

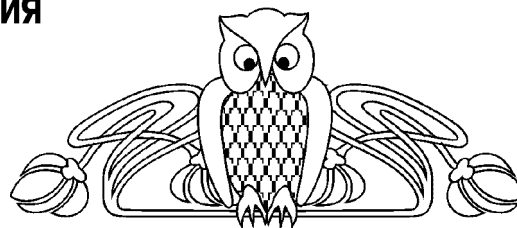


УДК 535-92, 535.015

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАТНОГО ДИФFUЗНОГО СВЕТОРАССЕЯНИЯ ТЕСТОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Е. М. Ревзина, **И. Л. Максимова**, А. А. Скапцов

Саратовский государственный университет
E-mail: lesya16@bk.ru



В работе проведено сопоставление результатов измерения спектральных характеристик светорассеяния на тестовых объектах с помощью различных типов спектральных приборов. Рассмотрены спектры обратного диффузного рассеяния, полученные с помощью интегрирующей сферы и с помощью освещающего и приемного оптических волокон, расположенных на близком расстоянии. Выявлены особенности спектральных характеристик, определяемые параметрами объекта, и различия, обусловленные методом регистрации спектра.

Ключевые слова: обратное диффузное рассеяние, спектральные характеристики.

Comparative Experimental Investigations of Backward Diffuse Light Scattering of Test Objects

Е. М. Revzina, **I. L. Maksimova**, A. A. Skaptsov

The results of measurements of the spectral characteristics of the light scattering on test objects with different types of spectroscopic instruments were compared, backward diffuse scattering spectra, which were obtained with an integrating sphere and with the help of the illuminating and receiving optical fibers located at a short distance, were considered, the features of the spectral characteristics, which were determined by the parameters of the object, and the differences, which were caused by a method of recording of the spectrum, were identified in the scientific work.

Key words: backward diffuse light scattering, spectral characteristics.

Волоконно-оптические спектрометры – весьма специфические приборы. Регистрируемый спектр определяется не только оптическими характеристиками исследуемого объекта, но и параметрами самого спектрометра – апертурным углом освещающего волокна (или волокон), апертурным углом приемных волокон, расстоянием от торца волокна до поверхности биоткани, спектром базового объекта, на который нормируем, углом наклона оси волокна относительно нормали к поверхности, расстоянием между освещающими и приемными волокнами и т.п. [1, 2]. Поэтому при сопоставлении результатов, полученных на различных волоконно-оптических приборах, возможны расхождения, обусловленные особенностями этих приборов.

В работе проведено сопоставление спектров диффузного отражения цветных мелкопористых объектов, измеренных с помощью волоконно-оптического спектроанализатора ЛЭСА-01-БИОСПЕК (лазерная электронно-спектральная установка), волоконно-оптического спектроанализатора Ocean Optics USB 4000 и спектрофотометра Perkin Elmer Lambda 950 (двухлучевой сканирующий спектрофотометр с двойным монохроматором). Для исследования были выбраны мелкопористые объекты одинаковой структуры с выраженными различиями цветовых характеристик. Визуально тестовые объекты были желтого (образец № 1), зеленого (образец № 2), красного (образец № 3) и синего (образец № 4) цветов, результаты измерений для каждого образца, полученные на различных спектральных приборах, соответствующим образом отнормированы и представлены в одной координатной системе для удобства сопоставления (рис. 1).

Качественно результаты, полученные с помощью различных спектрометров, похожи, но имеются количественные различия, которые могут быть обусловлены различиями в геометрии эксперимента.

Был проведен сравнительный анализ спектральных характеристик тестовых объектов, полученных на стандартном спектрометре и на волоконно-оптическом.

Информация, получаемая с помощью волоконно-оптических спектрометров, аналогична информации, получаемой при измерении обратного светорассеяния на стандартных спектральных приборах с помощью интегрирующей сферы. Однако имеются количественные различия, степень выраженности которых зависит главным образом от фактора анизотропии рассеяния и преобладающей кратности рассеяния в исследуемой среде. Для количественной оценки этих эффектов для ряда модельных объектов в работе проведены измерения спектров диффузного рассеяния с помощью волоконно-

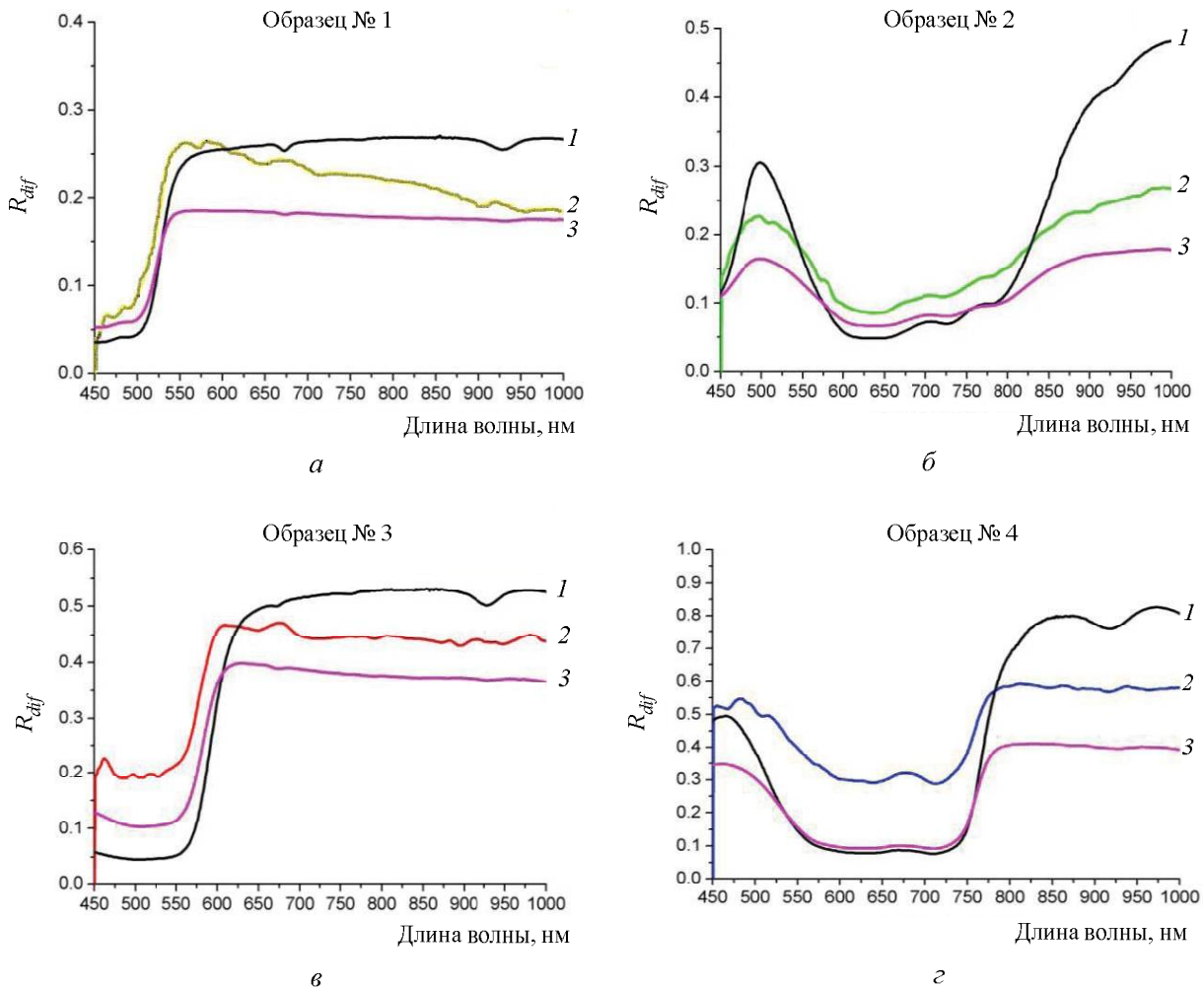


Рис. 1. Спектры диффузного отражения: 1 – измерение на Perkin Elmer Lambda 950; 2 – на ЛЭСА-01-БИОСПЕК; 3 – на Ocean Optics USB 4000

оптического спектроанализатора ЛЭСА-01-БИОСПЕК и спектрофотометра Perkin Elmer Lambda 950 с интегрирующей сферой. Измерения спектров обратного диффузного отражения проведены для следующих фантомов с термофотосенсибилизаторами: растворы термофотосенсибилизаторов наносились на поверхность непоглощающей рассеивающей мелкопористой фильтровальной бумаги с помощью микропипетки в объеме 0.1 мл, препарат выдерживался для равномерного распределения поглощающих частиц в рассеивающем слое в течение 30 минут. Затем данный лист с поглотителями помещается сверху на систему из 20 листов фильтровальной бумаги без поглощающих частиц. Пропускание такой системы практически равно нулю и ее можно рассматривать как полубесконечную. В качестве селективных поглотителей использованы растворы фотосенса и плазмонно-резонансных

наночастиц. Фотосенс (Photosense) – фотосенсибилизатор второго поколения. Препарат разработан в Московском научно-производственном объединении «НИОПИК» под руководством профессора Г. Н. Ворожцова. Фотосенс представляет собой раствор смеси натриевых солей сульфированного фталоцианина алюминия от ди- до тетразамещенного в дистиллированной воде. Раствор прозрачный, интенсивного синевирюзового цвета, без запаха.

Фотосенс обладает интенсивной полосой поглощения в красной области спектра с максимумом в водном растворе при 675 нм. Вторая (значительно менее интенсивная) полоса поглощения расположена при 350 нм. На рис. 2 представлены экспериментальные спектры обратного рассеяния многослойного фантома, верхний слой которого содержит раствор фотосенса. Регистрируемый волоконно-оптическими



спектрометрами сигнал формируется фотонами, многократно рассеянными в слоях фильтровальной бумаги, из которой составлен фантом. Спектры рассеяния используемой бумаги характеризуются равномерным распределением интенсивности в видимой и ближней ИК-области. В той спектральной области, где наблюдается силь-

ное поглощение фотосенса, в регистрируемом гладком спектре обратного рассеяния фантома наблюдаются провалы. Из представленных на рис. 2, *а* и 2, *б* спектров четко виден провал на кривой обратного светорассеяния, соответствующий красной полосе поглощения фотосенса при 675 нм.

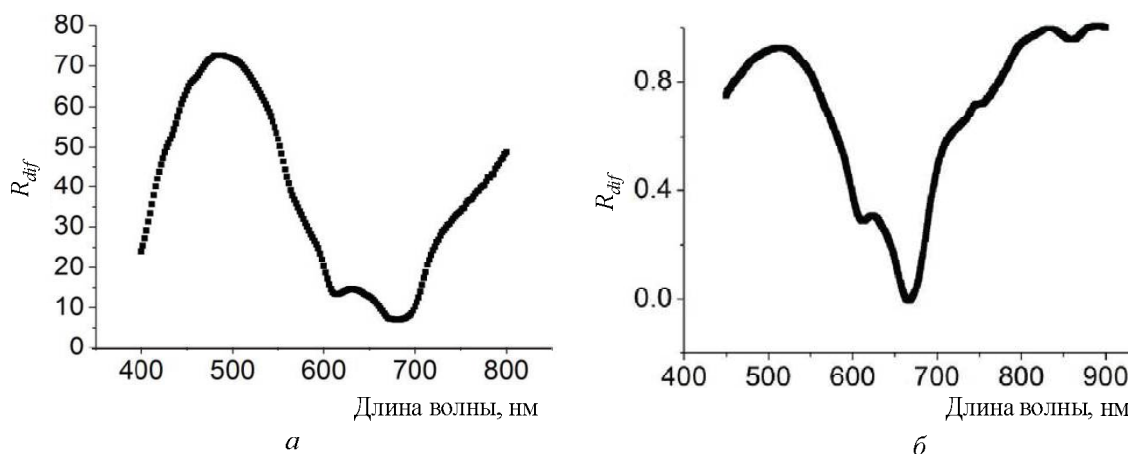


Рис. 2. Спектры отражения многослойного фантома с фотосенсом: *а* – измерение на Perkin Elmer Lambda 950; *б* – на ЛЭСА-01-БИОСПЕК

Полоса поглощения фотосенса при 350 нм совпадает с областью спада на спектральной кривой обратного светорассеяния фильтровальной бумаги, образующей фантом, поэтому в данной спектральной области сложно разделить влияние на спектральную кривую вкладов рассеивающей среды и самого фотосенса.

В работе использовались также золотые плазмонно-резонансные наночастицы, синтезированные в лаборатории наноразмерных структур ИБФРМ РАН. Золотые наноболочки с кремниевым ядром с внешним диаметром около 100 нм

и толщиной золотой оболочки около 4–8 нм демонстрируют относительно небольшое рассеяние и довольно сильное поглощение вблизи 800 нм [3–7]. А золотые наностержни с длиной главной оси 70 нм и форм-фактором от 2 до 4 обладают сильным поглощением вблизи 700 нм. Также в работе использовались сплошные золотые наночастицы диаметром 5 нм, которые имеют максимум сечений поглощения и рассеяния в области 530 нм. Результаты измерений спектров диффузного рассеяния фантомов с золотыми наночастицами представлены на рис. 3, 4.

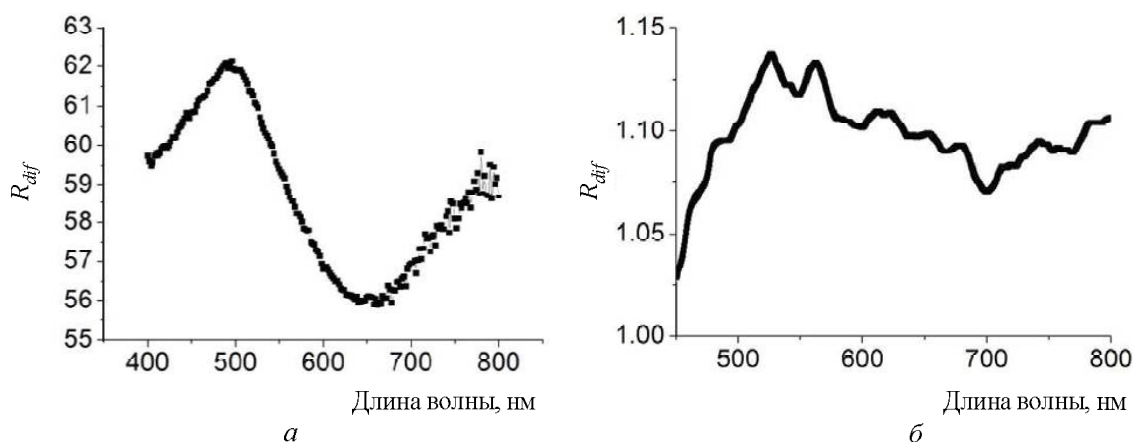


Рис. 3. Спектры отражения многослойного фантома с наноболочками: *а* – измерение на Perkin Elmer Lambda 950; *б* – на ЛЭСА-01-БИОСПЕК

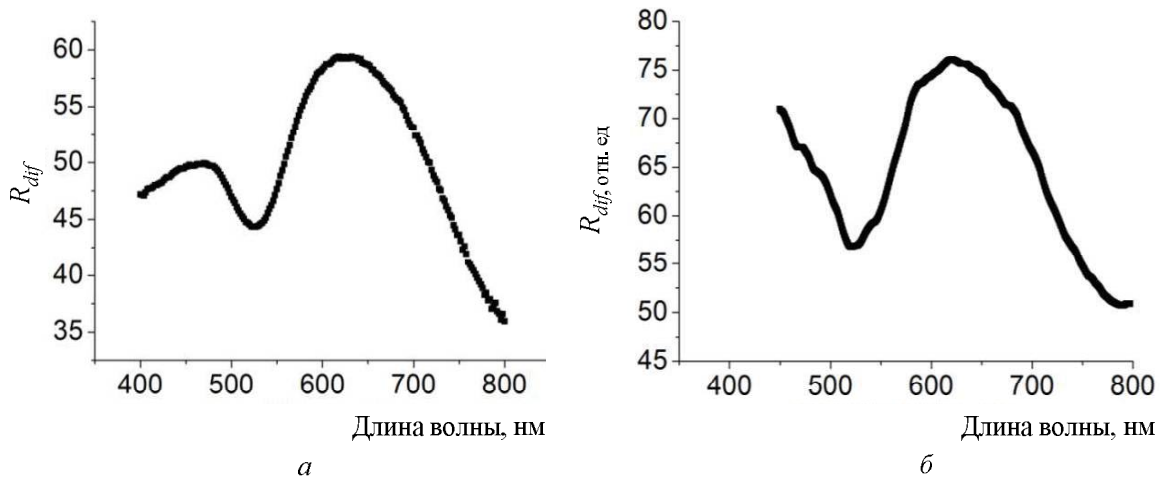


Рис. 4. Спектры отражения многослойного фантома с наночастицами диаметром 5 нм: *а* – измерение на Perkin Elmer Lambda 950; *б* – на JЭСА-01-БИОСПЕК

В спектрах диффузного рассеяния фантомов с наночастицами наблюдаются провалы, соответствующие полосам поглощения использованных наночастиц. Качественно результаты, полученные на волоконно-оптическом приборе и с помощью интегрирующей сферы, похожи и согласуются со спектральными характеристиками рассматриваемых фотосенсибилизаторов. Однако имеются количественные различия в спектрах, полученных на разных приборах, которые могут быть обусловлены кратностью рассеяния и различиями числовых апертур приемных систем спектральных приборов.

Список литературы

1. Оптическая биомедицинская диагностика : в 2 т. / под ред. В. В. Тучина. М. : Физматлит, 2007.
2. Синичкин Ю. П., Утц С. Р. *In vivo* отражательная и флуоресцентная спектроскопия кожи человека. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2001.
3. Хлебцов Б. Н., Богатырев В. А., Дыкман Л. А., Хлебцов Н. Г. Спектры резонансного светорассеяния золотых наноболочек : эффекты полидисперсности и ограничения длины свободного пробега электронов // Оптика и спектроскопия. 2007. Т. 102, № 2. С. 273–281.
4. Хлебцов Б. Н., Ханадеев В. А., Хлебцов Н. Г. Коллективные плазмонные резонансы в монослое металлических наночастиц и наноболочек // Оптика и спектроскопия. 2008. Т. 104, № 2. С. 324–337.
5. Хлебцов Н. Г. Оптика и биофотоника наночастиц с плазмонным резонансом // Квантовая электроника. 2008. Т. 38, № 6. С. 504–529.
6. Хлебцов Н. Г. Ориентационное усреднение интегральных сечений в методе дискретных диполей // Оптика и спектроскопия. 2001. Т. 90, № 3. С. 468–475.
7. Хлебцов Н. Г. Ослабление и рассеяние света в дисперсных системах с неупорядоченными, ориентированными и фрактальными частицами (теория и эксперимент) : дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Саратов. гос. ун-т. Саратов, 1996. 559 с.