

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ



С.К. Дик¹

Проректор по учебной и воспитательной работе БГУИР, кандидат физико-математических наук, доцент



М.М. Меженная¹

Доцент кафедры инженерной психологии и эргономики БГУИР, кандидат технических наук



Д.А. Завацкий¹

Аспирант БГУИР, магистр технических наук



Т.В. Гордейчук¹

Ассистент кафедры инженерной психологии и эргономики, аспирант БГУИР, магистр технических наук



Н.И. Счастлиная²

Научный сотрудник лаборатории модуляции функций организма Института физиологии НАН Беларуси

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

E-mail: mezhennaya@bsuir.by, t.gordeychuk@bsuir.by

²ГНУ «Институт физиологии НАН Беларуси», Республика Беларусь

Abstract. Many pathological processes accompanied by changes in the microcirculation of the skin. In addition the microcirculation of the skin is sensitive to the majority of pharmacological and cosmetological impacts. Noninvasive methods are optimal to monitor the optical properties and blood flow of the skin. One of them is a promising method of dynamic speckles monitoring. We used a specialized camera and a low-power laser source to register the change of the microcirculation of the skin before and after mechanical irritation. The results of dynamic speckles monitoring confirm the effectiveness of the rapid diagnosis of the state of human skin.

Оптические методы являются перспективным инструментом диагностики и лечения заболеваний человека вследствие присущих им преимуществ: бесконтактность, высокая точность и чувствительность, дистанционность, высокое пространственное разрешение и воспроизводимость результатов

измерений [1,2].

Использование оптических методов для исследования кожного покрова человека позволяет оценить состояние биологических тканей на различной глубине и с различной разрешающей способностью. По сравнению с традиционно используемой в медицинской практике биопсией данные методы характеризуются неинвазивностью и безопасностью для пациента. При этом большинство современных оптических методов (дерматоскопия, оптический видеомониторинг, оптическая топометрия, 3D-моделирование кожи, оптическая когерентная томография) нацелены на анализ морфологических характеристик кожи на клеточном уровне, что существенно повышает их стоимость и усложняет техническую реализацию [1-3]. В связи с этим актуальной является задача разработки методов и технических средств, реализующих возможность проведения экспресс-диагностики заболеваний и системных нарушений кожи, а также позволяющих осуществлять контроль эффективности терапевтических процедур. Перспективным направлением при этом является использование лазерного излучения для исследования биоспеклов кожи.

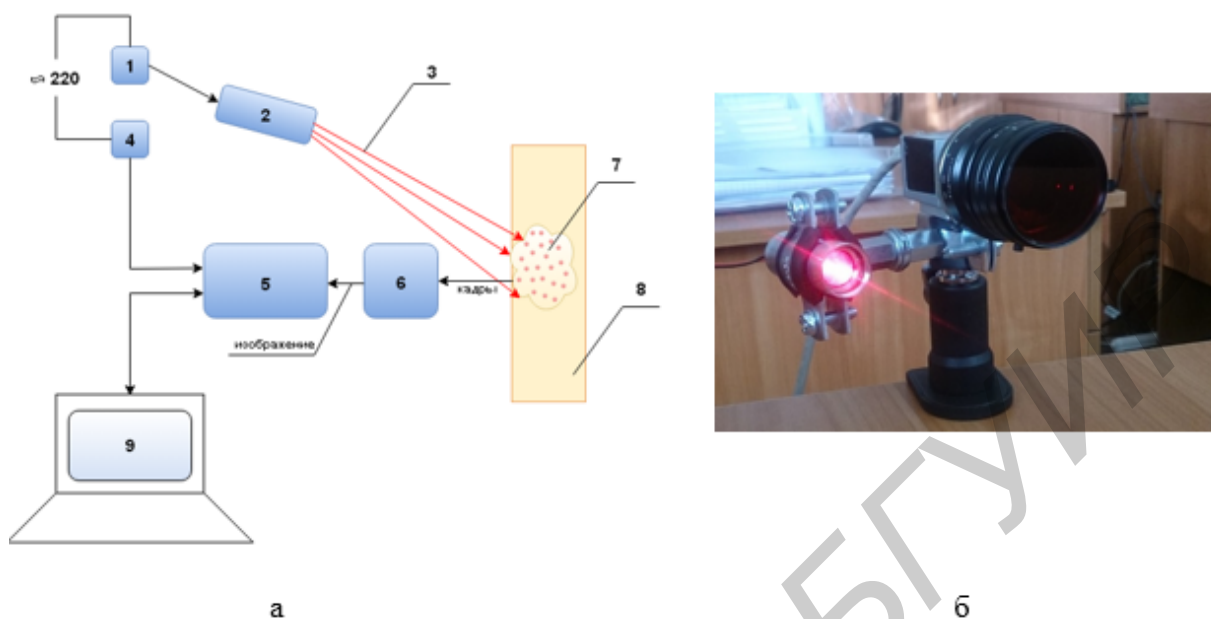
Неинвазивные спекл-оптические методы диагностики основываются на анализе параметров динамического спекл-поля, которое образуется в результате интерференции отраженного или рассеянного биообъектом когерентного излучения. Спекл-поле в плоскости наблюдения формирует картину, состоящую из множества спеклов (пятен), интенсивность света и форма которых меняются при наличии в объекте движущихся рассеивателей. При этом быстрота смены новых реализаций спекл-картины (динамика спеклов) зависит от скорости движения рассеивателей [8]. В качестве рассеивателей выступают клетки покровной ткани (дермиса, эпидермиса) и клетки крови [1].

Оптические свойства дермы и скорость кровотока зависят от множества патологических факторов, таких как гипо- и гипертермия, посттравматическое нарушение кровоснабжения конечностей, диабетическая микроангиопатия, экзема, ангииты кожи и онкологические заболевания кожи [3]. В связи с этим измерение биоспеклов кожи целесообразно использовать для диагностики состояния организма биологических тканей человека. Однако это в свою очередь требует разработки алгоритмов цифровой обработки спекл-изображений и выявления диагностически значимых показателей биоспеклов кожи в норме и патологии.

В данной работе представлены результаты применения разработанного авторами аппаратного и программного обеспечения динамического измерения биоспеклов для экспресс-диагностики состояния кожного покрова человека.

Аппаратное обеспечение исследований биоспеклов кожи. Регистрация динамических биоспеклов кожи выполнялась на базе устройства, приведенного на рисунке 1. В соответствии с приведенной схемой устройства (рис. 1,а) на исследуемый участок кожного покрова человека фокусируется пучок лазерного излучения. Интерференционная картина рассеянного биообъектом лазерного излучения регистрируется с помощью видеокамеры, снабженной специальной

оптической системой. Полученная видеoinформация поступает на персональный компьютер для отображения и цифровой обработки.



1 – блок питания лазера; 2 – лазер; 3 – лазерное излучение; 4 – блок питания видеокамеры;
5 – видеокамера; 6 – оптическая система; 7 – спекл-картина; 8 – биообъект,
9 – персональный компьютер

Рисунок 1 – Схема (а) и реальный вид (б) устройства динамического измерения биоспеклов кожи

Ключевым вопросом аппаратной реализации устройства динамического измерения биоспеклов кожи являлся обоснованный выбор параметров лазера.

Взаимодействие лазерного излучения с оптически неоднородной биологической тканью определяется процессами отражения, поглощения, рассеивания и проникновения (рис. 2, а) [5]. Степень отражения, рассеивания и поглощения лазерного излучения в свою очередь зависит от параметров лазера (плотности потока энергии и длины генерируемой волны), а также от состояния кожных покровов (влажности, пигментации, кровенаполнения и отечности кожи и подлежащих тканей) [7]. Известно, что проникающая способность оптического излучения от ультрафиолетового до оранжевого диапазона постепенно возрастает от 20 мкм до 2,5 мм и резко увеличивается в красном диапазоне (до 20–30 мм) [5]. Для возможности оценки микроциркуляции не только кожных покровов, но и внутренних тканей, был выбран красный лазер с длиной волны 660 нм (мощностью 3 мВт) (рис. 2, б) [2, 4, 5].

Для видеорегистрации динамических спекл-полей использовалась высокоскоростная камера с интерфейсом GigE, объективом Kowa LM50HC, CCD-матрицей и частотой 120 кадров в секунду при разрешении VGA.

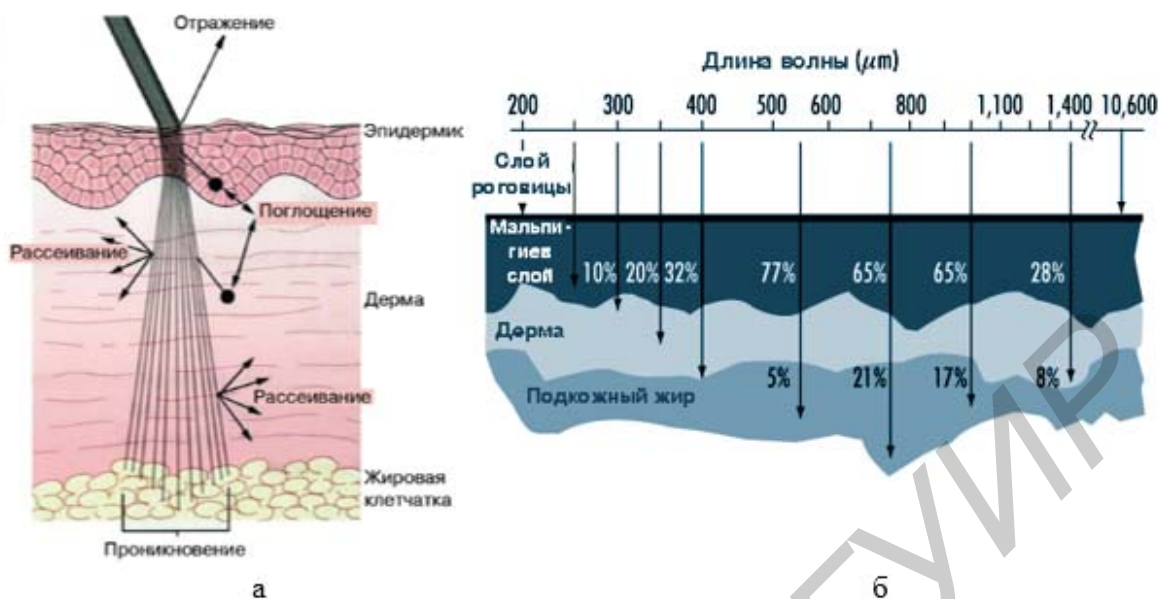


Рисунок 2 – Оптические эффекты, наблюдаемые в коже под воздействием оптического излучения (а), и глубина проникновения оптического излучения в зависимости от длины волны (б)

Цифровая обработка спекл-изображений. Регистрируемые со скоростью 120 кадров в секунду спекл-изображения подвергались цифровой обработке. Целью цифровой обработки являлся расчет контрастности для каждого пикселя спекл-изображения.

Для реализации поставленной задачи выполнялась пространственно-временная обработка спекл-изображений на базе модификации метода LASCA.

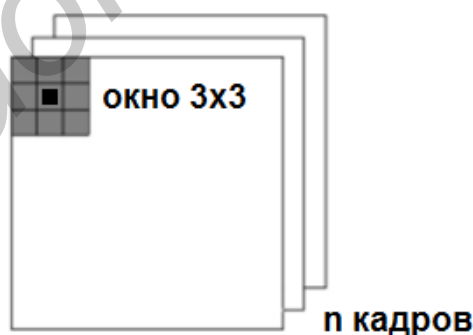


Рисунок 3 – Схематичное представление алгоритма расчета контрастности спекл-изображений в методе tLASCA

Впервые данный метод был использован в 1980 г. А.Ф. Ферчером [8]. Позднее Брайерс реализовал цифровой вариант метода, назвав его Laser Speckle Contrast Analysis (LASCA) [9]. Метод Брайерса представляет собой пространственную обработку спекл-изображения, а именно, расчет контрастности для каждого пикселя в окне из $N \times N$ пикселей (точек). Т.М. Ли расширил пространственный подход к обработке до пространственно-

временного анализа, а модифицированный метод получил название Temporally Derived Contrast (tLASCA) [9]. Сущность модификации заключается в выборе в качестве набора пикселей для расчета карты контрастности трехмерной матрицы: окно 3×3 пикселя по n кадрам. Схематично метод tLASCA представлен на рисунке 3.

В соответствии с методом tLASCA расчет значения контрастности для каждого пикселя спекл-изображения выполняется для центральной точки в окне 3×3 по $n=10$ накопленным кадрам:

$$K_{\text{tLASCA}(i,j)} = \frac{1}{9} \cdot \sum_{r=i-1}^{r=i+1} \sum_{c=j-1}^{c=j+1} \frac{\sigma_{i,j,t}}{\langle I_{i,j,t} \rangle}, \quad (1)$$

где $\sigma_{i,j,t}$ – среднеквадратическое отклонение всех пикселей в пространственной (i, j) и временной (t) областях, полученное для векторизированной трёхмерной матрицы;

$I_{i,j,t}$ – среднее арифметическое значение интенсивности всех пикселей в пространственной (i, j) и временной (t) областях.

Таким образом, при использовании окна минимального размера единичный пиксель результирующего кадра содержит в себе данные до 90 соседних в пространстве и времени пикселей. При разрешении камеры 659 на 494 пикселей в обработке участвуют более 38 миллионов точек каждую секунду.

Программная реализация алгоритма включает четыре этапа:

- 1 Инициализация.
- 2 Накопление и одновременная подготовка значений интенсивности пикселей из $n=10$ кадров посредством их дублирования, а также перевода в удобные типы данных.
- 3 Проведение расчетов значений контрастности спеклов для каждого пикселя.
- 4 Визуализация полученных данных с применением псевдоцветного раскрашивания одной из стандартных палитр для лучшего восприятия оператором.

Основными особенностями разработанного и реализованного в программном обеспечении алгоритма являются: высокая скорость обработки данных, меньшие потери в разрешении итогового изображения за счет использования минимального размера окна, высокая точность результатов за счет использованием значений интенсивности пикселей из ряда предыдущих кадров.

Методика и результаты исследований. Диагностика состояния кожного покрова человека выполнялась на базе описанного выше устройства динамического измерения биоспеклов кожи с последующей цифровой обработкой спекл-изображений. Объектом исследования являлся участок кожи на запястье в форме квадрата 20×20 мм. Расстояния от источника света, а также от объектива камеры до исследуемого участка кожи были равны и составляли 275 мм.

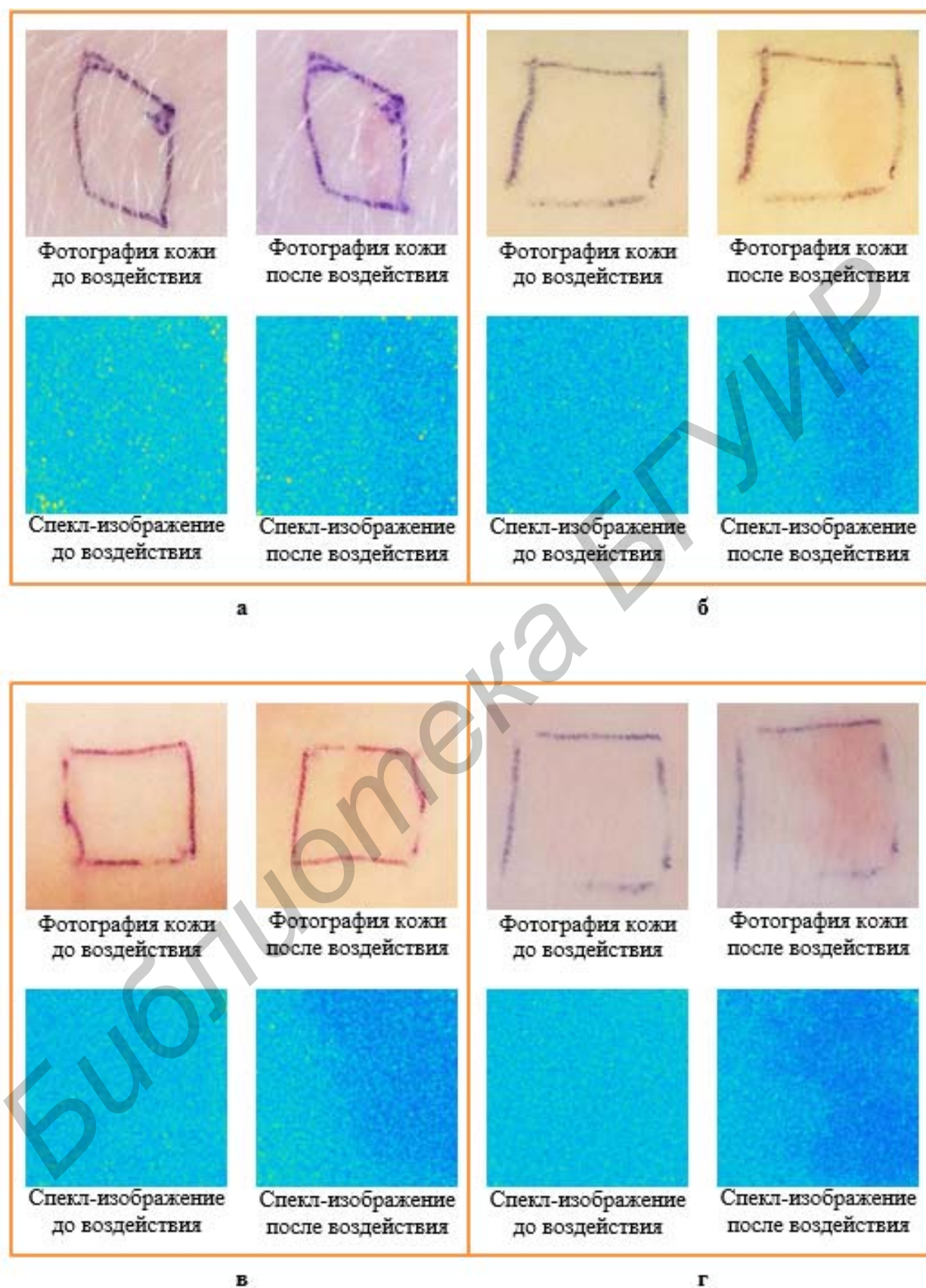


Рисунок 4 – Результаты исследований спеклов кожи испытуемого А. (а), испытуемого Б. (б), испытуемого В. (в), испытуемого Г. (г).

На первоначальном этапе исследований регистрировалось исходное состояние исследуемого участка кожи (рис. 4: фотографии и спекл-изображения кожи до воздействия). Далее половина исследуемого участка кожи испытуемого подвергалась механическому воздействию, результатом которого были поверхностные царапины. Через 7 минут после воздействия проводилась повторная регистрация состояния исследуемого участка кожи (рис. 4: фотографии и спекл-изображения кожи после воздействия).

Анализ обработанных спекл-изображений выявил следующее:

1 Исходное состояние исследуемого участка кожи испытуемых характеризовалось равномерными пульсациями кровотока по всей поверхности (рис. 4: спекл-изображения кожи до воздействия).

2 Спустя 7 минут после механического воздействия помимо равномерных пульсаций кровотока на спекл-изображениях наблюдались очаги постоянного свечения в областях наибольшего повреждения поверхностного покрова (рис. 4: спекл-изображения кожи после воздействия).

На основании полученных результатов исследований были сформулированы следующие выводы:

1 Метод динамического измерения и цифровой обработки биоспеклов кожи позволяет выявить визуально слабо детектируемые изменения в микроциркуляции.

2 Метод динамического измерения и цифровой обработки биоспеклов кожи чувствителен к различной степени механического повреждения.

Таким образом, метод динамического измерения и цифровой обработки биоспеклов кожи является эффективным инструментом качественной экспресс-диагностики состояния микроциркуляции кожных покровов человека, что в результате позволяет сформировать заключение об общем функциональном состоянии кожных покровов человека.

Заключение. Результаты динамического измерения и цифровой обработки спекл-изображений кожи человека подтверждают эффективность предложенного авторами подхода в качественной экспресс-диагностике состояния микроциркуляции кожных покровов человека, что в результате позволяет сформировать заключение об общем функциональном состоянии кожных покровов человека. Перспективным направлением развития исследований является выявление диагностически значимых количественных показателей биоспеклов кожи в норме и патологии.

Полученные результаты представляют интерес для инженеров и врачей, специализирующихся в области разработки систем диагностики и лечения заболеваний кожи.

Литература

[1]. Дик, С. К. Лазерно-оптические методы и технические средства контроля функционального состояния биообъектов / С. К. Дик. – Минск : БГУИР, 2014. – 235 с.

[2]. Штиршнайдер, Ю. Ю. Современные неинвазивные технологии визуализации в дерматологии / Ю. Ю. Штиршнайдер, А. В. Минченко, О. Р. Катунина, А. Р. Зубарев. – Вестник

дерматологии и венерологии, вып. №5, 2011, с. 41-53.

[3]. Шебалин, А. Состояние организма по биоспеклам кожи – Фотоника, №1, 2008, с.14-18.

[4]. Франсон, М. Оптика спеклов. / Пер.с англ. под ред. Ю.И.Островского. – М. : Мир, 1980. 171 с.

[5]. Барун, В.В., Иванов, А.П., Волотовская, А.В. // ЖПС. 2007. Т 74. С. 391-398.

[6]. Хлудеев, И.И. Неинвазивный контроль микрогемодиализации при фотодинамическом воздействии / И.И. Хлудеев, С.К. Дик, А.С. Терех, А.В. Смирнов, В.П. Зорин // Фундаментальные науки – медицине. В 2 ч. Ч 2. : материалы Междунар. науч. конф. – Минск : Беларус. Навука, 2013. – с. 346-350

[7]. Барун, В. В., Иванов, А. П., Волотовская, А. В., Улащик, В. С. Спектры поглощения и глубина проникновения света в нормальную и патологически измененную кожу человека // Журн. прикл. спектроскопии, Т.74, №3 – 2007. – с.387-394.

[8]. Briers, J.D. Webster, S. // Journal of Biomedical Optics. 1996. Vol. 1(2). P. 174-179.

[9]. Le, T.M. // IEEE Transactions on Medical Imaging. 2007. Vol. 26(6). P.833-842.