

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОЙ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОТЕРАПИИ БИОТКАНЕЙ

М.М. Кугейко, С.А. Лысенко, А.М. Лисенкова, В.А. Фираго

Белорусский государственный университет

пр. Независимости, 6, БГУ, каф. КРиОЭ, 220030, Минск, Беларусь, тел. +375 17 2121016

E-mail: lisenko@bsu.by, kugeiko@bsu.by

Abstract. A review of authors-developed methods for real-time diagnostics of bio-parameters of human tissues and blood by means of spectral-spatial characteristics of their multiple scattering, methods for optimization of spectral and energy parameters of laser therapy. Non-contact measuring systems to implement these methods are considered.

Эффективное использование методов оптической диагностики и фототерапии тканей человека в клинической практике невозможно без развитого методического обеспечения. В связи с этим разработка быстрых и высокоточных методов теории переноса излучения в биологических биотканях, подходов к неинвазивному определению плотности излучения в многослойной ткани и эффективности поглощения света ее эндогенными и экзогенными хромофорами, а также развитие на этой основе методов фототерапии биотканей с персонализацией спектральных и энергетических параметров фотовоздействия является важным научным направлением, имеющим большую практическую значимость. В докладе рассматриваются последние достижения авторов в решении перечисленных проблем.

Бесконтактная экспресс-диагностика биотканей. Одна из возможных схем бесконтактного измерителя параметров кожи приведена на рис. 1, *а*. Измеритель содержит широкополосный источник излучения 1, передающие оптические волокна 2 и 4, монохроматор 3, взаимно ортогональные поляризаторы 5 и 8, фокусирующее линзовое устройство 6, монохромную ПЗС-камеру 9, блок управления источником излучения, регистрации и обработки сигналов 10. С помощью линзового устройства 6 можно обеспечить любой диаметр пятна облучения, а с помощью ПЗС-камеры 9 получить двумерное распределение потока рассеянного кожей излучения. Для исключения влияния отраженного от поверхности объекта света на регистрируемые сигналы в каналах послылки и регистрации излучения используются взаимно-ортогональные поляризаторы 5 и 8. Внешний вид устройства, реализующего вышеописанную схему измерений, показан на рис 1, *б*.

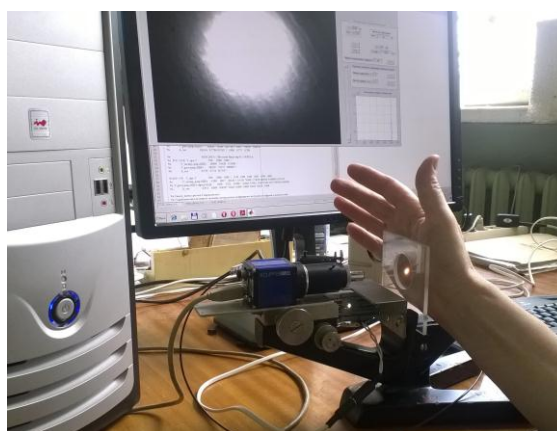
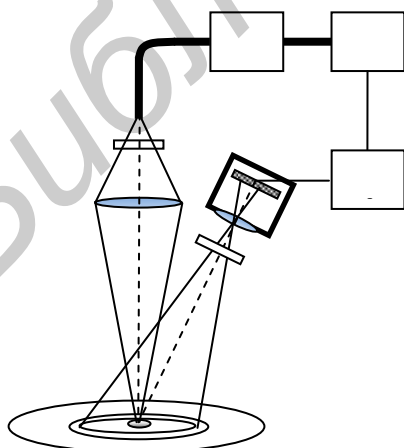


Рисунок 1 – Блок схема (*а*) и внешний вид (*б*) устройства для бесконтактных измерений спектрально-пространственных характеристик обратного рассеяния кожи

Еще один вариант устройства для бесконтактной диагностики биопараметров кожи был реализован авторами на базе волоконно-оптического спектрофотометра Avantes, в котором источником излучения является дейтериво-галогеновая лампа, а приемником – спектрометр на дифракционной решетке. Подвод излучения от источника к коже и доставка обратно рассеянного кожей излучения к приемнику выполняется с помощью миниатюрного волоконно-оптического датчика, в котором шесть осветительных волокон расположены вокруг одного считывающего, и объектива, по отношению к которому торец волоконно-оптического датчика и исследуемый участок кожи находятся в оптически сопряженных плоскостях. Процесс измерения спектра ОР кожи включает регистрацию сигнала $P_{\text{фон}}$ обусловленного отражением света на оптических поверхностях объектива, в отсутствие исследуемого объекта; регистрацию сигнала ОР калибровочного образца $P_{\text{к}}$ (белого диффузного отражателя); регистрацию сигнала ОР исследуемого объекта $P_{\text{об}}$; коррекцию и нормировку сигнала $P_{\text{об}}$:

$$r_{\text{об}}(\lambda) = r_{\text{к}} \frac{P_{\text{об}}(\lambda) - P_{\text{фон}}(\lambda)}{P_{\text{к}}(\lambda) - P_{\text{фон}}(\lambda)},$$

где $r_{\text{об}}$ и $r_{\text{к}}$ – сигналы обратного рассеяния кожи и калибровочного образца, нормированные на мощность посылаемого на них светового пучка. Сигнал $r_{\text{к}}$ рассчитывался методом Монте-Карло в соответствии с оптическими параметрами калибровочного образца [1]. Радиальная зависимость нормированного светового потока, рассеянного калибровочным образцом при диаметре пятна его освещения 0.8 мм, приведена на рис. 2.

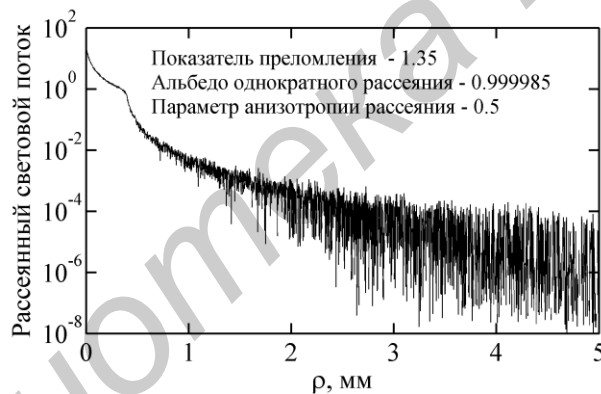


Рисунок 2 – Зависимость светового потока, рассеянного калибровочным образцом в заднюю полусферу, от расстояния ρ до центра зондирующего светового пучка

Количественный анализ спектра ОР кожи выполняется с использованием его разработанной аналитической модели [2], позволяющей в реальном времени рассчитывать измеряемые в экспериментах фотосигналы с точностью метода Монте-Карло. Путем минимизации невязки между экспериментальным и модельным спектрами ОР кожи можно получать оценки практически всех параметров кожи, проявляющихся в многократно рассеянных ее световых потоках, – объемные содержания (%) меланина в эпидермисе и капилляров в дерме, концентрацию (мкМ) билирубина в дерме, компонентный состав венозно-артериального гемоглобина с учетом его основных форм (Hb, HbO₂) и дисгемоглобинов (COHb, MetHb, SHb), средний диаметр капилляров, толщину эпидермиса и оптические параметры (коэффициенты поглощения и рассеяния) соединительной ткани [2]. На рис. 3, а приведен экспериментальные спектры ОР кожи $r_{\text{об}}$ сопоставлены с их модельными расчетами $r_{\text{мод}}$. Корректность оценок биопараметров кожи косвенно подтверждается близостью их значений в симметрично расположенных точках тела человека. Так, несмотря на заметные различия представленных на рис. 3, а спектров ОР кожи на правой и левой руке добровольца, восстановленные из них параметры кровеносного русла кожи (объемного

содержания капилляров f_{bl} и степени оксигенации крови S), имеют достаточно близкие значения: 1 – $f_{bl} = 1.6\%$, $S = 81\%$; 2 – $f_{bl} = 1.4\%$, $S = 80\%$; 3 – $f_{bl} = 0.71\%$, $S = 33\%$; 4 – $f_{bl} = 0.67\%$, $S = 30\%$. Измерения $r_{об}(\lambda)$ для участков кожи с изменяющимся вследствие сердечных сокращений кровенаполнением позволяют также определять компонентный состав артериального гемоглобина. Результаты анализа таких измерений дают для степени оксигенации артериальной крови диапазон 94–99%, соответствующий нормальным физиологическим данным, что также подтверждает корректность разработанных методов.

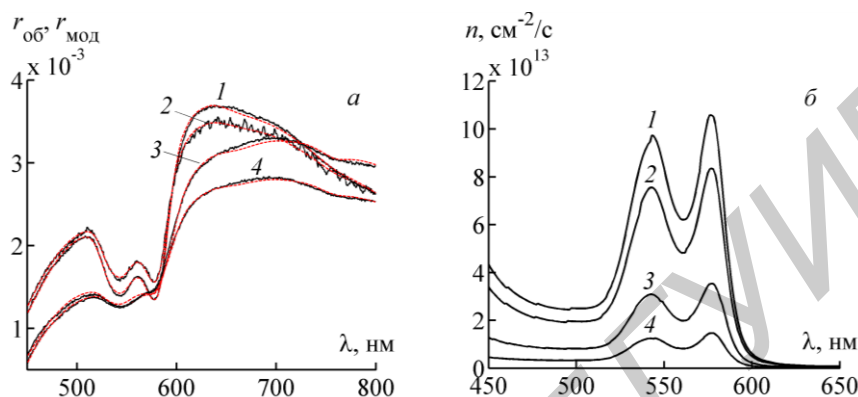


Рисунок 3 – Результаты восстановления эффективности фотодиссоциации HbO_2 (β) из экспериментальных спектров ОР кожи (α), соответствующих большому пальцу (1, 2) и тыльной стороне ладони (3, 4) правой (1, 3) и левой (2, 4) руки добровольца

Контроль эффективности фототерапии биотканей. Авторами предложена методика персонализированной фототерапии тканей организма человека с контролем плотности излучения внутри ткани и глубинных распределений спектров действия света на ее эндогенные (естественные) и экзогенные (специально введенные) хромофоры. Методика основана на измерении спектра диффузного отражения или ОР ткани и извлечении из них информации о характеристиках светового поля в слоях ткани с различной глубиной залегания путем использования для решения прямой и обратной задач разработанных аналитических моделей измеряемых спектров и метода быстрого расчета распределения светового потока по глубине многослойной среды. Это позволяет получать необходимые для оптимизации лазерной терапии дозиметрические данные с требуемой для практики точностью и оперативностью. Возможности разработанной методики продемонстрированы на примере оценки эффективности фотодиссоциации оксигемоглобина $n(\lambda)$ в кровеносных сосудах кожи [3]. Интегральные по всей толще дермы спектры $n(\lambda)$ для четырех точек на теле одного и того же человека, восстановленные из экспериментальных спектров ОР, представлены на рис. 3, б. Видно, что количество молекулярного кислорода, высвобождаемое из кровеносных сосудов дермы в окружающую ткань при одинаковой освещенности кожи, существенно зависит от биопараметров кожи. Очевидно, что данное обстоятельство необходимо учитывать при проведении лазерной терапии. Возможность такого учета открывает разработанный авторами физико-математический инструментарий.

Литература

- Lisenko, S.** Systems for real-time optical diagnostics of biological objects / S. Lisenko, M. Kugeiko, O. Notra, W. Surtel // Proc. SPIE. – 2014. – Vol. 9291. – P. 929109-1–6.
- Лысенко, С. А.** Методы оптической диагностики биологических объектов / С.А. Лысенко. – Минск: БГУ, 2014. – 250 с.
- Лысенко, С. А.** Методика контроля эффективности фототерапии биотканей / С.А. Лысенко, М.М. Кугейко, А.М. Лисенкова, В.А. Фираго, Т.А. Железнякова // Вест. Белорус. госуд. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2014. – № 3. – С. 52–56.