



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-26-34>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.315.56; 661.669; 539.216.1:546.682; 546.86

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ АКТИВИЗАЦИЯ САЛИЦИЛОВОЙ КИСЛОТЫ В КОМПЛЕКСЕ С ОКСИДИРОВАННОЙ ЦИНК-ГРАФЕНОВОЙ СТРУКТУРОЙ

В. Ю. КАЛИСКАРОВ, Е. А. ЗЕЛКОВСКИЙ, Д. В. РАДЮК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 03.11.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Представлен метод электромагнитной активизации молекул салициловой кислоты *per se* (СК) посредством ультразвукового (20 кГц) комплексообразования с оксидированной цинк-графеновой структурой. Результатом разработки явились сформированные наночастицы «ZnO – частично восстановленный кислородсодержащий графен (кГ) – СК» со средним размером $(5,53 \pm 0,11)$ нм и гексагональной сингонией типа вюрцита оксида цинка с комплексами молекул салициловой кислоты. Комплексообразование салициловой кислоты с матрицей «ZnO – кГ» приводит к усилению электромагнитного поля салициловой кислоты в 10^2 раза с локальным увеличением при контакте с ZnO в 10^3 раза и, как следствие, к избирательной электромагнитной активизации молекул лекарственного вещества. Разработанный метод формирования наночастиц с составом «ZnO – кГ – СК» можно применить ко многим другим лекарственным соединениям и устройствам на их основе, что представляет большой интерес для медицинской электроники и наномедицины.

Ключевые слова: металлолекарственные наночастицы, оксид цинка, кислородсодержащий графен, ультразвук, нестероидные противовоспалительные препараты, металлокомплекс.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа проводилась в рамках гранта развития № Ф22У-007 «УЧЕНЫЙ» Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и гранта № 21-3067 1.17 § 57.86.00 Государственной программы научных исследований по теме «Разработка и формирование композиционных материалов с наноразмерными компонентами на основе оксида графена».

Для цитирования. 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. Т. 21, № 1. С. 26–34. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-26-34>.

ELECTROMAGNETIC ACTIVATION OF SALICYLIC ACID IN A COMPLEX WITH OXIDIZED ZINC-GRAPHENE STRUCTURE

VITALY Y. KALISKAROV, YAUHENI A. ZIALKOUSKI, DARYA V. RADZIUK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 03.11.2022

Abstract. This work aims at the development of a method of electromagnetic activation of salicylic acid molecules *per se* (SA) through the ultrasonic (20 kHz) complexation with oxidized zinc-graphene structure. The result of this work implies synthesized nanoparticles “ZnO – partially restored graphene oxide (rGO) – SA” with the average size

of (5.53 ± 0.11) nm and hexagonal wurtzite zinc oxide structure with complexed SA molecules. Complexation of SA with “ZnO – rGO” matrix causes magnification of electromagnetic field of SA by 10^2 times with the local enhancement at the contact with ZnO by 10^3 times, and therefore allowing selective electromagnetic activation of drug molecules. The developed method of “ZnO – rGO – SA” nanoparticles formation can be applied to many different drugs and drug-based devices, thereby introducing a great interest in medicinal electronics and nanomedicine.

Keywords: metaldrug nanoparticles, zinc oxide, reduced graphene oxide, ultrasound, nonsteroidal anti-inflammatory drugs, metallocomplex.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. This work is financially supported by the grant of development No F22Y-007 “SCIENTIST” from Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research and State Research Program under grant agreement No 21-3067 1.17 § 57.86.00 in the frame of topic “Development and formation of composite materials with components at the nanoscale based on oxidized graphene”.

For citation. Kaliskarov V. Y., Zialkouski Y. A., Radziuk D. V. (2023) Electromagnetic Activation of Salicylic Acid in a Complex with Oxidized Zinc-graphene Structure. *Doklady BGUIR*. 21 (1), 26–34. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-26-34> (in Russian).

Введение

Лекарственные препараты на основе салициловой кислоты (СК) находят широкое применение в лечении диабета второго типа, болезни Альцгеймера, ревматизма и онкологических заболеваний [1, 2]. Известно, что СК – продукт метаболизма ацетилсалициловой кислоты – вызывает серьезные побочные эффекты (например, образование язвы желудка, кровотечение, тошноту и рвоту), как и многие лекарственные вещества, относящиеся к классу нестероидных противовоспалительных препаратов. Для успешного устранения этих побочных эффектов важно определить принципы активизации электронно-молекулярной структуры СК с целью управления ее биологической эффективностью. Биологическая активность СК проявляется через ослабление процесса образования гидроксильных радикалов посредством формирования специфической связи с белками, тем самым модифицируя их структуру и, как следствие, функцию [3]. Следовательно, важно определить условия, при которых изменения электронно-молекулярной структуры СК позволят селективно контролировать механизм окислительно-восстановительной дезактивации. В отличие от многих методов изменения структуры лекарственных веществ, комплексообразование органических лиганд с ионами металла приводит к активизации многогранных координационных функций лекарства. В настоящее время изучены принципы активизации СК в комплексах с серебром для улучшения процессов заживления ран [4] и терапии рака молочной железы человека [5], с иридием для усиления противоопухолевого ингибирования [6] и с медью для управления процессами в предложенном митохондриальном пути, опосредованном активными формами кислорода [7]. Однако многие металлокомплексы салициловой кислоты, и в частности с цинком, изучены не в полной мере из-за неустойчивой структуры в редокс-процессах и ее необратимости при взаимодействии с биомолекулами, что затрудняет определение условий для контролируемой активизации лекарственных лиганд.

Ранее была предложена модель формирования гетерогенных лекарственных наночастиц со структурами «углерод – ZnO», «кислородсодержащий графен (кГ) – Zn» или «веретенообразный ZnO – кГ» с применением различных методов синтеза: гидро- и сольвотермальный [8], спрей-пиролиз [9], микроволновой [10] и ультразвуковой [11]. Для комплексообразования с углеродной структурой и ZnO использовали противораковые препараты на основе гидрата гидрохлорида 9-аминоакридина, изотретиноина, доксорубина, паклитаксела, растительных флавонолов (кверцетина и экстрактов прополиса). Сегодня известно только несколько работ, описывающих конъюгирование фармацевтических лекарств, таких как гентамицин [12] или доксорубин [13], на поверхности наночастиц «ZnO – кГ». Главным преимуществом гетерогенных лекарственных наночастиц является их мезопористая устойчивая структура, благодаря которой значительно повышается эффективность кинетики доставки лекарства и биоактивности за счет взаимодействия кГ при контакте с клеточными мембранами. Важно отметить, что в рамках предложенной модели не определены условия активизации электромагнитной структуры фармацевтических лекарств. В связи с этим цель исследований – разработка метода и определение условий

для электромагнитной активизации молекул салициловой кислоты *per se* посредством ультразвукового (20 кГц) комплексообразования с оксидированной цинк-графеновой структурой.

Методика проведения исследований

Для синтеза наночастиц и комплексообразования молекул СК применяли отечественный ультразвуковой диспергатор с сонотродом, развивающим колебания на частоте 20 кГц, используя метод калориметрии для калибровки интенсивности кавитации. Кислородсодержащий графен получили с помощью улучшенного метода Хаммерса. Наночастицы оксида цинка синтезировали химическим осаждением из жидкой фазы при следующих условиях: 0,05 М ZnSO₄, 0,125 М NaOH, термическая обработка при $T = 90$ °С в течение 30 мин, ультразвуковое действие при интенсивности ультразвука 15 Вт/см² в течение 15 мин. Порошок наночастиц оксида цинка получили методом очистки с помощью центрифугирования в течение 45 мин при центробежном ускорении 6,7×g с последующей термической обработкой при $T = 120$ °С. Условия формирования наночастиц «ZnO – кГ» – ультразвуковая обработка коллоидного раствора кислородсодержащего графена в деионизованной воде (0,92 мг/мл) при интенсивности ультразвука 10 Вт/см² в течение 30 мин с последующей очисткой посредством центрифугирования (7,3×g, 45 мин), включая процесс формирования наночастиц оксида цинка при интенсивности ультразвука 18 Вт/см² в течение 15 мин. Порошок наночастиц «ZnO – кГ» получили в процессе термической обработки при $T \leq 100$ °С после очистки седимента путем отделения от супернатанта методом центрифугирования (6,7×g, 45 мин). Ультразвуковое комплексообразование СК с наночастицами «ZnO – кГ» или ZnO (1 мг/мл) выполняли с концентрацией лекарственного вещества 6,67 мг/мл при интенсивности ультразвука 10 Вт/см² в течение 3 мин.

Морфологию, размер и элементный состав синтезированных материалов определяли методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью электронного микроскопа S-4800 (Hitachi) и энергодисперсионного спектрометра QUANTAX 200 (Bruker). Электронно-молекулярную структуру поверхности сформированных наночастиц исследовали посредством метода комбинационного рассеяния света (КРС), используя конфокальный микроскоп Confotec NR500 (SOL Instruments Ltd.), при облучении образцов монохроматическим излучением с длиной волны 473 нм.

Теоретическое моделирование распределения плотности электрического тока и напряжения на поверхности наночастиц со средним размером $(5,53 \pm 0,11)$ нм, сформированных на основе «ZnO – кГ» в комплексе с СК, проводили с помощью программного инструмента COMSOL Multiphysics. Рассматривали наночастицы на основе исходной СК и ее комплекса с ZnO. В программе вычисляли значения проводимости тока и сохранения заряда на поверхности наночастиц по фундаментальному уравнению

$$\Delta(-\sigma \Delta V) = 0, \quad (1)$$

где σ – удельная электропроводность, См/м; V – электрический потенциал, В.

Локальную величину плотности электрического тока определяли с помощью уравнения проводимости тока с учетом коэффициента формы на границе раздела фаз и диффузии

$$c = \sigma d, \quad (2)$$

где d – толщина электрохимического слоя поверхности, нм.

В расчетах учитывали наночастицы со сферической структурой, симметрия которой позволяла моделировать одно поперечное сечение на плоскости «yz». Вычисление проводили, используя следующее уравнение с входными параметрами: $\delta V / \delta t = 0,01$ В/с – начальная производная потенциала по времени; коэффициент сохранения конвекции потока α , С/м, при $x = 1, y = 1, z = 1$; коэффициент конвекции β , С/м, при $x = 1, y = 1, z = 1$; источник постоянного потока γ , А/м, при $x = 1, y = 1, z = 1$:

$$e_a \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial V}{\partial t} + \Delta(-c \Delta V - \alpha V + \gamma) + \beta \Delta V + \alpha V = f, \quad (3)$$

где e_a – коэффициент массы, $e_a = 0$; d_a – коэффициент затухания, $d_a = 1$; f – искомая величина плотности электрического тока, А/м².

Результаты исследований и их обсуждение

На РЭМ-снимках рис. 1, *a*, *b* показана морфология полученных цинк-графеновых наночастиц, имеющих сферическую форму, состоящую из многочисленных овальных зерен-кристаллитов, распределенных на поверхности кислородсодержащего графена.

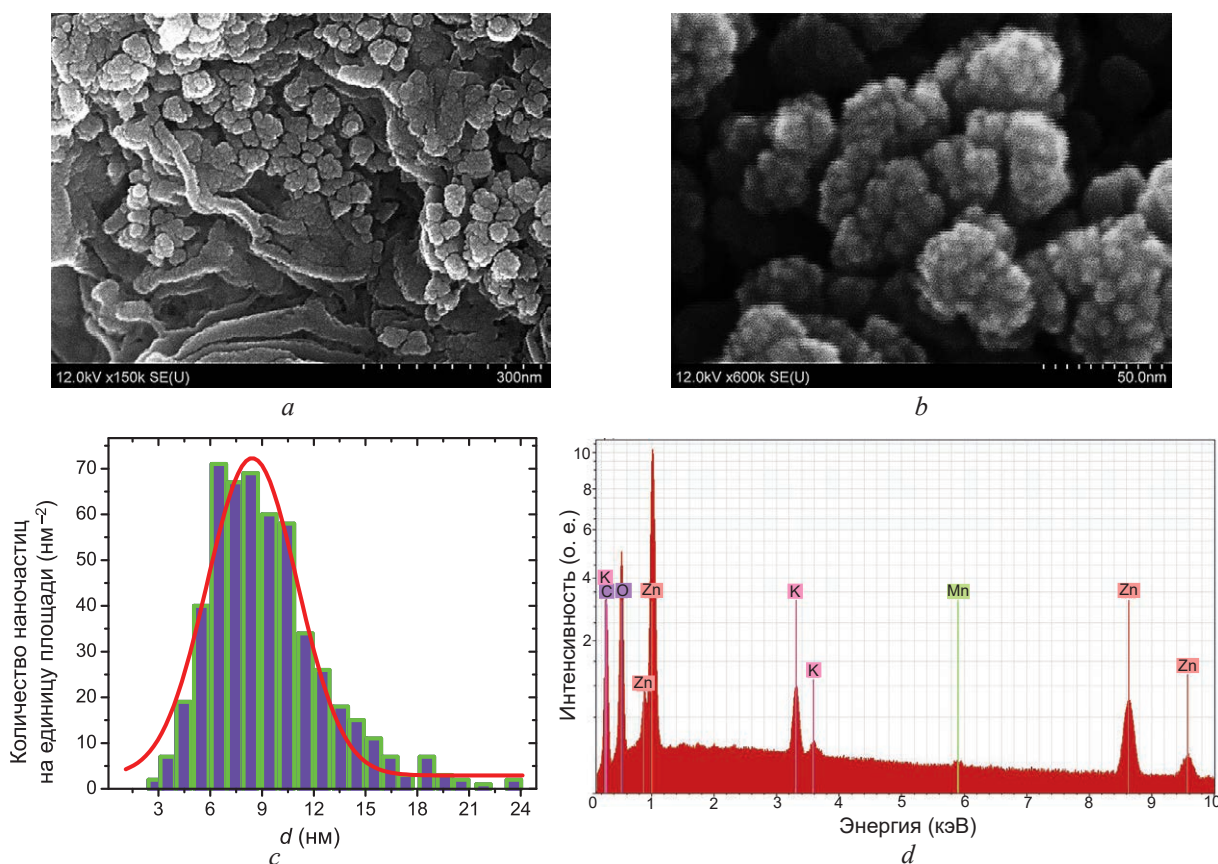


Рис. 1. Морфология, размер и элементный состав цинк-графеновых наночастиц: *a*, *b* – РЭМ-снимки с разрешением 300 и 50 нм; *c* – гистограмма распределения наночастиц по среднему размеру; *d* – энергодисперсионный рентгеновский спектр наночастиц при взаимодействии с падающим потоком электронов при напряжении 15 кВ

Fig. 1. Morphology, size and elemental composition of “ZnO – rGO” nanoparticles: *a*, *b* – SEM images at a scale 300 and 50 nm; *c* – histogram of average size distribution of nanoparticles; *d* – energy dispersive X-ray fluorescence spectrum of nanoparticles under electron flux at voltage 15 kV

Полученные наночастицы имеют средний размер ($8,43 \pm 0,15$) нм согласно результатам статистического анализа РЭМ-снимков, представленных в виде гистограммы распределения наночастиц по среднему размеру в зависимости от их количества в расчете на единицу площади поверхности (рис. 1, *c*). Красная линия на гистограмме показывает теоретически рассчитанное распределение размера, описываемое функцией Гаусса, с ярко выраженным пиком при размере наночастицы $d \sim 8,4$ нм. На рис. 1, *d* изображен энергодисперсионный рентгеновский спектр полученных наночастиц, на котором можно выделить несколько самых интенсивных линий излучения элементов со следующим процентным соотношением распределения по атомному весу, %: углерод С – ($43,7 \pm 3,0$), кислород О – ($39,0 \pm 3,4$), цинк Zn – ($15,0 \pm 1,6$). В результате анализа спектров определили атомные отношения C/O и O/Zn, равные $\sim 1,12$ и $\sim 2,60$ соответственно, что подтверждает состав наночастиц со структурой «ZnO – rG».

На рис. 2, *a*, *b* показаны определенные с помощью метода РЭМ морфология и средний размер полученных цинк-графеновых наночастиц в комплексе с СК. В результате РЭМ-анализа установлено, что эти наночастицы также имеют сферическую форму, состоящую из многочисленных зерен со средним размером $d = (5,53 \pm 0,11)$ нм, хемисорбированных на поверхности кислородсодержащего графена (рис. 2, *c*).

По энергодисперсионному рентгеновскому спектру на рис. 2, *d* определили элементный состав полученных наночастиц со следующим процентным соотношением распределения

по атомному весу, %: углерод С – ($56,5 \pm 4,1$), кислород О – ($32,4 \pm 3,1$), цинк Zn – ($9,9 \pm 1,1$). В результате анализа установлено, что атомные отношения С/О и О/Zn составляют соответственно $\sim 1,74$ и $\sim 3,27$, что превышает значения наночастиц в структуре «ZnO – rГ» на $\sim 0,62$ и $\sim 0,67$ благодаря комплексообразованию молекул СК с цинк-графеновой структурой.

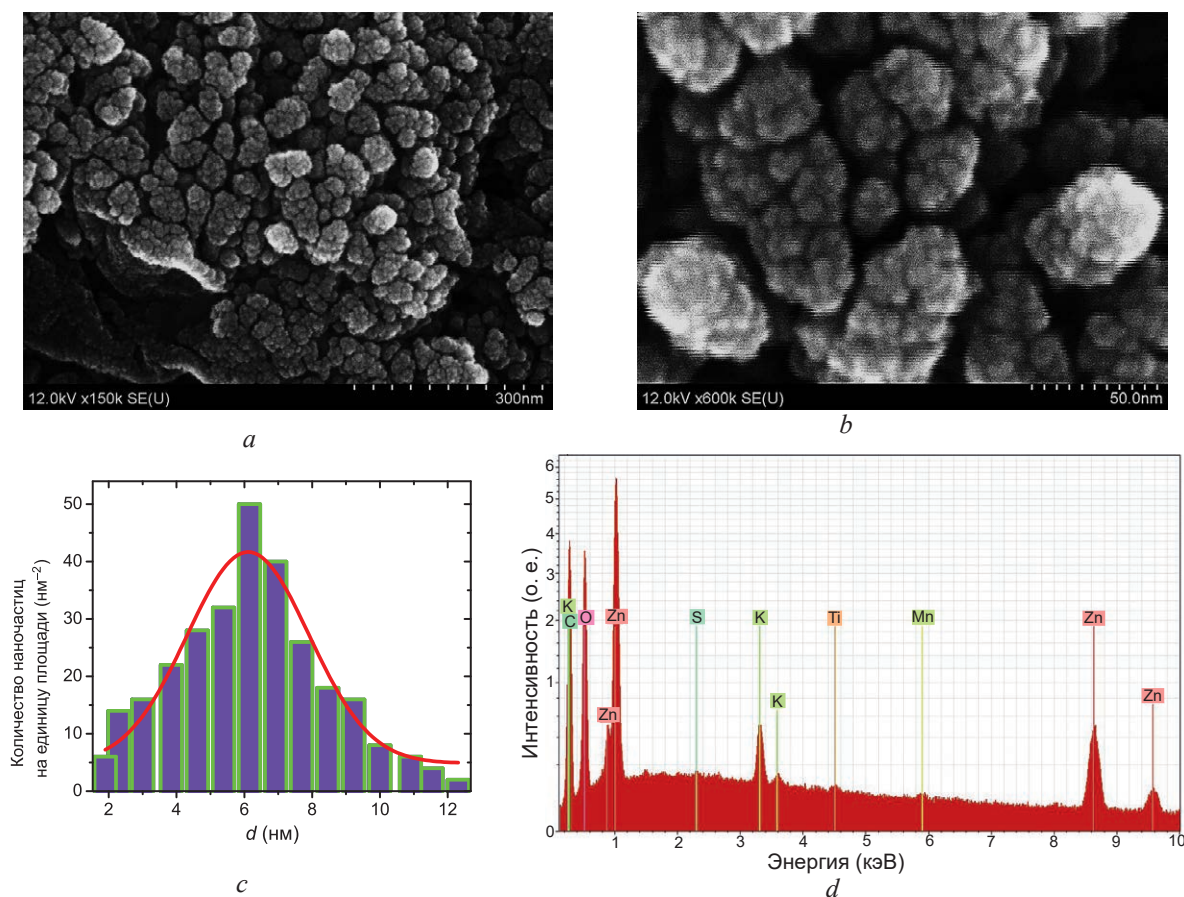


Рис. 2. Морфология, размер и элементный состав полученных цинк-графеновых наночастиц в комплексе с салициловой кислотой: *a, b, c* – то же, что на рис. 1; *d* – энергодисперсионный рентгеновский спектр наночастиц «ZnO – rГ – СК» при взаимодействии с падающим потоком электронов при напряжении 15,1 кВ

Fig. 2. Morphology, size and elemental composition of obtained “ZnO – rGO – SA” nanoparticles: *a, b, c* – the same as in Fig. 1; *d* – energy dispersive X-ray fluorescence spectrum of nanoparticles under electron flux at voltage 15.1 kV

На рис. 3 представлены спектры КРС «ZnO – rГ» и «ZnO – rГ – СК» в сравнении с исходной СК (при $\lambda_{\text{возб}} = 473$ нм, где $\lambda_{\text{возб}}$ – длина волны лазера, при которой происходит взаимодействие наночастиц с электромагнитным излучением), анализ которых позволяет определить молекулярную структуру поверхности полученных наночастиц. Спектр КРС на линии 1 (рис. 3) демонстрирует характеристические полосы колебаний СК *per se*, где наиболее интенсивные пики указывают на изгиб гидроксильной группы СК в плоскости (~ 285 cm^{-1}), внеплоскостной изгиб карбоксильной группы (~ 568 cm^{-1}), С–С изгиб бензольного кольца в плоскости (773, 1156 и 1477 cm^{-1}), С–Н изгиб бензольного кольца в плоскости (~ 1031 cm^{-1}), С–О растяжение в карбоксильной группе (1251 и 1328 cm^{-1}), COO^- симметричное (~ 1388 cm^{-1}) и асимметричное (~ 1584 cm^{-1}) колебание карбоксильной группы и С=О растяжение в карбонильной группе (~ 1637 cm^{-1}) [14].

Спектр КРС «ZnO – rГ – СК» наночастиц (рис. 3, линия 2) отличается от спектра исходной СК уменьшенным количеством полос колебаний и их заметным уширением, сопровождаемым сдвигом. Для сравнительного анализа полос колебаний приведен КРС-спектр «ZnO – rГ» наночастиц (рис. 3, линия 3). На спектре «ZnO – rГ» видны характеристические линии фундаментальных A_1 колебаний ZnO с фазой вюрцита примерно 326 и 578 cm^{-1} , E_2 Zn (~ 435 cm^{-1}), С–Н бензольного кольца rГ (~ 1142 cm^{-1}) и его D- и G-полос – 1361 и 1604 cm^{-1} . В «ZnO – rГ» с комплексами

СК происходит усиление характеристических колебаний ZnO без сдвига ($\sim 326 \text{ см}^{-1}$), $E_2 \text{ Zn}$ и ZnO со сдвигом на $\sim 433 \text{ см}^{-1}$ и $\sim 576 \text{ см}^{-1}$, что вызвано взаимодействием с СК. Важно отметить, что полосы на $\sim 1150 \text{ см}^{-1}$ и $\sim 1596 \text{ см}^{-1}$ указывают на комплексообразование СК как с ZnO, так и с кГ в наночастицах «ZnO – кГ».

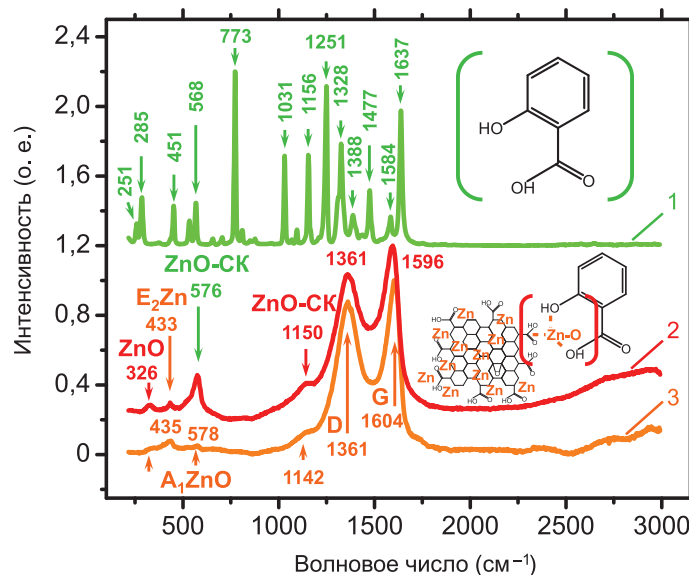


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния света «ZnO – кГ» наночастиц до и после ультразвукового комплексообразования с салициловой кислотой в сравнении с исходным лекарственным веществом: 1 – исходная салициловая кислота; 2 – «ZnO – кГ – СК» наночастицы; 3 – «ZnO – кГ» наночастицы

Fig. 3. Raman spectra of “ZnO – rGO” nanoparticles before and after ultrasonic complexation with SA in comparison with salicylic acid *per se*: 1 – pristine salicylic acid; 2 – “ZnO – rGO – SA” nanoparticles; 3 – “ZnO – rGO” nanoparticles

На рис. 4 представлена рассчитанная 3D-модель распределения поверхностного электрического напряжения и поля тока, указанного в виде стрелок, и плотности тока на наночастицах со средним размером $\sim 5,53 \text{ нм}$ на основе исходной СК (рис. 4, а), «ZnO – кГ» (рис. 4, б) и «ZnO – кГ – СК» (рис. 4, с). В результате анализа установлено, что наибольшие значения поверхностной плотности тока достигаются на «ZnO – кГ» – от $4,17$ до $4,22 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$, а наименьшие – с исходной СК – от $2,28 \cdot 10^{-8}$ до $6,72 \text{ А/м}^2$. Комплексообразование СК в составе «ZnO – кГ» наночастиц приводит к увеличению поверхностной плотности тока СК от $0,04 \cdot 10^3$ до $3,98 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$. Следовательно, увеличение электромагнитного поля СК в комплексе с «ZnO – кГ» происходит в $5,92 \cdot 10^2$ раза. Для сравнения максимальная величина поверхностной плотности тока на поверхности ZnO наночастиц достигает значения $8,39 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$, а в комплексе с СК – $79,3 \text{ А/м}^2$. Таким образом, поверхностная плотность тока СК при контакте с ZnO увеличивается в $1,25 \cdot 10^3$ раза.

На основании анализа результатов моделирования можно сделать вывод, что комплексообразование СК с цинк-графеновой структурой приводит к избирательной электромагнитной активизации исходной СК от двух до трех порядков увеличения распределения поверхностной плотности тока.

Заключение

Представлен одношаговый метод комплексообразования с помощью ультразвука (20 кГц) исходной салициловой кислоты в матрице «ZnO – кислородсодержащий графен» наночастиц со средним размером $\sim 5,53 \text{ нм}$. В результате теоретического моделирования распределения электромагнитного поля полученных наночастиц «ZnO – кислородсодержащий графен – салициловая кислота» установлено, что происходит усиление величины распределения поверхностной плотности тока молекул салициловой кислоты в структуре «ZnO – кислородсодержащий графен» в $5,92 \cdot 10^2$ раза при локальном увеличении в $1,25 \cdot 10^3$ раза вблизи ZnO, что позволяет избирательно активизировать электромагнитное поле салициловой кислоты на наномасштабе.

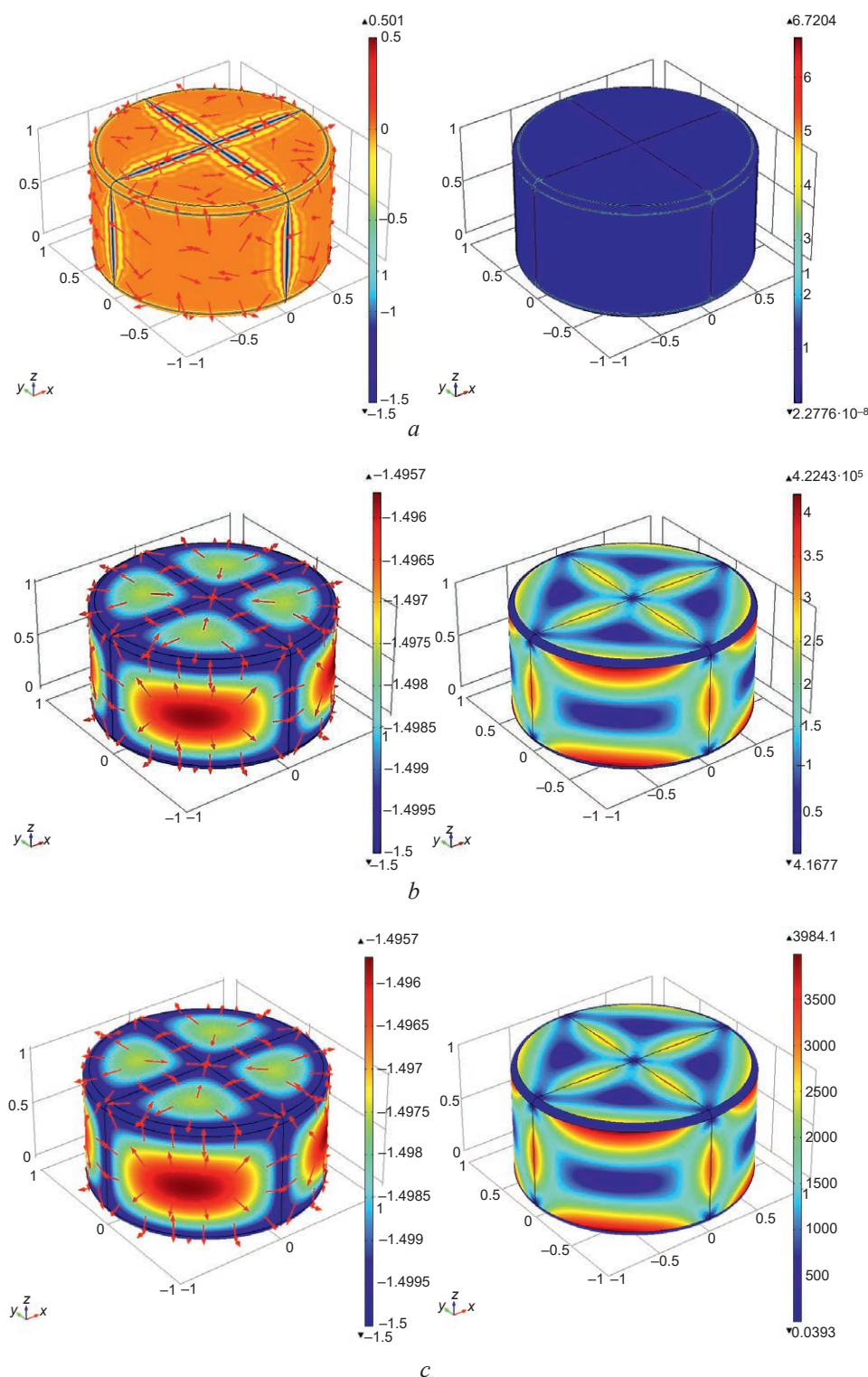


Рис. 4. Рассчитанная 3D-модель распределения поверхностного электрического напряжения и тока (в виде стрелок) (слева) и плотности тока (A/m^2) (справа) наночастиц со средним размером $\sim 5,53$ нм на основе: *a* – исходной салициловой кислоты; *b* – «ZnO – κΓ»; *c* – «ZnO – κΓ – СК» (при начальном значении напряжения $-1,5$ В и скорости изменения напряжения $0,01$ В/с при подаче внешнего напряжения $0,53$ В, учитывая эффект поглощения)

Fig. 4. Computed 3D model of surface voltage and current distribution (indicated by arrows) (left image) and current density (A/m^2) (right image) of nanoparticles with the average size ~ 5.53 nm based on: *a* – pristine salicylic acid; *b* – “ZnO – rGO”; *c* – “ZnO – rGO – SA” (at the initial voltage -1.5 V and its speed 0.01 V/s at an applied voltage 0.53 V, considering the absorption effect)

References

1. Rena G., Sakamoto K. (2014) Salicylic Acid: Old and New Implications for the Treatment of Type 2 diabetes? *Diabetol. Int.* 5 (4), 212–218. DOI: 10.1007/s13340-014-0177-8.
2. Bashir A. I. J., Kankipati C. S., Jones S., Newman R. M., Safrany S. T., Perry C. J., Nicholl I. D. (2019) A Novel Mechanism for the Anticancer Activity of Aspirin and Salicylates. *Int. J. Oncol.* 54 (4), 1256–1270. DOI: 10.3892/ijo.2019.4701.
3. Janoš P., Spinello A., Magistrato A. (2021) All-atom Simulations to Studying Metallodrugs. *Target Interactions. Curr. Opin. Chem. Biol.* (61), 1–8. DOI: 10.1016/j.cbpa.2020.07.005.
4. Stathopoulou M.-E. K., Banti C. N., Kourkoumelis N., Hatzidimitriou A. G., Kalampounias A. G., Hadjikakou S. K. (2018) Silver Complex of Salicylic Acid and its Hydrogel-cream in Wound Healing Chemotherapy. *J Inorg. Biochem.* (181), 41–55. DOI: 10.1016/j.jinorgbio.2018.01.004.
5. Banti C. N., Papatriantafyllopoulou C., Tasiopoulos A. J., Hadjikakou S. K. (2018) New Metallo-therapeutics of NSAIDs Against Human Breast Cancer Cells. *Eur. J Med. Chem.* (143), 1687–1701. DOI: 10.1016/j.ejmech.2017.10.067.
6. Wu X.-W., Zheng Y., Wang F.-X., Cao J.-J., Zhang H., Zhang D.-Y., Tan C.-P., Ji L.-N., Mao Z.-W. (2019) Anticancer IrIII-aspirin Conjugates for Enhanced Metabolic Immunomodulation and Mitochondrial Lifetime Imaging. *Chem. Eur. J.* 25 (28), 7012–7022. DOI: 10.1002/chem.201900851.
7. Deng J., Gou Y., Chen W., Fu X., Deng H. (2016) The Cu/Ligand Stoichiometry Effect on the Coordination Behavior of Aroyl Hydrazone with Copper(II): Structure, Anticancer Activity and Anticancer Mechanism. *Bioorg. Med. Chem.* 24 (10), 2190–2198. DOI: 10.1016/j.bmc.2016.03.033.
8. Zare M., Namratha K. (2018) Surfactant Assisted Solvothermal Synthesis of ZnO Nanoparticles and Study of their Antimicrobial and Antioxidant Properties. *J Mater. Sci. Technol.* 34 (6), 1035–1043. DOI: 10.1016/j.jmst.2017.09.014.
9. Widiyastuti W., Wang W.-N. (2007) A Pulse Combustion Spray Pyrolysis Process for the Preparation of Nano and Submicrometer Sized Oxide Particles. *J. Am. Ceram. Soc.* 90 (12), 3779–3785. DOI: /10.1111/j.1551-2916.2007.02045.x.
10. Saloga P. E. J., Thünemann A. F. (2019) Microwave Assisted Synthesis of Ultrasmall Zinc Oxide Nanoparticles. *Langmuir* 35 (38), 12469–12482. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b01921.
11. Hinman J. J., Suslick K. S. (2017) Nanostructured Materials Synthesis Using Ultrasound. *Top Curr. Chem. (Z)* 375 (1), 59–94. DOI: 10.1007/s41061-016-0100-9.
12. Laurenti M., Lamberti A. (2019) Graphene Oxide Finely Tunes the Bioactivity and Drug Delivery of Mesoporous ZnO Scaffolds. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 11 (1), 449–456. DOI: 10.1021/acsami.8b20728.
13. Alipour N., Namazi H. (2020) Chelating ZnO-Dopamine on the Surface of Graphene Oxide and its Application as pH-Responsive and Antibacterial Nanohybrid Delivery Agent for Doxorubicin. *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.* (108), 110459. DOI: 10.1016/j.msec.2019.110459.
14. Volovšek V., Colombo L., Furić K. (1983) Vibrational Spectrum and Normal Coordinate Calculations of the Salicylic Acid Molecule. *J Raman Spectrosc.* 14 (5), 347–352. DOI: /10.1002/jrs.1250140511.

Вклад авторов

Калискаров В. Ю., Зелковский Е. А. принимали участие в формировании наночастиц и характеристизации их свойств под научным руководством Радюк Д. В.

Радюк Д. В. осуществила постановку задачи для проведения исследования, выполнила теоретическое моделирование полученных наночастиц и анализ их свойств, подготовила рукопись статьи.

Authors' contribution

Kaliskarov V. Y., Ziolkouski Y. A. took part in the synthesis of nanoparticles and characterization of their properties under supervision of Radziuk D. V.

Radziuk D. V. carried out the research task, performed theoretical modeling of synthesized nanoparticles and analysis of their properties, and prepared the manuscript of the article.

Сведения об авторах

Калискаров В. Ю., студент кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Зелковский Е. А., студент кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Радюк Д. В., к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник НИЛ «Интегрированные микро- и наносистемы» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-03
E-mail: radziuk@bsuir.by
Радюк Дарья Владимировна

Information about the authors

Kaliskarov V. Y., Diploma Student at the Department of Micro- and Nanoelectronics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Zialkouski Y. A., Student at the Department of Micro- and Nanoelectronics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Radziuk D. V., Cand. of Sci., Leading Scientist in the Research Laboratory “Integrated Micro- and Nanosystems” of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-03
E-mail: radziuk@bsuir.by
Radziuk Darya Vladimirovna