникновения этих нанокомпозитов в малигнизированные клетки и воздействия органических комплексов с трех- и двухвалентным железом на внутриклеточные структуры (митохондрии, клеточные мембраны), способствуя окислительно-восстановительной дезактивации железа, при которой молекулы аскорбиновой кислоты, действуя как молекулярные переключатели в процессе генерации ионов водорода и торможении образования гидроксильных радикалов, не менее, чем десятикратно снижают концентрацию малигнизированных клеток в водной среде [1–А; 17–А; 20–А; 28–А; 31–А; 34–А].

11. Теоретическим моделированием электролиза внутри биологической ткани показана возможность применения покрытия металлического сферического зонда металлографеновыми нанокомпозитами размером 12–50 нм, содержащими органические комплексы, для удаления малигнизированных клеток при подаче на него электрического потенциала 0,5–0,6 В в условиях электромагнитного излучения частотой 0,1–1,0 ГГц благодаря повышенной на несколько порядков локальной напряженности электрического поля и индуцированных поверхностных токов за счет дополнительного к графену поглощения электромагнитного излучения поляризующимися органическими комплексами, а также десятикратного повышения тепловыделения в окрестности атомов металла в сочетании с увеличением на три порядка локальной концентрации ионов водорода, обуславливая таким образом селективное и более эффективное уничтожение малигнизированных клеток [2–А; 5–А–8–А; 12–А; 21–А; 24–А; 25–А; 29–А; 32–А; 35–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Нанокомпозиты на основе КГ, оксидов переходных металлов или серебра с комплексами производных органических кислот являются актуальными для применения в электронике и фотонике, включая каталитические устройства с контролируемыми антиоксидантными свойствами, электронные приборы для генерации ионов водорода, контролируемой пассивацией бактериостатических и окислительных процессов, а также комбинированной онкопротекторной хемодинамической терапии. Нанокомпозиты, состоящие из КГ и оксида цинка с комплексами ацетилсалициловой кислоты, могут использоваться в антибактериальных материалах, проявляющих также бактериостатическую активность вне зависимости от внешнего воздействия ультрафиолетовым, инфракрасным или СВЧ-излучением.

Синтезированные магнетит-графеновые нанокомпозиты с комплексом салициловой кислоты, а также серебряно-графеновые нанокомпозиты с комплексом 2-(4-(2-метилпропил)фенил)-пропановой кислоты, проявляющие

повышение локальной напряженности электрического поля и индуцированных им поверхностных токов, а также тепловыделение в окрестности атомов металла в сочетании с генерацией ионов водорода электролизом воды можно рекомендовать для комбинированной хемодинамической терапии. Установленный принцип ультразвукового комплексообразования производных органических кислот (пропионовой, 2-(ацетилокси)- или 2-гидроксibenзойной) с КГ, легированным атомами металла (серебра, меди, железа, цинка), является многогранным для применения синтетических и биологических полимеров, актуальных в электронике и фотонике для расщепления воды и генерации ионов водорода.

В таблице 3 приведены рекомендации по практическому использованию синтезированных металлографеновых нанокомпозитов с органическими комплексами в зависимости от их типа и характеристик, а также выделены главные преимущества таких материалов, в том числе и перед существующими аналогами.

Таблица 3 – Сравнительный анализ назначения синтезированных металлографеновых нанокомпозитов с органическими комплексами в зависимости от их типа и характеристик

Тип нано-композитов	Характеристики	Назначение	Преимущества перед аналогами
МПФПК–Ag–КГ со средним диаметром ~10 нм	Форма – сфера, диаметр <25 нм, латеральный размер КГ <500 нм, С/О отношение: 1,12–6,22	Фото-каталитический наноматериал для расщепления воды; гибкая электроника; струйная печать гибридных проводящих чернил	<i>In situ</i> восстановление ионов серебра с КГ и МПФПК, снижение межчастичного сопротивления, избирательная активизация молекул; повышение каталитической активности не менее чем на три порядка. Аналоги серебряно-графеновых комплексов с МПФПК в форме наночастиц отсутствуют

Продолжение таблицы 3

Тип нано-компози́тов	Характеристики	Назначение	Преимущества перед аналогами
АСК–CuO–КГ, ДФК–CuO–КГ	Форма – сфера, латеральный размер <400 нм, С/О отношение: 0,4–1,4	Фотоката- литический наноматериал; фотоэлектрод в электро- химических ячейках; оптический преобразова- тель энергии	Регулируемая эффективность оптического поглощения, рН- контролируемые хемисорбция и физисорбция каталитически активной поверхности, которые отсутствуют в аналогах
СК–Fe ₃ O ₄ -КГ, МПФПК–Fe ₃ O ₄ –КГ	Форма – сфера, куб, латеральный размер <80 нм, структура – «ядро/оболочка»	Нано- материалы для магнитно- резонансной томографии; электро- Фентон катализ; микро- масштабная аэрозольная струйная печать	Высокая флуоресцентная контрастность, контролируемое ингибирование процесса Фентона, что недоступно для аналога, состоящего из отдельных частиц магнетита, адсорбированных на пластинах КГ
АСК–ZnO–КГ, СК–ZnO–КГ	Форма – сфера, пирамида, латеральный размер: 6–70 нм	Перевязочные анти- бактериальные материалы для защиты от ультра- фиолетового облучения; чернила на основе наночастиц для печатной электроники	Высокая электромагнитная активизация органических молекул; антибактериальная активность, не требующая стимулирующего излучения, что недоступно для аналогов наночастиц оксида цинка

Использование и внедрение результатов диссертационного исследования подтверждены соответствующими актами, копии которых представлены в приложении И.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монографии

1–А. Radziuk, D. V. Formation of nanoparticles of nonsteroidal anti-inflammatory drugs with metallographene structure and improved electrokinetic properties / D. V. Radziuk. – Minsk : Bestprint, 2023. – P. 177; ISBN 978-985-7267-31-6.

2–А. Радюк, Д. В. Композиционные наночастицы кислородсодержащего графена с лекарственными металлокомплексами / Д. В. Радюк. – Минск : Бестпринт, 2024. – С. 210.

Статьи в рецензируемых научных журналах

3–А. Radziuk, D. V. Spectroscopic investigation of composite polymeric and monocrystalline systems with ionic conductivity / D. V. Radziuk, H. Möhwald // *Polymers*. – 2011. – Vol. 3, Iss. 2. – P. 674–692.

4–А. Radziuk, D. V. Ultrasonic approach for formation of erbium oxide nanoparticles with variable geometries / D. V. Radziuk, A. Skirtach, A. Geßner, M. U. Kumke, W. Zhang, H. Möhwald, D. Shchukin // *Langmuir*. – 2011. – Vol. 27, Iss. 23. – P. 14472–14480.

5–А. Radziuk, D. V. Highly effective hot spots for SERS signatures of live fibroblasts / D. V. Radziuk, H. Möhwald // *Nanoscale*. – 2014. – Vol. 6, Iss. 11. – P. 6115–6126.

6–А. Radziuk, D. V. Chemical imaging of live fibroblasts by SERS effective nanoshells / D. V. Radziuk, R. Schuetz, A. Masic, H. Moehwald // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2014. – Vol. 16, Iss. 2. – P. 24621–24634.

7–А. Radziuk, D. V. Prospects for plasmonic hot spots in single molecule SERS towards the chemical imaging of live cells / D. V. Radziuk, H. Moehwald // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2015. – Vol. 17, Iss. 33. – P. 21072–21093 (обзорная статья).

8–А. Radziuk, D. V. Surpassingly competitive electromagnetic field enhancement at the silica/silver interface for selective intracellular surface enhanced Raman scattering detection / D. V. Radziuk, H. Möhwald // *ACS Nano* – 2015. – Vol. 9, Iss. 3. – P. 2820–2835.

9–А. Radziuk, D. V. Ultrasonically treated liquid interfaces for progress in cleaning and separation processes / D. V. Radziuk, H. Möhwald // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2016. – Vol. 18, Iss. 1. – P. 21–46 (обзорная статья).

10–А. Radziuk, D. V. Ultrasonic mastering of filter flow and antifouling of renewable resources / D. V. Radziuk, H. Möhwald // *ChemPhysChem*. – 2016. – Vol. 17, Iss. 7. – P. 931–953 (обзорная статья).

11–А. Radziuk, D. V. Sonochemically assembled photoluminescent copper-modified graphene oxide microspheres / D. V. Radziuk, L. Mikhnayets, A. Tkach, L. Tabulina, V. Labunov // *Langmuir*. – 2018. – Vol. 34, Iss. 29. – P. 8599–8610.

12–А. Rozel, P. Properties of nitrogen/silicon doped vertically oriented graphene produced by ICP CVD roll-to-roll technology / P. Rozel, D. Radziuk,

L. Mikhnaveets, E. Khokhlov, V. Shiripov, I. Matolínová, V. Matolín, A. Basaev, N. Kargin, V. Labunov // *Coatings*. – 2019. – Vol. 9, Iss. 1. – P. 1–24.

13–A. Radziuk, D. V. Ultrasonic formation of copper/iron graphene oxide for ketorolac delivery / D. V. Radziuk, L. Mikhnaveets, L. Tabulina, V. Labunov, M. Vorokhta, V. Matolín // *Int. J. Nanosci.* – 2019. – Vol. 18, Iss. 3–4. – Article. 1940072.

14–A. Radziuk, D. V. Sonochemical formation of copper/iron-modified graphene oxide nanocomposites for ketorolac delivery / D. V. Radziuk, L. Mikhnaveets, L. Tabulina, V. Labunov, M. Vorokhta, V. Matolín // *Chem. Eur. J.* – 2019. – Vol. 25, Iss. 24. – P. 6233–6245.

15–A. Fiadosenka, U. The properties of the sonochemically functionalized nonsteroidal anti-inflammatory drug ketorolac in Fe₃O₄-graphene oxide nanocomposite / U. Fiadosenka, A. Matsukovich, L. Tabulina, V. Labunov, D. Radziuk // *New J Chem. (Letter)*. – 2019. – Vol. 41, Iss. 41. – P. 16118–16122.

16–A. Tkach, A. Graphene oxide-coated CuO nanoparticles for functionalization of acetylsalicylic acid and diclofenac / A. Tkach, A. Matsukovich, N. Krekoten, L. Tabulina, V. Labunov, D. Radziuk // *ACS Appl. Nano Mater.* – 2020. – Vol. 3, Iss. 6. – P. 5593–5604.

17–A. Tkach, A. Polyvinyl alcohol enhances acetylation of ascorbic acid in superparamagnetic-graphene oxide nanoparticles ultrasonically complexed with acetylsalicylic acid / A. Tkach, U. Fiadosenka, A. Burko, H. V. Bandarenka, A. Matsukovich, N. Krekoten, L. Tabulina, V. Labunov, D. Radziuk // *ACS Appl. Polym. Mater.* – 2020. – Vol. 2, Iss. 8. – P. 3663–3673.

18–А. Михновец, Л. А. Воздействие ультразвука на нестероидные противовоспалительные лекарства в комплексных соединениях нанокмпозитов на основе оксидов меди, железа, цинка и графена / Л. А. Михновец, А. Н. Ткач, В. С. Федосенко, Д. В. Радюк // *Доклады БГУИР*. – 2020. – Vol. 18, Iss. 8. – P. 69–76.

19–A. Tkach, A. Potent E. coli M-17 growth inhibition by ultrasonically complexed acetylsalicylic acid-ZnO-graphene oxide nanoparticles / A. Tkach, A. Burko, H. Bandarenka, T. Khrustaleva, D. Zhigulin, L. Tabulina, V. Labunov, K. Veltruská, V. Matolín, D. Radziuk // *ACS Appl. Nano Mater.* – 2021. – Vol. 4, Iss. 1. – P. 778–792.

20–A. Mikhnaveets, L. Ultrasonic formation of Fe₃O₄-reduced graphene oxide-salicylic acid nanoparticles with switchable antioxidant function / L. Mikhnaveets, V. Abashkin, H. Khamitsevich, D. Shcharbin, A. Burko, N. Krekoten, D. Radziuk // *ACS Biomater. Sci. Eng.* – 2022. – Vol. 8, Iss. 3. – P. 1181–1192.

21–A. Drinevskyi, A. Activation of ibuprofen via ultrasonic complexation with silver in N-doped oxidized graphene nanoparticles for microwave chemotherapy of cervix tumor tissue / A. Drinevskyi, E. Zelkovskyi, V. Abashkin, D. Shcharbin, T. Rysalskaya, D. V. Radziuk // *ACS Biomater. Sci. Eng.* – 2023. – Vol. 9, Iss. 1. – P. 182–196.

22–А. Калискаров, В. Ю. Электромагнитная активизация салициловой кислоты в комплексе с оксидированной цинк-графеновой структурой /

В. Ю. Калискаров, Е. А. Зелковский, Д. В. Радюк // Доклады БГУИР. – 2023. – Vol. 21, Iss. 1. – P. 26–34.

23–А. Drinevskyi, A. Fenton-hydroxyl radical antioxidant efficiency of ibuprofen-Fe₃O₄-GO nanospheres / A. Drinevskyi, E. Zelkovskyi, V. Labunov, D. Radziuk // ACS Appl. Nano Mater. – 2024. – Vol. 7, Iss. 3. – P. 3082–3095.

24–А. Karpilova, E. Indomethacin-V₂O₃-reduced graphene oxide nanocomposites as catalysts in the electro-Fenton process / E. Karpilova, E. Zelkovskyi, D. Radziuk // ACS Appl. Nano Mater. – 2026. – Vol. 9, Iss. 16. – P. 6949–6963.

Глава в книжном издании

25–А. Radziuk, D. V. Synthesis and Stabilization of Silver Nanoparticles for Antibacterial and Drug Delivery Systems / D. V. Radziuk // Chapter 13, Book “Silver Nanoparticles: Synthesis, Uses and Health Concerns” / ed. I. Armentano, J. Maria Kenny University of Perugia, Italy – 1st ed. – Nova Science Publishers Inc., New York, 2013. – P. 283–300; ISBN: 978-1-62808-402-3

Статьи в сборниках материалов научных конференций

26–А. Sonochemical formation of copper/iron-modified graphene oxide nanocomposites for delivery of nonsteroidal anti-inflammatory ketorolac / D. Radziuk, L. Mikhnavecs, L. Tabulina, V. Labunov, M. Vorokhta, V. Matolín // EMN Prague Meeting on Nanoparticles – Prague, 2019. – P. 1.

27–А. Ultrasonic formation of copper/iron-modified graphene nanocomposites for nonsteroidal anti-inflammatory drugs / D. Radziuk, L. Mikhnavecs, A. Tkach, V. Fedosenko, L. Tabulina, V. Labunov, M. Vorokhta, K. Veltruská, V Matolín // Advanced Materials Congress – Stockholm, 2019. – P. 28.

28–А. Воздействие ультразвука на нестероидные противовоспалительные лекарства в комплексных соединениях нанокмппозитов на основе оксидов меди, железа, цинка и графена / Е. Зелковский, Д. В. Радюк // Медэлектроника – 2020. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сб. науч. ст. XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10 дек. 2020 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники, Белорус. мед. акад. последиплом. образования. – Минск, 2020. – С. 69–76.

29–А. Формирование и свойства кислородсодержащих графен-серебряных наночастиц легированных ультразвуком / Е. Зелковский, Д. В. Радюк // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых «Инновационные материалы и технологии» ИМТ-2022, г. Минск, 23–24 марта 2022 г. – Минск : БГТУ, 2022. – С. 55–58; ISBN 978-985-530-724-3.

30–А. Формирование магнетит-графеновых наночастиц с комплексами ибупрофена / Е. А. Зелковский, Д. В. Радюк // Сборник материалов XXXI международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов, секция 1. Изучение молекулярной структуры и

свойств конденсированного состояния. Физика Конденсированного Состояния. 2023. – С. 36–38.

31–А. Improving NSAIDs: Oxidized metallographene-NSAID nanoparticles / L. Mikhnaveets, A. Tkach, V. Kaliskarov, A. Drinevskiy, E. Zelkovskiy, D. Radziuk // Материалы международного симпозиума «16th International Symposia on Applied Bioinorganic Chemistry» (16-ISABC), 2023. – С. 182.

32–А. Электрофизические свойства серебряно-графеновых наночастиц с комплексом метилпропилфенилпропановой кислоты для микроволновой терапии опухолевой ткани шейки матки / Е. А. Зелковский, Е. С Карпилова, Д. В. Радюк // Материалы XI международной школы-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики – 2024», г. Минск, 24-26 апреля 2024 г. – Минск ГНУ «Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси», 2024. – С. 104–107.

33–А. Формирование и свойства ванадий-графеновых наночастиц индометацина / В. С. Колосей, Е. С. Карпилова, Е. Зелковский, Д. В. Радюк // Материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых «Инновационные материалы и технологии» ИМТ–2024, г. Минск, 31 марта–04 апреля 2024 г. – Минск : БГТУ, 2024.

34–А. Антиоксидантная активность магнетит-графеновых наночастиц с комплексом метилпропилфенилпропановой кислоты / Е. А. Зелковский, Д. В. Радюк // Материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых «Инновационные материалы и технологии» ИМТ–2024, г. Минск, 31 марта–04 апреля 2024 г. – Минск : БГТУ, 2024.

35–А. Свойства ибупрофен-серебряно-графеновых наночастиц для микроволновой противораковой терапии / А. С. Дринеvский, Е. А. Зелковский, Е. С. Карпилова, В. А. Лабунов, Н. И. Каргин, Д. В. Радюк // Материалы 15-й международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения», г. Москва, 22–23 мая 2024 г. – М. : НИЯУ МИФИ, 2024. – С. 101–102.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

36–А. L. Mikhnaveets, L. Tabulina, V. Labunov, D. Radziuk / Properties of Copper/Iron-modified Graphene Oxide Nanocomposites for Applications in Nanomedicine // 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 22–26 апреля 2019 г., БГУИР, Минск, Беларусь : тезисы докладов. – Минск. – 2019. – С. 215.

37–А. A. Tkach, L. Tabulina, V. Labunov, D. Radziuk / Properties of Copper-modified Graphene Oxide Nanocomposites for Biomedical Applications // 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 22–26 апреля 2019 г., БГУИР, Минск, Беларусь : тезисы докладов. – Минск. – 2019. – С. 206.

38–А. В. С. Федосенко, Л. В. Табулина, В. А. Лабунов, Д. В. Радюк / Ультразвуковая нанотехнология для получения магнетита в матрице окисленного графена // 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 22–26 апреля 2019 г., БГУИР, Минск, Беларусь : тезисы докладов. – Минск. – 2019. – С. 207.

39–А. Формирование и свойства наночастиц на основе комплекса салициловой кислоты и Fe_3O_4 –кислородсодержащего графена с переключаемой антиоксидантной функцией / Л. А. Михновец, В. М. Абашкин, А. А. Хамицевич, Д. Г. Щербин, А. А. Бурко, Н. А. Крекотень, Д. В. Радюк // Молекулярные, мембранные и клеточные основы функционирования биосистем. К 100-летию белорусской академической науки [Электронный ресурс] : тез. докл. междунар. науч. конф., Пятнадцатого съезда Белорус. обществ. об-ния фотобиологов и биофизиков, Респ. Беларусь, Минск, 15–17 июня 2022 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: И. Д. Вологовский (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2022. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – ISBN 978-985-881-415-1.

40–А. Эффект ультразвука на ионные свойства магнетит-графеновых наночастиц с комплексом метилпропилфенилпропановой кислоты / Е. А. Зелковский, Д. В. Радюк // 60-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 22–26 апреля 2024 г., БГУИР, Минск, Беларусь : тезисы докладов. – Минск. – 2024.

41–А. Электронно-молекулярная структура ванадий-графеновых наночастиц с комплексом производной индолуксусной кислоты для биомедицинского применения / В. Н. Шелковская, В. С. Колосей, Е. С. Карпилова, Е. А. Зелковский, Д. В. Радюк // 60-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 22–26 апреля 2024 г., БГУИР, Минск, Беларусь: тезисы докладов. – Минск. – 2024.

42–А. Improving NSAIDs: Oxidized Metallographene-NSAID Nanoparticles / L. Mikhnavets, A. Tkach, A. Drinevskyi, E. Zelkovskyi, D. Radziuk // Molecular Biophysics, DFG, 2024.



РЭЗІЮМЭ

Радзюк Дар'я Ўладзіміраўна

Фармаванне пры актываванні ультрагукам і ўласцівасці нанакампазітаў на аснове кіслародзмяшчальнага графена з атамамі металу і арганічнымі комплексамі

Ключавыя словы: металаграфенавыя нанакампазіты; ультрагук, арганічны метала-комплекс; вытворная воцатнай, саліцылавай або прапіёнавай кіслаты; генерацыя вадароду, фатоніка, каталіз

Мэта працы: ўсталяванне заканамернасцяў, якія ўключаюць фармаванне, марфалогію, склад, структуру і функцыянальныя ўласцівасці нанакампазітаў на аснове кіслародзмяшчальнага графена, аксідаў пераходных металаў (медзі, жалеза, цынку) або срэбра з комплексамі вытворнай арганічнай кіслаты – воцатнай, прапіёнавай або саліцылавай – метадамі вадкафазных працэсаў пры актываванні ўльтрагукам з магчымасцю іх ужывання для стварэння матэрыялаў электронікі і фатонікі, і каталітычных пакрыццяў з палепшанымі характарыстыкамі.

Метады даследавання: гідратэрмальнае легаванне і растварэнне – асаджэнне, комплексаўтварэнне пад дзеяннем ультрагуку, акустычнае эмульгіраванне, электронная мікраскапія (растравая, трансмісійная), аптычная фазава-кантрасная мікраскапія, тэрмагравіметрычны аналіз, рэнтгенаўская дыфрактаметрыя, дзета-патэнцыял, спектраскапія (энергадысперсійная рэнтгенаўская, інфрачырвоная, камбінацыйнага рассеявання святла, рэнтгенаўская фотаэлектронная, малекулярная абсарбцыйная), метады канчатковых элементаў, электrolіз, працэс Фэнтана.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: канцэптуальна развіты актуальны навуковы напрамак у галіне нанатэхналогій і нанаматэрыялаў, які ўключае распрацоўку навуковай і тэхналагічнай базы фармавання металаграфенавых нанакампазітаў на аснове кіслародзмяшчальнага графена, аксідаў металаў (медзі, жалеза, цынку) або срэбра з арганічнымі комплексамі вытворнай воцатнай, прапіёнавай або саліцылавай кіслаты, і ў распрацоўцы метадаў вадкафазных працэсаў пры актываванні ўльтрагукам, што дазволіла атрымліваць функцыянальныя нанаматэрыялы з кантраляванымі структурнымі, аптычнымі, электрычнымі, каталітычнымі і біяфункцыянальнымі ўласцівасцямі для электронікі і фатонікі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: фота-каталітычны нанаматэрыял для расшчаплення вады; гнуткая электроніка; струменевы друк гібрыдных якія праводзяць чарнілаў; аптычны пераўтваральнік энергіі; нанаматэрыялы для абароны ад ультрафіялетавага апрамянення і электра-Фэнтан каталіза.

Вобласць ужывання: электроніка, фатоніка, каталіз, медыцына.

РЕЗЮМЕ

Радюк Дарья Владимировна

Формирование при активировании ультразвуком и свойства нанокompозитов на основе кислородсодержащего графена с атомами металла и органическими комплексами

Ключевые слова: металлографеновые нанокompозиты; ультразвук, металлоорганический комплекс; производные уксусной, салициловой или пропионовой кислоты; генерация водорода, фотоника, катализ

Цель работы: установление закономерностей, включающих формирование, морфологию, состав, структуру и функциональные свойства нанокompозитов на основе кислородсодержащего графена, оксидов переходных металлов (меди, железа, цинка) или серебра с комплексами производной органической кислоты – уксусной, пропионовой или салициловой – методами жидкофазных процессов при активировании ультразвуком с возможностью их применения для создания материалов электроники и фотоники, и каталитических покрытий с улучшенными характеристиками.

Методы исследования: гидротермальное легирование и осаждение из раствора, комплексообразование с помощью ультразвука, акустическое эмульгирование, электронная микроскопия (растровая, просвечивающая), оптическая фазово-контрастная микроскопия, термогравиметрический анализ, рентгеновская дифрактометрия, дзета-потенциал, спектроскопия (энергодисперсионная рентгеновская, инфракрасная, комбинационное рассеяние света, рентгеновская фотоэлектронная, молекулярная абсорбция), метод конечных элементов, электролиз, процесс Фентона.

Полученные результаты и их новизна: концептуально развито актуальное научное направление в области нанотехнологий и наноматериалов, включающее разработку научной и технологической базы формирования металлографеновых нанокompозитов на основе кислородсодержащего графена, оксидов металлов (меди, железа, цинка) или серебра с органическими комплексами производной пропионовой, уксусной или салициловой кислоты, и в разработке методов жидкофазных процессов при активировании ультразвуком, что позволило получать функциональные наноматериалы с контролируемыми структурными, оптическими, электрическими, каталитическими и биофункциональными свойствами для электроники и фотоники.

Рекомендации по использованию: фотокаталитический наноматериал для расщепления воды; гибкая электроника; струйная печать гибридных проводящих чернил; оптический преобразователь энергии; наноматериалы для защиты от ультрафиолетового излучения и Фентон-катализа.

Область применения: электроника, фотоника, катализ, медицина.

SUMMARY

Radziuk Darya Vladimirovna

Formation and properties of nanocomposites based on oxygen-containing graphene with metal atoms and organic complexes upon ultrasound activation

Keywords: metallo-graphene nanocomposite; ultrasound, organometallic complex; derivatives of acetic, salicylic or propionic acid; hydrogen generation, photonics, catalysis

Purpose of the work: establishment of the regularities including the formation, morphology, composition, structure and functional properties of nanocomposites based on oxygen-containing graphene, transition metal oxides (copper, iron, zinc) or silver with complexes of an organic acid derivative – acetic, propionic or salicylic acid – using liquid-phase processes with ultrasound activation, with the possibility of their use for the creation of electronic and photonic materials, and catalytic coatings with improved characteristics.

Used equipment: hydrothermal alloying and precipitation from solution, ultrasound-assisted complexation, acoustic emulsification, electron microscopy (scanning, transmission), optical phase-contrast microscopy, thermogravimetric analysis, X-ray diffractometry, zeta potential, spectroscopy (energy dispersive X-ray, infrared, Raman scattering, X-ray photoelectron, molecular absorption), finite element method, electrolysis, Fenton process.

The results obtained and their novelty: a relevant scientific direction in the field of nanotechnology and nanomaterials has been conceptually developed, including the development of a scientific and technological basis for the formation of metal-graphene nanocomposites based on oxygen-containing graphene, metal oxides (copper, iron, zinc) or silver with organic complexes of propionic, acetic or salicylic acid derivatives, and in the development of methods for liquid-phase processes with ultrasound activation, which made it possible to obtain functional nanomaterials with controlled structural, optical, electrical, catalytic and biofunctional properties for electronics and photonics.

Recommendations for use: photocatalytic nanomaterial for water splitting; flexible electronics; inkjet printing of hybrid conductive inks; optical energy converter; nanomaterials for UV protection and Fenton catalysis.

Scope: electronics, photonics, catalysis, medicine.

Научное издание

Радюк Дарья Владимировна

**ФОРМИРОВАНИЕ ПРИ АКТИВИРОВАНИИ УЛЬТРАЗВУКОМ И
СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ
КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ГРАФЕНА С АТОМАМИ МЕТАЛЛА И
ОРГАНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

по специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы
(по отраслям)

Подписано в печать 08.09.2026. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,6. Тираж 60 экз. Заказ 181.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
«2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск