

УДК 535.3, 548.4

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НАНООБОЛОЧЕК СЕРЕБРА И ЗОЛОТА С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ КРЕМНЕЗЕМА В БИОТКАНЯХ

Л. А. ТРУСЕВИЧ¹⁾, М. М. КУГЕЙКО¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. С применением программного пакета *MiePlot* проведено моделирование спектральных свойств плазмонного резонанса в наноболочках серебра и золота с сердцевинной из кремнезема, используемых в биотканях (клетках кожи, надпочечников, молочной железы) в качестве контрастных агентов для проведения оптической визуализации (флуоресцентной микроскопии, спектроскопии с пространственным разрешением и т. д.) и терапии патологических очагов. Определено, что наиболее эффективное действие оказывают или наноболочки серебра толщиной 5 нм на резонансной длине волны от 845 до 855 нм, или наноболочки золота толщиной 10 нм на резонансной длине волны от 758 до 764 нм. Однако резонансные частоты наноболочек серебра толщиной 10 нм и наноболочек золота толщиной 5 нм, спектры которых расположены на краях окна прозрачности биотканей, также могут применяться в диагностических целях, что позволит решать задачи выбора размеров наноболочек, вводимых в организм человека, и выбора лазерных источников излучения для оптической визуализации. Показаны возможности настраиваемости свойств плазмонного резонанса в наноболочках серебра и золота путем изменения их размера, состава и среды. Полученные результаты могут быть применены для создания наноструктур, предназначенных для конкретных терапевтических целей, визуализации патологических очагов и их мониторинга при лечении. Установлено, что при нормальном распределении частиц величины сечений рассеяния света монодисперсными наноболочками и резонансные длины волн этих наноболочек незначительно отличаются от величин сечений рассеяния света полидисперсными частицами и резонансных длин волн таких наноболочек (на сотые доли для сечений рассеяния света и не более чем на 2 нм для длин волн). Сделан вывод о целесообразности

Образец цитирования:

Трусевиц ЛА, Кугейко ММ. Спектральные свойства наноболочек серебра и золота с сердцевинной из кремнезема в биотканях. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2025;3:4–13. EDN: XUCWLS

For citation:

Trusevich LA, Kugeiko MM. Spectral properties of silver and gold nanoshells with silica core in biotissues. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2025;3:4–13. Russian. EDN: XUCWLS

Авторы:

Любовь Анатольевна Трусевиц – старший преподаватель кафедры информатики и компьютерных систем факультета радиофизики и компьютерных технологий.
Михаил Михайлович Кугейко – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники факультета радиофизики и компьютерных технологий.

Authors:

Liubou A. Trusevich, senior lecturer at the department of informatics and computer systems, faculty of radiophysics and computer technologies.
tru.liuboua@yandex.by
Mikhail M. Kugeiko, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of quantum radiophysics and optoelectronics, faculty of radiophysics and computer technologies.
kugeiko@bsu.by

ности использования на практике полидисперсных наноболочек серебра и золота с сердцевинной из кремнезема, поскольку при этом упрощаются требования к точностным характеристикам размеров наноболочек.

Ключевые слова: наноболочки серебра и золота с сердцевинной из кремнезема; спектральные свойства; моно- и полидисперсные наноболочки; биоткани (клетки кожи, надпочечников, молочной железы); тераностика.

SPECTRAL PROPERTIES OF SILVER AND GOLD NANOSHELLS WITH SILICA CORE IN BIOTISSUES

L. A. TRUSEVICH^a, M. M. KUGEIKO^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: L. A. Trusevich (tru.liuboua@yandex.by)

Abstract. Using the *MiePlot* software package, the spectral properties of plasmon resonance in silver and gold nanoshells with silica core used in biotissues (cells of skin, adrenal glands, mammary glands) as contrast agents for optical visualisation (fluorescence microscopy, spatially resolved spectroscopy, etc.) and therapy of pathological foci were modelled. It was determined that the most effective action is provided either by silver nanoshells with thickness of 5 nm at resonance wavelength from 845 to 855 nm, or gold nanoshells with thickness of 10 nm at resonance wavelength from 758 to 764 nm. However, resonance frequencies of silver nanoshells with thickness of 10 nm and gold nanoshells with thickness of 5 nm, whose spectra are located at the edges of transparency window of biotissues, can also be used for diagnostic purposes, enabling the selection of nanoshell sizes introduced into the human body and the choice of laser radiation sources for optical visualisation. The possibilities of tunability of plasmon resonance properties in silver and gold nanoshells by altering their size, composition and environment are demonstrated. The obtained results can be applied to the creation of nanostructures designed for specific therapeutic purposes, visualisation of pathological foci and monitoring them during treatment. It has been established that, with a normal distribution of particles, the scattering cross-sections of light by monodisperse nanoshells and the resonance wavelengths of these nanoshells differ only slightly from the scattering cross-sections of light by polydisperse particles and the resonance wavelengths of such nanoshells (by hundredths for scattering cross-sections of light and by no more than 2 nm for wavelengths). It is concluded that the practical use of polydisperse silver and gold nanoshells with silica core is advisable due to the requirement reduction for the nanoshell size dispersion.

Keywords: silver and gold nanoshells with silica core; spectral properties of nanoshells; mono- and polydisperse nanoshells; biotissues (cells of skin, adrenal glands, mammary gland); theranostics.

Введение

Биомедицинская оптика является одной из наиболее быстро развивающихся областей науки и техники. Неразрушающая природа света, используемого для исследования и детектирования аномалий в тканях человека, делает ее весьма привлекательной для разработки новых неинвазивных диагностических и терапевтических методов. Следует выделить такое направление биомедицинской оптики, как тераностика. Она включает диагностику заболевания и персонализированное лечение пациента с улучшенной эффективностью и безопасностью.

В последнее время приобрело актуальность использование наночастиц для адресной доставки лекарств¹ [1; 2], позволяющее увеличить терапевтическое воздействие на пораженные ткани. Наночастицы благородных металлов обладают рядом уникальных оптических и фототермических свойств и могут применяться для диагностики биообъектов. Эффективность использования этих наночастиц обусловлена поверхностным плазмонным резонансом – резонансными колебаниями их свободных электронов при воздействии света. В результате плазмонного резонанса может произойти быстрое преобразование света в тепло (поглощение) либо его излучение (рассеяние – процесс, находящий широкое применение в областях оптики и визуализации)² [1; 2]. Настраиваемость свойств возникающего в металлических наночастицах плазмонного резонанса, которая обусловлена возможностью изменения размера, формы, состава и среды этих частиц, позволяет создавать наноструктуры, предназначенные для конкретных целей в области биологии. Например, учет преимуществ усиления рассеяния света наночастицами серебра и золота, связанными с молекулами-мишенями, дает возможность проводить визуализацию и диагностику рака надпочечников, кожи или молочной железы [2].

Следует отметить, что существует разрыв между теоретическими достижениями в области названных выше свойств наночастиц и результатами их применения на практике. Данное обстоятельство требует как проведения научных исследований, так и разработки технических средств тераностики.

¹Будкевич Е. В., Будкевич Р. О. Биомедицинские нанотехнологии : учеб. пособие для вузов. СПб. : Лань, 2022. 176 с.

²Там же.

В работе [3] исследованы спектральные свойства плазмонного резонанса в моно- и полидисперсных частицах серебра и золота в биообъектах (клетках кожи, надпочечников, молочной железы). Данные частицы использовались в качестве контрастных агентов для проведения оптической визуализации (флуоресцентной микроскопии, спектроскопии с пространственным разрешением и т. д.) и терапии патологических очагов. Авторы показали, что для моно- и полидисперсных наночастиц серебра и золота (при нормальном распределении) максимальные сечения поглощения и рассеяния света в крови достигаются для близких значений длин волн и одинаковых радиусов (средних радиусов для полидисперсных наночастиц). Так, максимальные значения коэффициентов поглощения и рассеяния света для наночастиц с радиусами в диапазоне от 5 до 50 нм в случае с наночастицами серебра достигаются на длине волны около 490 нм, а в случае с наночастицами золота – на длине волны около 583 нм.

Не менее важным объектом исследования в тераностике являются нанооболочки – сферические частицы с диэлектрической сердцевиной и слоем металлической оболочки. Они представляют большой интерес для оптической визуализации биообъектов, биосенсорики, лазерной фототермической терапии [5] и диагностики рака [2]. Так, путем регулирования размеров внутреннего и внешнего слоев нанооболочки ее плазмонный резонанс может быть настроен на любую необходимую длину волны в области видимого и инфракрасного спектров поглощения [4]. Существующие протоколы синтеза серебряных и золотых нанооболочек с ядром из оксида кремния [6] позволяют получать частицы диаметром десятки и сотни нанометров со сравнительно узким распределением по размерам.

Цель настоящей работы – рассмотрение настраиваемости свойств плазмонного резонанса в нанооболочках серебра и золота с сердцевиной из кремнезема путем изменения их размера, состава и среды. Полученные результаты могут быть применены для создания наноструктур, предназначенных для конкретных терапевтических целей, визуализации патологических очагов и их мониторинга при лечении.

Теоретическая основа и методы исследования

Существует активный и пассивный транспорт наночастиц в биосистему. В случае активного транспорта наночастицы попадают в нужную клетку после нанесения на их поверхность специальной молекулы, которая связывается с определенной молекулой-ответчиком на поверхности нездоровой клетки. Для пассивного транспорта важными аспектами являются размер наночастиц и наличие в них эффекта повышенной проницаемости и удержания. Для решения задач тераностики значимость имеет эффективность используемых длин волн: для задач терапии более эффективны длины волн, вызывающие поглощение излучения (повышение температуры облучаемого объекта), а для задач диагностики – длины волн, приводящие к рассеянию излучения. Вместе с тем должна решаться задача доставки излучения.

На рис. 1 представлено окно прозрачности биотканей, отражающее эффективность использования длин волн светового излучения в установленном диапазоне³. Преимущественный вклад в поглощение светового излучения в биотканях вносит кровь. Гемоглобин, содержащийся в красных кровяных тельцах, обладает поглощающей способностью на длинах волн менее 600 нм. В связи с этим ниже рассматриваются длины волн более 600 нм, при этом оптимальное соотношение между разрешением изображения и глубиной проникновения света для визуализации *in vivo* сохраняется в диапазоне длин волн от 700 до 900 нм.

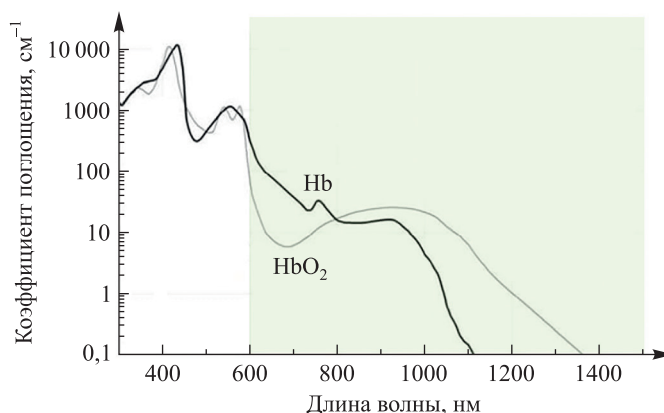


Рис. 1. Окно прозрачности биотканей, показывающее диапазон длин волн максимального проникновения света в кровь человека (область зеленого цвета)

Fig. 1. Transparency window of biotissues showing the wavelength range of maximum light penetration into human blood (green area)

³Пушкарёва А. Е. Методы математического моделирования в оптике биоткани : учеб. пособие. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2008. 103 с.

Эффект повышенной проницаемости и удержания наночастиц обуславливается эндотелием сосудов. Эндотелий сосудов, которые снабжают опухоль, отличен от эндотелия сосудов, которые снабжают здоровую ткань. Размер пор в первом случае составляет от 100 до 800 нм, а во втором случае – от 3 до 10 нм. Необходимо отметить, что поры в эндотелии сосудов почек имеют размер 50 нм, а в эндотелии сосудов печени – 150 нм [7; 8]. Наночастицы, размер которых больше, чем размер пор в эндотелии сосудов, снабжающих здоровую ткань, при введении вдалеке от очага опухоли скапливаются рядом с нездоровой тканью за счет циркуляции.

На рис. 2 представлена зависимость сечений экстинкции, поглощения и рассеяния света золотой сферической частицей от ее размера при длине волны облучения 532 нм. Видно, что сечение экстинкции оптического излучения сферической частицей, обладающей плазмонным резонансом, имеет максимальные значения не более 50 нм. Данный диапазон размеров наноболочек рассматривался при моделировании спектральных свойств наноболочек серебра и золота.

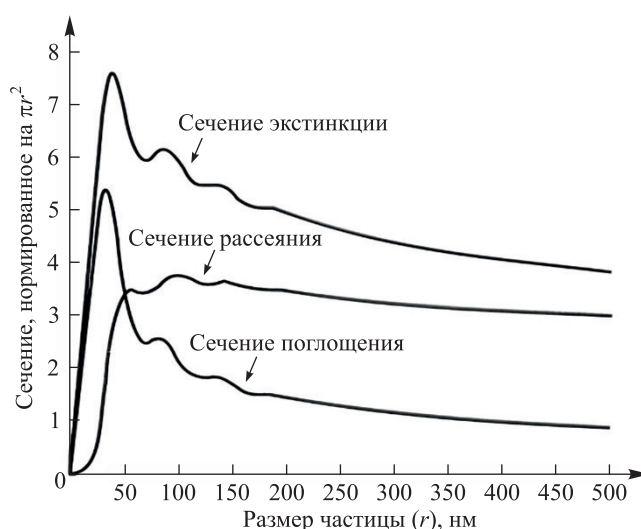


Рис. 2. Зависимость сечений экстинкции, поглощения и рассеяния света золотой сферической частицей от ее размера при длине волны 532 нм (моделирование в воде).
Источник: [9, с. 125]

Fig. 2. Dependence of the extinction, absorption and scattering cross sections of light by a gold spherical particle on its size at a wavelength of 532 nm (modelling in water).
Source: [9, p. 125]

Исследование возможностей настраиваемости свойств плазмонного резонанса в моно- и полидисперсных наноболочках серебра и золота проведено путем сравнения их спектральных свойств⁴. Моделирование выполнялось согласно теории Ми с применением программного пакета *MiePlot*. В ходе моделирования использовался режим, позволяющий создать двухслойный шар с диэлектрическим ядром. Для анализа данных, полученных в результате моделирования, и визуализации зависимостей написаны скрипты на языке программирования Python.

С опорой на упомянутые выше сведения о диаметре пор в эндотелии сосудов, которые снабжают здоровую и пораженную ткань, а также о зависимости сечения экстинкции оптического излучения от размера частицы размер наноболочек благородных металлов исследовался в диапазоне от 5 до 50 нм. Показатель преломления биологической среды, представленный в таблице, определялся из работ [5; 10].

Показатель преломления различных раковых клеток
Refractive index of different cancer cells

Тип рака	Показатель преломления
Рак кожи	1,380
Рак надпочечников	1,395
Рак молочной железы	1,401

⁴Laven Ph. Mie scattering and the Debye series // Philip Laven : website. URL: <http://www.philiplaven.com/index1.html> (date of access: 10.04.2021).

Таким образом, были созданы компьютерные модели объектов, состоящие из кремнеземной сердцевины (радиус изменялся от 5 до 50 нм с шагом 5 нм) и серебряной и золотой оболочек (толщина составляла 5 и 10 нм).

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим сечения рассеяния света (C_{sca}) моно- и полидисперсными наноболочками серебра и золота при нормальном распределении ($p = 0,05$).

На рис. 3–5 представлены спектры рассеяния света наноболочками серебра в средах с показателями преломления 1,380; 1,395 и 1,401 соответственно. Во всех случаях при толщине наноболочки 5 нм сечение рассеяния света оказалось больше, чем при толщине наноболочки 10 нм. Как видно из рис. 3, в среде с показателем преломления 1,380 его величина составила $14,65 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ на длине волны 847 нм (монодисперсные наноболочки) и $14,29 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ на длине волны 845 нм (полидисперсные наноболочки). На рис. 4 отражено, что в среде с показателем преломления 1,395 сечение рассеяния света имело значение $14,62 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ на длине волны 852 нм (монодисперсные наноболочки) и значение $14,27 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ на длине волны 852 нм (полидисперсные наноболочки). Согласно данным рис. 5 в среде с показателем преломления 1,401 оно было равно $14,61 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ на длине волны 855 нм (монодисперсные наноболочки) и $14,26 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ на длине волны 854 нм (полидисперсные наноболочки). Таким образом, во всех случаях сечения рассеяния света моно- и полидисперсными частицами имеют близкие значения. Отметим, что при увеличении показателя преломления внешней среды и уменьшении толщины наноболочки происходило смещение максимума сечения рассеяния света в длинноволновую область.

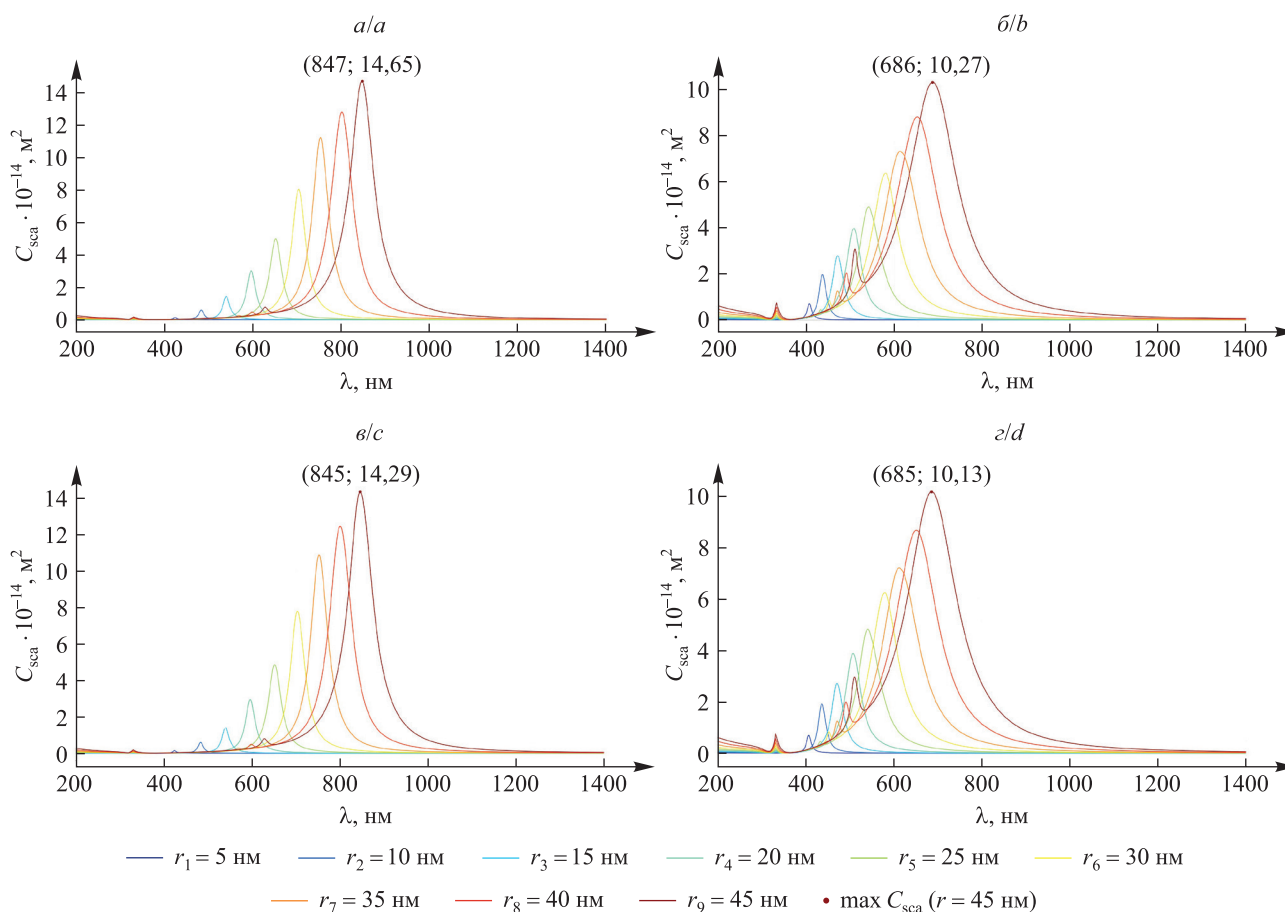


Рис. 3. Спектры рассеяния света наноболочками серебра толщиной 5 и 10 нм в среде с показателем преломления 1,380:

a, б – монодисперсные наноболочки; *в, г* – полидисперсные наноболочки

Fig. 3. Light scattering spectra of silver nanoshells with thicknesses of 5 and 10 nm in a medium with a refractive index of 1.380:

a, b – monodisperse nanoshells; *c, d* – polydisperse nanoshells

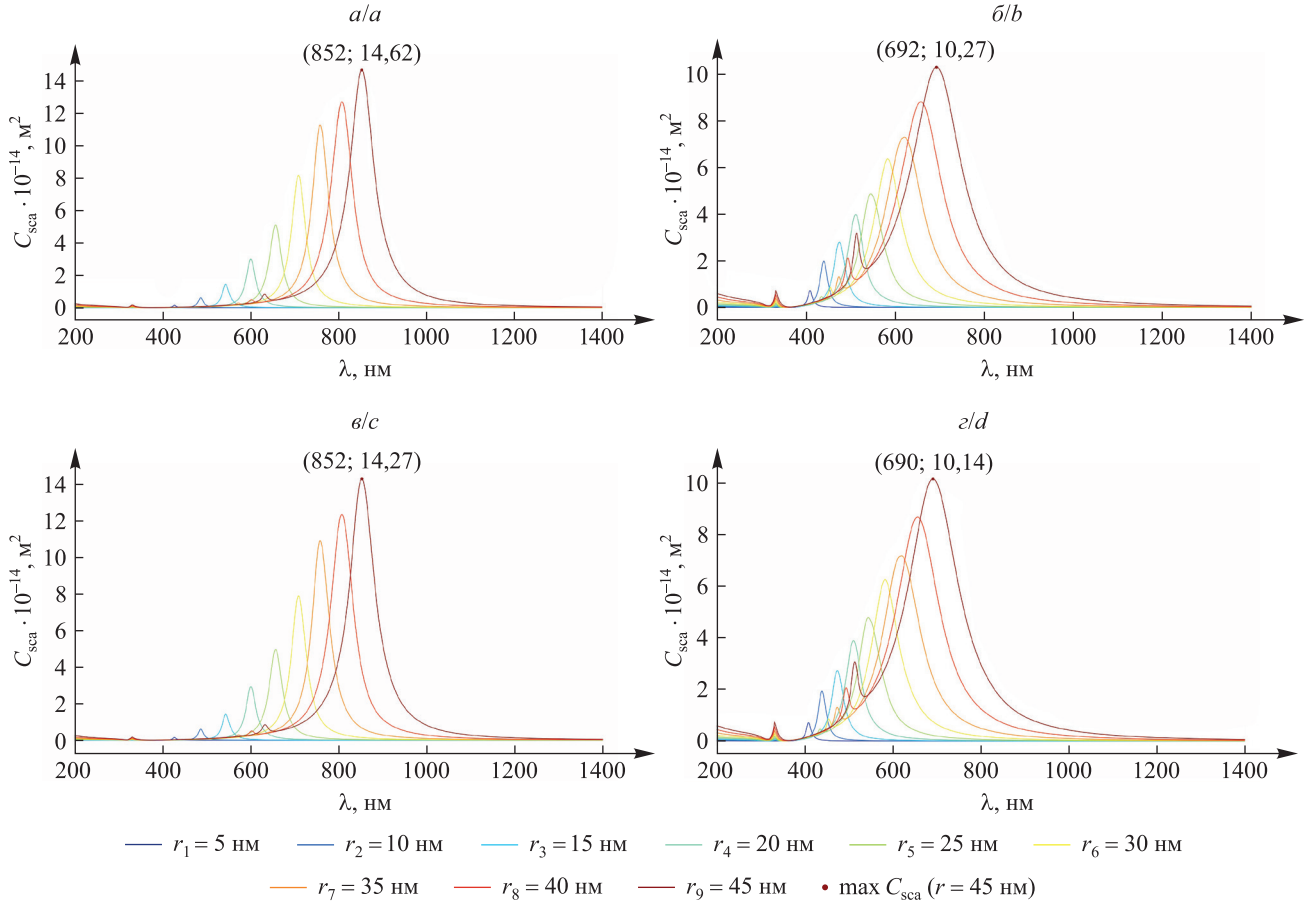


Рис. 4. Спектры рассеяния света нанооболочками серебра толщиной 5 и 10 нм в среде с показателем преломления 1,395:
а, б – монодисперсные нанооболочки; в, г – полидисперсные нанооболочки
Fig. 4. Light scattering spectra of silver nanoshells with thicknesses of 5 and 10 nm in a medium with a refractive index of 1.395:
а, б – monodisperse nanoshells; в, г – polydisperse nanoshells

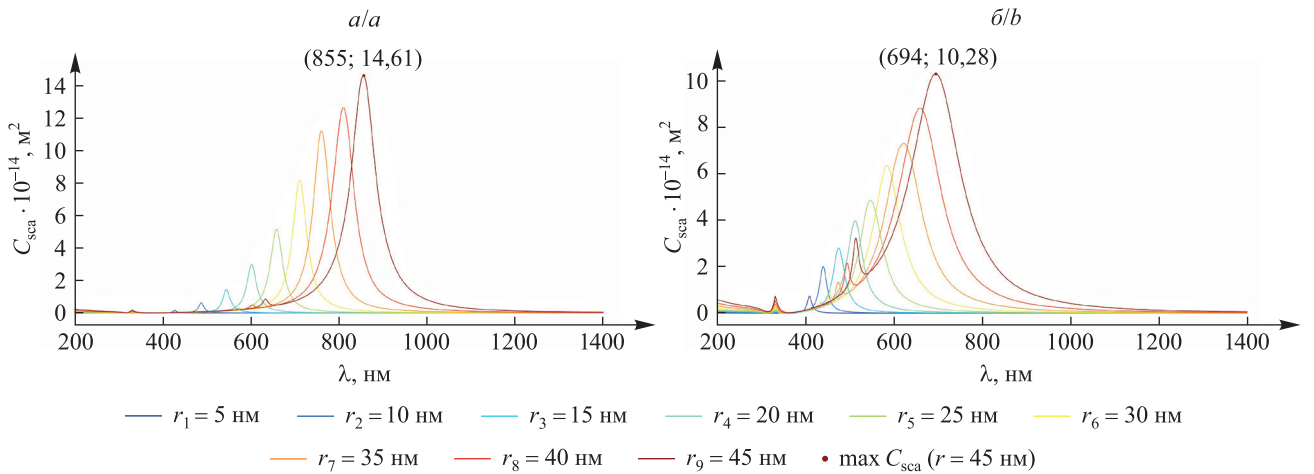


Рис. 5. Спектры рассеяния света нанооболочками серебра толщиной 5 и 10 нм в среде с показателем преломления 1,401 (начало):
а, б – монодисперсные нанооболочки
Fig. 5. Light scattering spectra of silver nanoshells with thicknesses of 5 and 10 nm in a medium with a refractive index of 1.401 (beginning):
а, б – monodisperse nanoshells

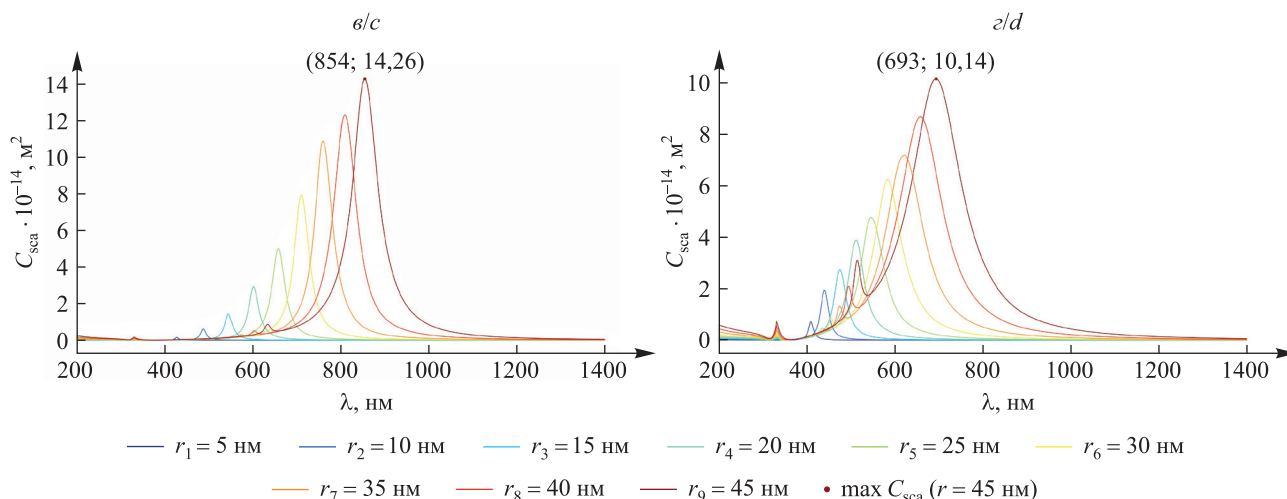


Рис. 5. Спектры рассеяния света наноболочками серебра толщиной 5 и 10 нм в среде с показателем преломления 1,401 (окончание):
в, з – полидисперсные наноболочки

Fig. 5. Light scattering spectra of silver nanoshells with thicknesses of 5 and 10 nm in a medium with a refractive index of 1.401 (ending):
с, d – polydisperse nanoshells

Спектры рассеяния света наноболочками золота в средах с показателями преломления 1,380; 1,395 и 1,401 отражены на рис. 6–8 соответственно. Во всех случаях максимум сечения рассеяния света достигался на близких длинах волн как в среде с нормальным распределением частиц по размерам, так и в среде с частицами одинакового размера. Для наноболочек, имеющих толщину 5 нм и радиус сердцевин 45 нм, максимум сечения рассеяния света находился в интервале от $6,42 \cdot 10^{-14}$ до $6,48 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ на длинах волн в диапазоне от 926 до 917 нм (моно- и полидисперсные наноболочки). В случае с наноболочками, имеющими толщину 10 нм и радиус сердцевин 45 нм, максимум сечения рассеяния света находился в интервале от $8,19 \cdot 10^{-14}$ до $8,29 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ на длинах волн в диапазоне от 764 до 758 нм (моно- и полидисперсные наноболочки). Обозначим, что при одинаковом показателе преломления и уменьшении толщины наноболочки происходило смещение максимума рассеяния света в длинноволновую область спектра.

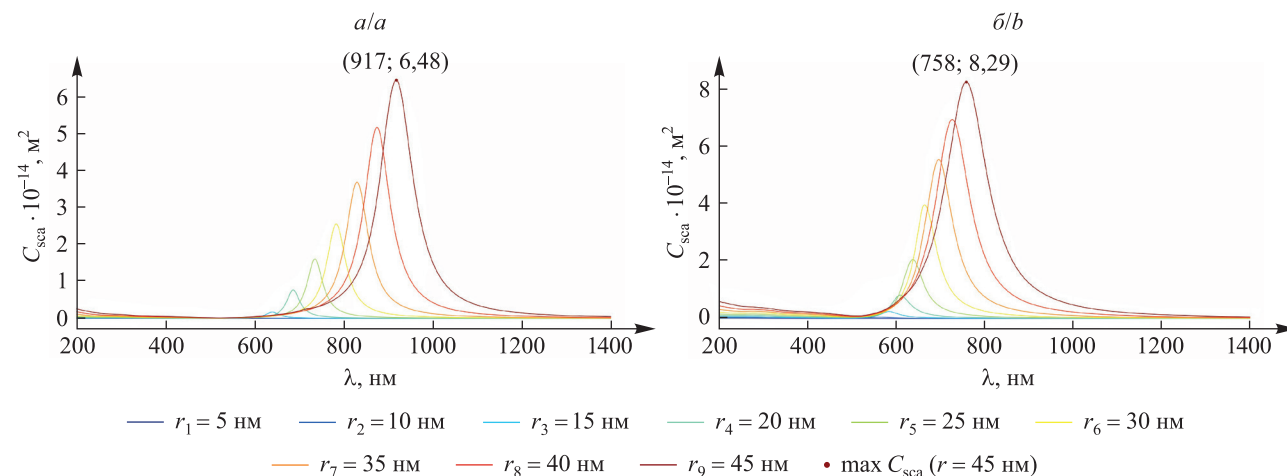


Рис. 6. Спектры рассеяния света наноболочками золота толщиной 5 и 10 нм в среде с показателем преломления 1,380 (начало):
а, б – монодисперсные наноболочки

Fig. 6. Light scattering spectra of gold nanoshells with thicknesses of 5 and 10 nm in a medium with a refractive index of 1.380 (beginning):
а, б – monodisperse nanoshells

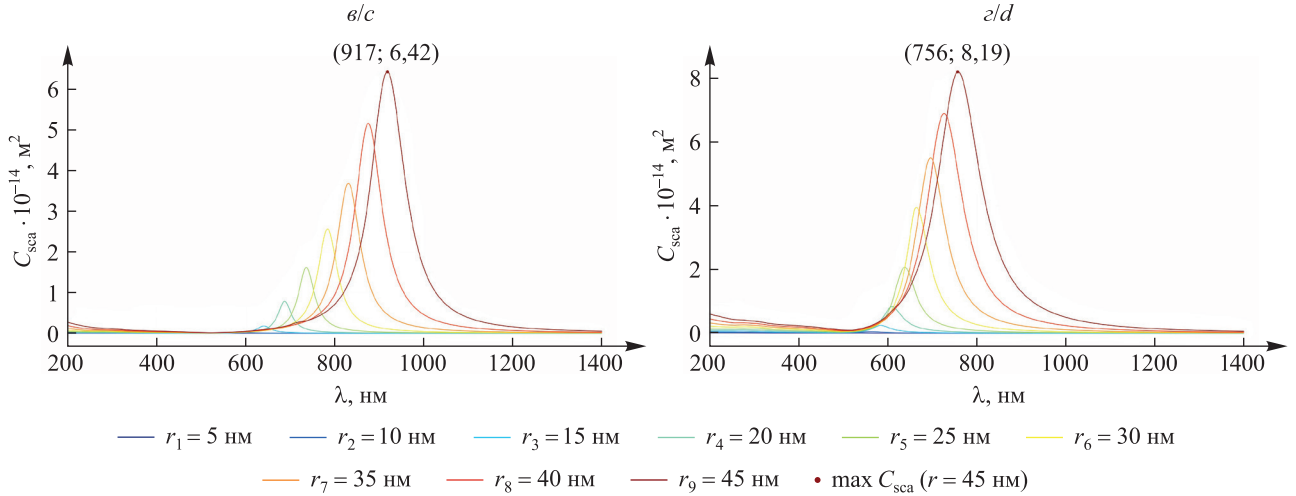


Рис. 6. Спектры рассеяния света наноболочками золота толщиной 5 и 10 нм в среде с показателем преломления 1,380 (окончание):
в, з – полидисперсные наноболочки

Fig. 6. Light scattering spectra of gold nanoshells with thicknesses of 5 and 10 nm in a medium with a refractive index of 1.380 (ending):
c, d – polydisperse nanoshells

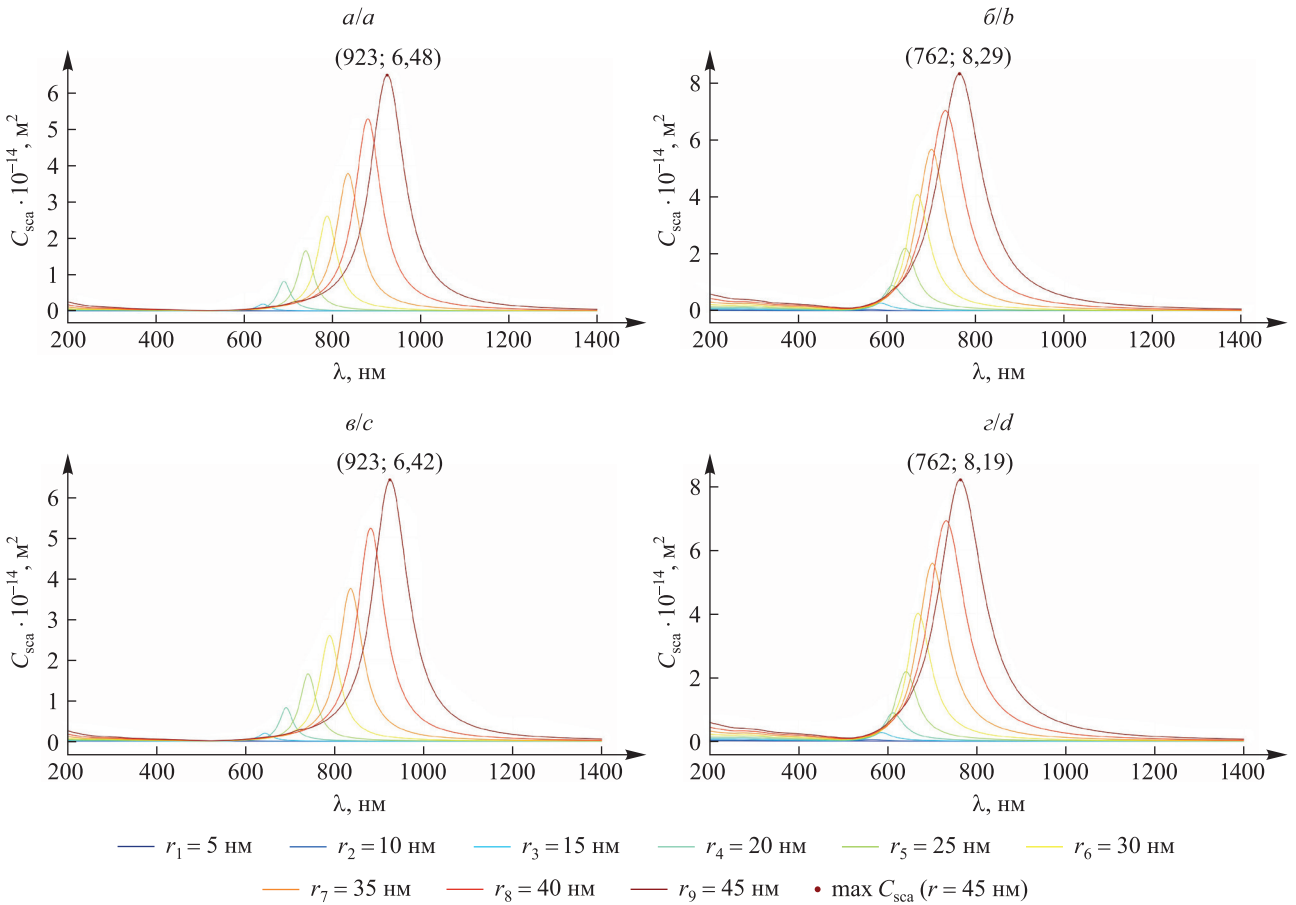


Рис. 7. Спектры рассеяния света наноболочками золота толщиной 5 и 10 нм в среде с показателем преломления 1,395:
а, б – монодисперсные наноболочки; в, з – полидисперсные наноболочки

Fig. 7. Light scattering spectra of gold nanoshells with thicknesses of 5 and 10 nm in a medium with a refractive index of 1.395:
a, b – monodisperse nanoshells; c, d – polydisperse nanoshells

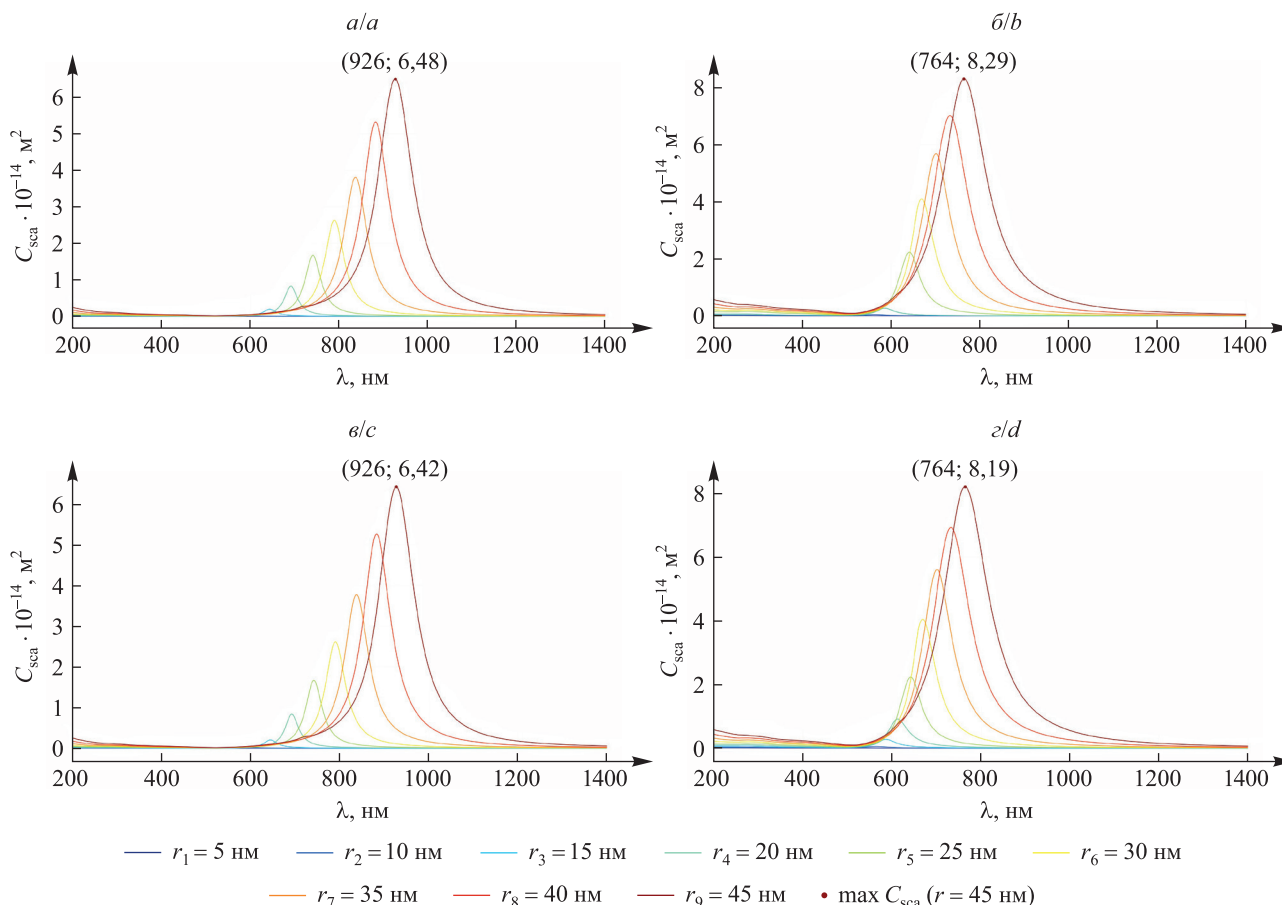


Рис. 8. Спектры рассеяния света наноболочками золота толщиной 5 и 10 нм в среде с показателем преломления 1,401:

a, б – монодисперсные наноболочки; *в, г* – полидисперсные наноболочки

Fig. 8. Light scattering spectra of gold nanoshells with thicknesses of 5 and 10 nm in a medium with a refractive index of 1.401:

a, б – monodisperse nanoshells; *в, г* – polydisperse nanoshells

Как видно из рис. 3–8, при уменьшении размера моно- и полидисперсных наноболочек серебра и золота максимум сечения поглощения света смещался в более коротковолновую область. Наибольшее значение он имел в случае с наноболочками радиусом более 35 нм. Значение максимума сечения рассеяния света моно- и полидисперсными наноболочками серебра в средах со всеми исследуемыми показателями преломления оказывалось больше, если толщина наноболочек составляла 5 нм, и меньше, если толщина наноболочек была равна 10 нм (различие в значениях максимума сечений поглощения света составило около 40 %). В случае с моно- и полидисперсными наноболочками золота наблюдалась противоположная ситуация (различие в значениях максимума сечений поглощения света составило около 30 %).

Следует отметить, что при нормальном распределении частиц величины сечений рассеяния света монодисперсными наноболочками и их резонансные длины волн незначительно отличаются от величин сечений рассеяния света полидисперсными частицами и их резонансных длин волн (на сотые доли для сечений рассеяния света и не более чем на 2 нм для длин волн), поэтому для облегчения моделирования и уменьшения времени на его проведение можно рассматривать среду с частицами одинакового размера. Также можно сделать вывод о целесообразности использования на практике полидисперсных наноболочек серебра и золота с сердцевинкой из кремнезема, поскольку при этом упрощаются требования к точностным характеристикам размеров наноболочек.

Для решения задачи максимального проникновения света в кровь человека (см. рис. 1) необходимо использовать наноболочки серебра толщиной 5 нм на резонансных длинах волн в интервале от 845 до 855 нм или наноболочки золота толщиной 10 нм на резонансных длинах волн в диапазоне от 758 до 764 нм в средах с показателями преломления 1,380; 1,395 и 1,401. Вместе с тем наноболочки серебра и золота размерами от 35 до 45 нм имеют максимальные значения коэффициентов рассеяния в отмеченных интервалах длин

волн (около $8 \cdot 10^{-14}$ и $14 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ соответственно). Следовательно, они могут быть наиболее эффективно использованы в качестве контрастных агентов для диагностики в ближнем инфракрасном диапазоне. Резонансные частоты наноболочек серебра толщиной 5 нм и наноболочек золота толщиной 10 нм, спектры которых расположены на краях окна прозрачности биотканей, также могут применяться в диагностических целях, что позволит решать задачи выбора размеров наноболочек, вводимых в организм человека, и выбора лазерных источников излучения для оптической визуализации.

Сравним спектральные свойства наноболочек серебра и золота со спектральными свойствами обычных коллоидных частиц серебра и золота размерами от 5 до 50 нм. Значения максимума сечения рассеяния оптического излучения моно- и полидисперсными наночастицами серебра, распределенными по нормальному закону, являются практически одинаковыми (около $5,42 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$) и достигаются на длинах волн 490 и 488 нм соответственно. В случае с моно- и полидисперсными наночастицами золота значения максимума сечений рассеяния света (около $3,88 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$) достигаются на длине волны 582 нм. Исходя из информации, расположенной выше, можно заключить, что резонансное рассеяние света наноболочками серебра и золота, имеющими сердцевину из кремнезема радиусом от 5 до 45 нм и толщину 5 и 10 нм, более чем в 2 раза превышает резонансное рассеяние света обычными коллоидными частицами серебра и золота размерами от 5 до 50 нм [3]. Спектры резонансного рассеяния коллоидных частиц серебра и золота лежат вне области окна прозрачности светового излучения в биотканях. Следовательно, использование их в качестве контрастных элементов для диагностического применения в медицине менее эффективно, чем использование наноболочек серебра и золота. Однако коллоидные частицы серебра и золота эффективны в терапевтических целях ввиду возможности более быстрого преобразования воздействующего излучения на этих длинах волн в тепло.

Заключение

Проведено исследование спектральных свойств плазмонного резонанса в моно- и полидисперсных наноболочках серебра и золота с сердцевинной из кремнезема, используемых в биотканях (клетках кожи, надпочечников, молочной железы) в качестве контрастных агентов для проведения оптической визуализации (флуоресцентной микроскопии, спектроскопии с пространственным разрешением и т. д.) и терапии патологических очагов. Показаны возможности настраиваемости свойств плазмонного резонанса в рассматриваемых наноболочках серебра и золота путем изменения их размера, состава и среды. Полученные результаты могут быть применены для создания наноструктур, предназначенных для конкретных терапевтических целей и визуализации патологических очагов.

Библиографические ссылки

1. Li Z, Tan S, Li S, Shen Q, Wang K. Cancer drug delivery in the nanoera: an overview and perspectives (review). *Oncology Reports*. 2017;38(2):611–624. DOI: 10.3892/or.2017.5718.
2. Jain PK, Huang X, el-Sayed IH, el-Sayed MA. Noble metals on the nanoscale: optical and photothermal properties and some applications in imaging, sensing, biology, and medicine. *Accounts of Chemical Research*. 2008;41(12):1578–1586. DOI: 10.1021/ar7002804.
3. Трусевич ЛА, Кугейко ММ. Моделирование оптических свойств наночастиц Ag, Au. В: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. *Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии. Сборник научных статей XIV Международной научно-технической конференции «Медэлектроника-2024»; 5–6 декабря 2024 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; 2024. с. 103–107.
4. Lal S, Clare SE, Halas NJ. Nanoshell-enabled photothermal cancer therapy: impending clinical impact. *Accounts of Chemical Research*. 2008;41(12):1842–1851. DOI: 10.1021/ar800150g.
5. Egerev SV, Simanovsky YaO. Optoacoustics of inhomogeneous biomedical media: competition of mechanisms and prospects for application (a review). *Acoustical Physics*. 2022;68:83–100. DOI: 10.1134/S106377102201002X.
6. Shahidian A, Ghassemi M, Mohammadi J, Hashemi M. *Bio-engineering approaches to cancer diagnosis and treatment*. New York: Academic Press; 2020. 282 p.
7. Васина ЛВ, Власов ТД, Петрищев НН. Функциональная гетерогенность эндотелия (обзор). *Артериальная гипертензия*. 2017;23(2):88–102. DOI: 10.18705/1607-419X-2017-23-2-88-102.
8. Стрельникова ЕА, Трушкина ПЮ, Суров ИЮ, Короткова НВ, Мжаванадзе НД, Деев РВ. Эндотелий *in vivo* и *in vitro*. Часть 1. Гистогенез, структура, цитофизиология и ключевые маркеры. *Наука молодых (Eruditio Juvenium)*. 2019;7(3):450–465. DOI: 10.23888/HMJ201973450-46.
9. Климов ВВ. *Наноплазмоника*. Москва: Физматлит; 2009. 480 с.
10. Dintenfass L. *Rheology of blood in diagnostic and preventive medicine*. Boston: Butterworths; 1976. 396 p.

Получена 18.02.2025 / исправлена 12.03.2025 / принята 12.03.2025.
Received 18.02.2025 / revised 12.03.2025 / accepted 12.03.2025.