



Татьяна Кулагова,
заведующая сектором
биофизических
исследований лаборатории
наноэлектромагнетизма
Института ядерных
проблем БГУ, кандидат
биологических наук,
доцент



Никита Белько,
младший научный
сотрудник Центра
«Квантовая оптика и
квантовая информатика» Института
физики
им. Б.И. Степанова
НАН Беларуси



Сергей Килин,
заведующий Центром
«Квантовая оптика и
квантовая информатика»
Института физики
им. Б.И. Степанова
НАН Беларуси, академик,
профессор, иностранный
член РАН

Углеродные наноструктуры — перспективные наноматериалы для сенсорики и тераностики

Тераностика — современный мультидисциплинарный биомедицинский подход, сочетающий диагностику, терапию и мониторинг эффекта лечения преимущественно онкологических заболеваний. Комплексное решение терапевтических и диагностических проблем осуществляется путем создания сложных фармацевтических композиций и/или наноструктур, которые можно использовать в комплексе с лекарственными веществами, — тераностических агентов. С одной стороны, они должны специфически накапливаться в поврежденных и/или опухолевых клетках, предоставлять исследователю возможность для диагностики и направленной управляемой (адресной) визуализируемой доставки его. Тераностический агент может содержать в структуре специфический лиганд для опухолевых клеток, должен обладать флуоресцентными или магнитными свойствами для визуализации и детектирования его накопления. С другой стороны, тераностический агент либо должен иметь модифицируемую поверхность для внедрения функциональных групп и функционализации лекарственными препаратами, либо обладать свойствами, активация которых под действием ультразвука, электромагнитного излучения, температуры и прочих видов воздействия приведет к гибели клеток [1].

Перспективными тераностическими агентами являются углеродные наноструктуры (УНС), включающие углеродные точки (УТ), фуллерены, углеродные нанотрубки (УНТ), наноалмазы, углерод-луковичные структуры [2]. УТ представляют собой нульмерные квазисферические углеродные наночастицы с размерами 2–10 нм, состоящие как из sp^2 -, так и из sp^3 -гибридизированных атомов углерода, и в зависимости от структуры подразделяются на графеновые квантовые точки (ГКТ), углеродные квантовые точки и углеродсодержащие полимерные точки. Фуллерены – это молекулы в виде выпуклых замкнутых многогранников из атомов углерода, гибридизация которых находится между sp^2 - и sp^3 -состояниями. Наноалмазы содержат алмазное ядро из sp^3 -гибридизованного углерода, которое окружено оболочкой из других аллотропных модификаций углерода (sp^2 -, аморфного) и функциональных групп. УНТ представляют собой аллотропную модификацию углерода в состоянии sp^2 -гибридизации в виде свернутых в трубку плоскостей графена. Углерод-луковичные структуры – это вложенные друг в друга углеродные сферы (многослойный фуллерен).

УНС, обладающие высоким соотношением площади поверхности к объему, обычно имеют поверхностные дефекты, неоднородности и функциональные группы, которые являются сайтами для функционализации лигандами (рис. 1). Ковалентная модификация углеродных наноструктур различными группами позволяет придавать им гидрофобные/гидрофильные свойства, способствующие перераспределению УНС между различными органеллами внутри опухолевых клеток и селективному их накоплению, что снижает степень токсичности данных структур по отношению к здоровым клеткам и тканям. Делокализованные π -связи на поверхности УНТ, ГКТ, окисленного графена и наличие полостей у фуллеренов и УНТ содействует нековалентному взаимодействию и комплексообразованию с фармакологическими веществами [3]. При этом на поверхности графеноподобной структуры можно эффективно иммобилизовать ДНК, ферменты, антитела, лиганды к рецепторам, химиотерапевтические препараты. Возникающие полости могут являться контейнерами для хранения и изолирования радионуклидов и токсичных атомов металлов. Так, фуллерены могут быть использованы для внедрения

ионов металлов в их структуру (например, Gd^{3+}), выступать в роли контрастных агентов для МРТ и применяться в ядерной медицине [4].

Функционализация УНС фармакологическими препаратами улучшает фармакодинамику лекарств. Установлено, что время циркуляции комплексов одностенных УНТ с противоопухолевыми препаратами в крови значительно превышает время циркуляции самого противоопухолевого препарата, что может способствовать более длительному воздействию лекарства на опухолевые клетки и увеличению его концентрации в них [5].

УНС обладает уникальными оптическими характеристиками для визуализации их в биосистемах методами флуоресцентной микроскопии и микроскопии комбинационного рассеяния (рис. 2).

Углеродные точки интенсивно флуоресцируют во всем видимом спектральном диапазоне. При этом длины волн возбуждения и флуоресценции, время жизни возбужденного состояния, интенсивность и квантовый выход люминесценции зависят от методов синтеза, используемых углеродных прекурсоров, размера, количества поверхностных дефектов и легирования углеродного ядра УТ атомами бора, азота, серы, фосфора, кремния, числа сопряженных π -электронов, а также от функциональных групп на их поверхности [6]. Показано, что при изменении параметров синтеза из одних и тех же прекурсоров можно получить УТ с максимумами люминесценции в диапазоне от 430 нм



Рис. 1. Функционализация УНС

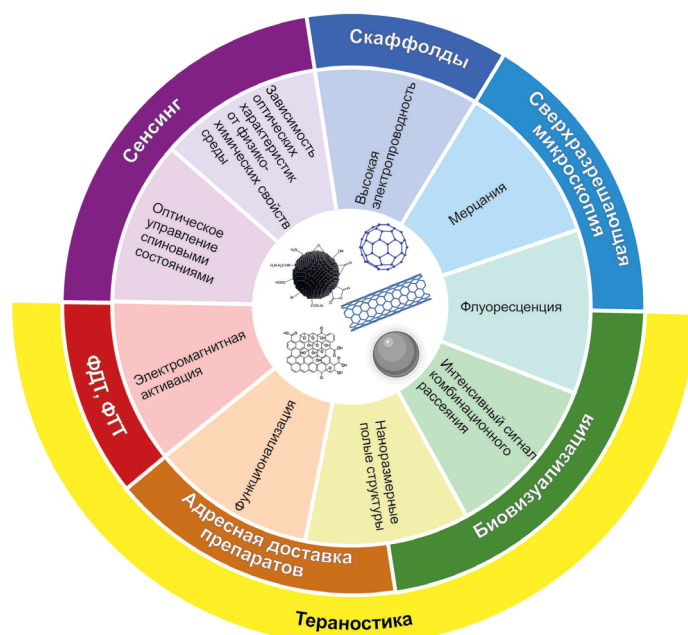


Рис. 2. Свойства УНС

до 630 нм за счет вариации латерального размера и количества поверхностных функциональных –COOH-групп. Квантовый выход люминесценции УТ достигал 52,6%, 35,1% и 12,9% в синей, зеленой и красной областях видимого диапазона соответственно. Гидротермальным методом синтеза можно получить УТ с кислородсодержащими группами, такими как гидроксильные (–ОН), карбоксильные (–COOH), эпоксидные (–COC–) и т.д., что улучшает растворимость УТ в воде [7].

Благодаря своим размерам углеродные точки хорошо накапливаются в опухолевых клетках и визуализируются. Их взаимодействию посвящены многочисленные работы. Выявлено, что УТ, функционализированные аспарагиновой кислотой, накапливаются и визуализируются в клетках глиомы С6. Исследование таких структур *in vivo* подтверждает селективную локализацию наночастиц в тканях глиомы по сравнению с нормальной тканью головного мозга. Нами изучалось накопление в клетках крови графеновых квантовых точек. Показано, что они эффективно концентрируются в нейтрофилах [8], на поверхности эритроцитов [9] и тромбоцитов. Выявлена биodeградация ГКТ с сопряженным ослаблением сигнала флуоресценции в присутствии генерируемой нейтрофилами хлорноватистой кислоты [8].

Благодаря высокой чувствительности флуоресценции УТ к параметрам внешней среды они используются при разработке сенсоров молекул

(тетрациклина, сазасульфapiидина, метиленового синего), ионов (Fe^{3+} , Hg^{2+} , Cr^{6+} , Al^{3+} , Cu^{2+} , Ag^{+}), рН-сенсоров и сенсоров температуры вне- и внутриклеточной жидкости [3, 9, 10]. При взаимодействии с различными аналитами или при изменении физико-химических параметров среды наблюдаются изменения спектральных свойств УТ. Показано, что группы –NH и –ОН на поверхности УТ связываются Fe^{3+} с образованием хелатных комплексов железа, которые тушат флуоресценцию. Добавление O_2^- приводит к восстановлению Fe^{3+} до Fe^{2+} и флуоресценции УТ [11].

Попытки применения углеродных точек в качестве сенсоров рН и агентов для рН-управляемой доставки лекарственных веществ описаны в нескольких работах. В работе [12] синтезированы модифицированные УТ, которые изменяют конформацию в кислой среде опухолевых клеток (рН 6,5–6,9), высвобождая при этом терапевтические агенты. Показано, что, когда значение рН среды увеличивается, поверхностный заряд N-допированных УТ превращается из положительного в отрицательный за счет ионизации amino-, карбоксильных и гидроксильных групп.

Углеродные точки перспективны для разработки редокс-сенсоров [11, 13]. Сенсор на основе УТ для определения H_2O_2 по механизму фотоиндуцированного переноса электрона был изготовлен группой Zhang. Поверхность УТ была ковалентно функционализирована дифенилфосфином, который является донором электронов для УТ и тушит флуоресценцию. При взаимодействии с H_2O_2 дифенилфосфин окисляется, флуоресценция УТ регистрируется. В работе [14] были исследованы комплексы УТ с доксорубицином в качестве системы доставки лекарств с визуальным контролем. Интенсивность флуоресценции углеродных точек уменьшалась после локализации доксорубина, после высвобождения его с поверхности УТ она восстанавливалась [14].

Следует отметить, что для применения УНС с целью визуализации их накопления в клетках и тканях предпочтительны наноструктуры, имеющие поглощение в диапазоне оптической «прозрачности» биологических тканей – 650–1350 нм. Например, в работе [15] использовались ГКТ, легированные азотом и бором, с излучением в ближней ИК-области и максимумом около 1000 нм.

Среди УНС особой химической инертностью и фотостабильностью отличаются наноалмазы [16]. Матрица sp^3 -гибридизованного углерода не обладает флуоресценцией, однако создаваемые в микро- и наноалмазах центры окраски позволяют полу-

чить флуоресцентные наночастицы. Нейтральные азот-вакансии (NV^0), отрицательно заряженные азот-вакансии (NV^-) и вакансии с химическими элементами IV группы (Si, Ge, Sn и Pb) в центрах окраски перспективны для флуоресцентной визуализации, оптической магнитометрии [17, 18], квантовых компьютеров [19].

Центры окраски в алмазах наиболее перспективны для точного измерения температуры на наноуровне. Наиболее изученные и широко применяемые – азото-замещенные вакансии (NV^0 и NV^- -центры). Однако исследование температурно-зависимого сдвига частоты спинового резонанса NV -центров требует применения микроволнового излучения, которое приводит к дополнительному нежелательному нагреву образца. Центры окраски с исчезающе малыми постоянными дипольными моментами, такие как GeV (германий-вакансия) и SiV (кремний-вакансия), обладают узкими яркими бесфонными линиями (602 нм для GeV и 740 нм для SiV), что позволяет измерять температурные эффекты без использования микроволновых полей. В работе [20] с помощью нейроморфного оптоволоконного зонда с торцевым наноалмазом с GeV-центрами было проведено полностью оптическое измерение температуры мозга свободно перемещающихся мышей с точностью до 0,1 °C. Используя биосовместимые алмазные монокристаллические микроиглы, обогащенные NV/SiV-центрами окраски, в [21] был продемонстрирован полностью оптический мониторинг температуры *in vitro* в физиологически значимом диапазоне (25–55 °C). Одновременное обнаружение флуоресценции NV- и SiV-центров позволяет осуществлять двухполосную визуализацию живых клеток в сочетании с измерением температуры [21].

Одно из перспективных направлений применения УНС в биомедицине – сверхразрешающая микроскопия (SRM). Многие ее модальности требуют от флуорофоров мерцаний – многократных переходов между излучающими и неизлучающими состояниями при отсутствии необратимого фотообесцвечивания. Мерцания полупроводниковых квантовых точек описаны во многих работах и позволили успешно использовать такие наноматериалы для SRM. В то же время полупроводниковые квантовые точки демонстрируют существенные недостатки с точки зрения биомедицинских применений, в особенности выраженную токсичность и сложность синтеза и функционализации. УНТ, напротив, не обладают данными недостатками, однако закономерности их мерцания пока мало изу-

чены. Во многих литературных источниках сообщается о высокой фотостабильности УТ и ГКТ, однако в наших предыдущих работах было продемонстрировано быстрое фотообесцвечивание ГКТ в различных микроокружениях, включая мембраны эритроцитов [22, 23]. В некоторых работах показано, что УТ и ГКТ могут мерцать за счет процессов переноса электрона между наночастицей и окружением [24]. Также существуют малочисленные примеры успешного применения таких наноматериалов для SRM [22, 24].

Наноалмазы с центрами окраски превосходят обычно используемые флуоресцентные метки и красители для SRM. Это связано с тем, что, несмотря на гораздо меньший квантовый выход фотолюминесценции и меньшее сечение поглощения, высокая фотостабильность этих центров окраски без мерцания совместима с длительными временами накопления [3], что улучшает пространственное разрешение при визуализации.

УНС имеют интенсивные линии в спектре комбинационного рассеяния (КР) света. Спектры КР УНС чувствительны к их структурной организации, и по их характеристикам можно определять появление дефектов и модификаций в структуре наноматериала при комплексообразовании с лекарственными препаратами и биodeградации. Сигнал КР УНС может применяться для исследования их локализации в клетке [25]. Например, вследствие малых размеров УНТ их небольшие скопления очень трудно зарегистрировать с помощью флуоресцентной конфокальной микроскопии. Однако, анализируя спектры КР клеток после взаимодействия с наноматериалом, можно выявлять внутриклеточное накопление и распределение УНТ [25–27]. Нековалентная модификация УНТ сохраняет собственную sp^2 -гибридизованную структуру стенки нанотрубки и предпочтительна для исследований методом КР-света. Следует отметить, что полосы КР, относящиеся к клеточным структурам, имеют низкую интенсивность по сравнению с сигналом от УНТ. Одним из современных направлений в изучении механизмов накопления и метаболизма УНТ в живых клетках является применение машинного обучения для анализа большого массива спектров КР. Так, в нашей работе было продемонстрировано применение кластеризации K-средних и анализа главных компонент (PCA – *principal component analysis*) спектров для разделения сигналов от УНТ и клеточных компонент [28].

Фотофизические свойства УНС позволяют использовать их в качестве фотосенсибилизатора

(ФС) для фототермической терапии (ФТТ) и/или фотодинамической терапии (ФДТ). УНТ, поглощая излучение в ближней ИК-области (700–1100 нм), эффективно преобразует его в теплоту, приводя к разрушению накопившихся УНТ опухолевых клеток за счет локального повышения температуры. Большой коэффициент поглощения при достаточно невысоком квантовом выходе люминесценции и образования $^1\text{O}_2$ при применении УТ свидетельствует о том, что при действии электромагнитного излучения большая часть энергии тратится на безызлучательную релаксацию и приводит к повышению температуры среды. Следовательно, УТ более перспективны для ФТТ. Многими авторами отмечается, что квантовый выход генерации синглетного кислорода с использованием УТ не так высок, как с применением молекулярных ФС. Поэтому исследуются УТ в качестве носителей ФС и антенн для сбора и передачи энергии оптического излучения на молекулярный ФС. УТ, активные в ИК-области, посредством двухфотонного механизма возбуждения могут одновременно обеспечивать интенсивную флуоресценцию, генерировать $^1\text{O}_2$ и проявлять фототермический эффект. Нами показано, что ГКТ, накапливаясь в мембранах эритроцитов, при воздействии излучения видимого диапазона индуцируют гемолиз, обусловленный фотохимическими и фотодинамическими эффектами [9].

Хорошо поглощающие нано- и микроstructures при импульсном высокоэнергетичном облучении способствуют формированию акустической волны в среде и могут использоваться для фотоакустической (ФА) визуализации. УТ, легированные серой и азотом, высокоэффективны для ФТТ на моделях мышей (эффективность преобразования 59%) и могут легко определяться благодаря фотолюминесценции и ФА-визуализации при низкой плотности мощности излучения ($0,8 \text{ Вт/см}^2$) [30].

Нами показано, что УНТ, накопленные в клетках в виде агломератов, при импульсном высокоэнергетичном облучении способствуют формированию акустической волны, в результате чего образуются области с $\Delta P \sim 0,7 \text{ МПа}$, достаточным для разрыва биологических мембран и повреждения клеток. Мы подтвердили это предположение экспериментально [31].

УНТ, ГКТ и графен обладают высокой электропроводностью и при добавлении к диэлектрическим материалам снижают электрическое сопротивление в них. Такие УНС могут быть использованы в качестве каркасного материала и проводящих функциональных поверхностей в инженерии клеточных тка-

ней, особенно нервной, а также для создания на их основе биосенсоров. Нами показано, что при действии электрического поля на клетки глиомы крысы линии С6 ускоряются процессы транспорта и внутриклеточного накопления УНТ [27].

Таким образом, УНС могут применяться не только как терапевтические препараты (например, для термической абляции опухолевых клеток и адресной доставки препаратов), но и одновременно для визуализации их распределения в клетках, отслеживания динамики накопления и определения локальных концентраций.

Важным ограничением применения наноматериалов в медицине является отсутствие стандартизации, что затрудняет сравнение данных различных исследований и продвижение нанотехнологий. В доклинических исследованиях с наноматериалами для получения надежных и воспроизводимых данных необходимо стандартизировать (учесть) следующие аспекты экспериментальных протоколов:

- *производство наноматериалов: очистка от побочных продуктов синтеза, получение стабильной суспензии, функционализация;*
- *структурная и спектральная характеристика наноматериалов, физико-химические процессы в системах, содержащих наноматериалы, при внешнем воздействии (электромагнитного излучения, ультразвука и др.);*
- *оценка биосовместимости наноматериалов: подбор оптимальных клеточных культур (использование 2D- и 3D-моделей) и концентраций наноматериалов, выявление механизмов внутриклеточного накопления и распределения наноматериалов;*
- *изучение клеточных культур, накопивших наноматериалы, после внешнего воздействия: оценка цитотоксичности несколькими методами, механизмов повреждения и гибели клеток;*
- *исследования на животных: индуцирование заболевания (привитие опухоли), целевое накопление наноматериалов, осуществление внешнего воздействия, оценка состояния организма и патологических клеток-мишеней до и после него;*
- *изучение механизмов элиминации наноматериалов после разрушения клеток-мишеней: биодеградация первых или экскреция из организма.*

Таким образом, в мировой научной практике ведется постоянный поиск новых лекарственных веществ для тераностики. УНС – перспективные соединения, которые могут применяться для созда-

ния агентов, обеспечивающих управляемую визуализируемую доставку лекарственных средств, а также способных под действием электромагнитного излучения регистрировать и менять физико-химические параметры среды (редокс-состояние, температуру, давление), индуцируя гибель опухолевых клеток. Актуальной является разработка точных протоколов синтеза УНС с заданными параметрами и возможностью функционализации. Необходимо исследовать механизмы взаимодействия УНС с клеточными и молекулярными компонентами крови, опухолевыми клетками. При этом актуально привлечение методов машинного обучения и нейрон-

ных сетей для анализа пространственного и временного распределения и поведения УНС в биосистемах. Применение электромагнитного излучения к живым системам, накопившим наноматериалы, требует тщательного предварительного анализа для учета фототермического, фотодинамического, фототермоакустического, фотоакустического и других возможных эффектов.

Проведение междисциплинарных систематических исследований УНС и их использование в терапии и биосенсорике позволит разработать на их основе инновационные биомедицинские агенты и тест-системы. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Smart Nanomaterials in Cancer Theranostics: Challenges and Opportunities / B.K. Kashyap [et al.] // ACS Omega. 2023. Vol. 8, №16. P. 14290–14320.
- Patel K.D. Carbon-based nanomaterials as an emerging platform for theranostics / K.D. Patel, R.K. Singh, H.W. Kim // Materials Horizons. 2019. Vol. 6. P. 434–469.
- Speranza G. Carbon Nanomaterials: Synthesis, Functionalization and Sensing Applications / G. Speranza // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, No 4. P. 967.
- Large Metal Ions in a Relatively Small Fullerene Cage: The Structure of Gd₃N@C₂(22010)-C₇₈ Departs from the Isolated Pentagon Rule / C.M. Beavers [et al.] // Journal of American Chemical Society. 2009. Vol. 131. P. 11519–11524.
- Circulation and long-term fate of functionalized biocompatible single-walled carbon nanotubes in mice probed by Raman spectroscopy / Z. Liu [et al.] // PNAS. 2008. Vol. 105. P. 1410–1415.
- Carbon dots for in vivo bioimaging and theranostics / J. Du [et al.] // Small. 2019. Vol. 15, №32. P. 1805087.
- Synthesis of carbon dots with multiple color emission by controlled graphitization and surface functionalization / X. Miao [et al.] // Advanced Materials. 2018. Vol. 30. P. 1704740.
- Visualizing hypochlorous acid production by human neutrophils with fluorescent graphene quantum dots / L. Golubewa [et al.] // Nanotechnology. 2022. Vol. 33, №9. P. 095101.
- Photostability and phototoxicity of graphene quantum dots interacting with red blood cells / T. Kulahava [et al.] // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2023. Vol. 248. P. 112800.
- Herbal medicine derived carbon dots: synthesis and applications in therapeutics, bioimaging and sensing / Luo [et al.] // Journal of Nanobiotechnology. 2021. Vol. 19, №320.
- Superoxide anion turns on the fluorescence of carbon dots-ferric complex for sensing / J. Yue [et al.] // Microchemical Journal. 2021. Vol. 168, №106412.
- pH-responsible fluorescent carbon nanoparticles for tumor selective theranostics via pH-turn on/off fluorescence and photothermal effect in vivo and in vitro / E.B. Kang [et al.] // Nanoscale. 2018. Vol. 10. P. 2512–2523.
- Near-infrared chemiluminescent carbon nanodots and their application in reactive oxygen species bioimaging / C.L. Shen [et al.] // Advanced Science. 2020. Vol. 7, №1903525.
- Highly fluorescent carbon dots for visible sensing of doxorubicin release based on efficient nanosurface energy transfer / B.B. Wang [et al.] // Biotechnology Letters. 2016. Vol. 38, №1. P. 191–201.
- Nitrogen and boron dual-doped graphene quantum dots for near-infrared second window imaging and photothermal therapy / H. Wang [et al.] // Applied Materials Today. 2019. Vol. 14. P.108–117.
- Single-molecule scale magnetic resonance spectroscopy using quantum diamond sensors / J. Du [et al.] // Reviews of Modern Physics. 2024. Vol. 96, № 2. P. 025001.
- Векторная магнитометрия с помощью одиночного комплекса NV – ¹³C в алмазе / А.П. Низовцев [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2022. Т. 89, №6. С. 807–814.
- Wrachtrup, J. Quantum computation using the ¹³C nuclear spins near the single NV defect center in diamond / J. Wrachtrup, S.Y. Kilin, A.P. Nizovtsev // Optics and Spectroscopy. 2001. Vol. 91. P. 429–437.
- Pezzagna, S. Quantum computer based on color centers in diamond / S. Pezzagna, J. Meijer // Applied Physics Reviews. 2021. Vol. 8, №1. P. 011308.
- All-optical brain thermometry in freely moving animals / I.V. Fedotov, M.A. Solotnikov, M.S. Pochechuev, O.I. Ivashkina, S.Ya. Kilin, K.V. Anokhin, A.M. Zheltikov // ACS Photonics. 2020. Vol. 7, №12. P. 3353–3360.
- All-optical thermometry with NV and SiV color centers in biocompatible diamond microneedles / L. Golubewa [et al.] // Advanced Optical Materials. 2022. Vol. 10. P. 2200631.
- Hysteresis and Stochastic Fluorescence by Aggregated Ensembles of Graphene Quantum Dots / N. Belko [et al.] // Journal of Physical Chemistry C. 2022. Vol. 126, №25. P. 10469–10477.
- Single-photon spectroscopy and emission statistics of graphene quantum dots in organic structures / N.V. Belko [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy. 2023. Vol. 90. P. 316–324.
- Super-resolution optical fluctuation bio-imaging with dual-color carbon nanodots / A.M. Chizhik [et al.] // Nano letters. 2016. Vol. 16, №1. P. 237–242.
- Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для анализа распределения углеродных нанотрубок в клетках / Е.Н. Голубева [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. 2018. Т. 85, №6. С. 999–1005.
- Rapid and delayed effects of single-walled carbon nanotubes in glioma cells / L.N. Golubewa [et al.] // Nanotechnology 2021. Vol. 32, №50. P. 505103.
- Enhancement of single-walled carbon nanotube accumulation in glioma cells exposed to low-strength electric field: Promising approach in cancer nanotherapy / L. Golubewa [et al.] // Biochemical and Biophysical Research Communications. 2020. Vol. 529, №3. P. 647–651.
- Golubewa L. Specificity of carbon nanotube accumulation and distribution in cancer cells revealed by K-means clustering and principal component analysis of Raman spectra / L. Golubewa, I. Timoshchenko, T. Kulahava // Analyst. 2024. Vol. 149, №9. P. 2680–2696.
- In vivo near-infrared mediated tumor destruction by photothermal effect of carbon nanotubes / H. K. Moon [et al.] // ACS Nano. 2009. Vol. 3, №11. P. 3707–3713.
- In vivo theranostics with near-infrared-emitting carbon dots—highly efficient photothermal therapy based on passive targeting after intravenous administration / X. Bao [et al.] // Light: Science and Applications. 2018. Vol. 7, №1. P. 91.
- Single-walled carbon nanotubes as a photo-thermoacoustic cancer theranostics agent: theory and proof of the concept experiment / L. Golubewa [et al.] // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. P. 22174.