

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАТАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА И ПАРАМЕТРОВ ИХ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНОГО РУСЛА СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь,

Проведены экспериментальные измерения и оценены возможности спектроскопии, основанной на регистрации спектрально-пространственных профилей локального коэффициента диффузного отражения широкополосного светового излучения живыми кровенаполненными поверхностными тканями человека. Показано, что определение гидратации тканей и параметров их микроциркуляторного русла возможно при регистрации спектрально-пространственных профилей, полученных в диапазоне спектра от 490 до 1120 нм при изменении расстояния между излучающим и приемным оптоволоконными зондами от 3 до 7 мм.

Гидратация тканей и параметры микроциркуляторного русла системы кровообращения являются важными показателями при лечении ряда сосудисто-сердечных заболеваний, которые зачастую приводят к серьезным отекам тканей [1, 2]. Наиболее удобным бесконтактным методом определения указанных параметров *in vivo* является спектроскопия диффузного отражения с пространственным разрешением [3, 4], использующая диффузионное приближение. При его применении основной проблемой оказывается правильное разделение определяемого эффективного показателя ослабления светового излучения живой кровенаполненной тканью $\mu_{\text{eff}} = \sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu'_s)}$ на показатель приведенного (уменьшенного или редуцированного) рассеяния μ'_s и показатель поглощения μ_a . Обычно эту проблему решают путем усложнения используемой спектральной аппаратуры, применяя высокочастотную амплитудную модуляцию светового излучения, вводимого в ткань, или волоконные суперконтинуумные лазеры с монохроматорами [5], что позволяет учесть расстояние $\bar{l}$, которое в среднем при многократном рассеянии проходят фотоны в среде между точкой ввода излучения в ткань и точкой его регистрации ρ [6]. Поэтому актуально рассмотреть альтернативные решения, которые не требуют существенного усложнения используемой спектральной аппаратуры.

Как показывают численные расчеты, при регистрации спектрально-пространственных профилей локального коэффициента диффузного отражения $R(\lambda, \rho_k)$ в достаточно широком участке спектра и учете разного характера поведения спектральных показателей $\mu'_s(\lambda)$ и $\mu_a(\lambda)$ с длиной волны λ возможно разделение $\mu_{\text{eff}}(\lambda)$ на две искомые составляющие при составлении системы нелинейных уравнений для используемого набора расстояний ρ_k и его решении путем подгонки моделируемых зависимостей $R(\lambda, \rho_k)$ к экспериментально измеренным $R_m(\lambda, \rho_k)$. Если положить, что зависимость спектрального показателя описывается монотонно изменяющейся функцией вида $\mu'_s(\lambda) = A \cdot \lambda^{-m}$, зависящей только от двух параметров A и m , возможно составление соответствующей системы нелинейных уравнений и его численного решение, т. е. определение искомых оценок спектральных показателей $\mu'^*_s(\lambda)$ и $\mu^*_a(\lambda)$.

В докладе рассмотрены особенности компьютеризированного комплекса спектральной аппаратуры, созданного авторами, и приводятся наиболее типичные спектрально-пространственные профили $R_m(\lambda, \rho_k)$ поверхностных тканей, которые зарегистрированы в нескольких точках руки человека. Также обсуждаются зафиксированные различия формы регистрируемых профилей $R_m(\lambda, \rho_k)$, которые обусловлены разной морфологией подкожных тканей. Отмечается, что живые ткани отличаются сильной пространственной неоднородностью, вызываемой имеющимся распределением артериальных и венозных сосудов микроциркуляторного русла и индивидуальными особенностями показателей $\mu'_s(\lambda)$ и $\mu_a(\lambda)$ условно обескровленной и обезвоженной ткани. Приводятся полученные оценки зависимостей $\mu'^*_s(\lambda)$ и $\mu^*_a(\lambda)$ и обсуждаются их особенности.

Установлено, что определение объемной концентрации основных хромофоров живых

кровеннаполненных тканей по получаемым оценкам спектрального показателя поглощения излучения $\mu_a^*(\lambda)$ существенно осложняется неоднородностью ткани и неизвестностью показателя $\mu_a^{*t}(\lambda)$, характерного для обескровленной и обезвоженной ткани в точке исследования тела конкретного человека. Значение этого показателя может в несколько раз превышать суммарный показатель поглощения гемоглобина крови и воды, к тому же наблюдается его существенный индивидуальный разброс.

В докладе обсуждаются методы оценки неизвестного спектрального показателя поглощения $\mu_a^*(\lambda)$, которые основаны на учете различий поведения спектральных зависимостей $\mu_a^*(\lambda)$ оксигенированного HbO_2 и неоксигенированного Hb гемоглобина, а также воды в видимой и ближней инфракрасных областях спектра, разделении используемой области спектра на два участка и применении в них степенных полиномов с разными значениями их степени m_1 и m_2 для аппроксимации искомой спектральной зависимости $\mu_a^{*t}(\lambda)$.

Показано, что применение описанного подхода и предлагаемой модели разделения микроциркуляторного русла системы кровообращения на два бассейна (артериальный и венозный) позволяет проводить определение объемной концентрации крови C_V^{bl} в этих бассейнах, т. е. C_{Va}^{bl} и C_{Vv}^{bl} , эквивалентных диаметров внутреннего просвета малых артериальных D_{Va} и венозных D_{Vv} сосудов микроциркуляторного русла и объемного содержания воды $C_V^{\text{H}_2\text{O}}$ в исследуемом участке ткани. Отмечается сильное влияние неопределенности показателя поглощения излучения оксигенированного HbO_2 и неоксигенированного Hb гемоглобина на рассчитываемые значения сатурации гемоглобина венозной крови кислородом SvO_2 . Для снижения этого влияния и неопределенности показателя поглощения $\mu_a^*(\lambda)$ предлагается одновременно измерять и учитывать текущие значения сатурации артериальной крови SaO_2 . Показано, что применение комплекса предлагаемых решений позволяет получать оценки основных параметров микроциркуляторного русла по регистрируемым спектрально-пространственным профилям диффузного отражения $R_m(\lambda, \rho_k)$ в диапазоне спектра от 490 до 1120 нм и пределах изменения ρ_k от 3 до 7 мм.

Делается вывод о перспективности создания соответствующей спектральной компьютеризированной аппаратуры, предназначенной как для контроля эквивалентного диаметра внутреннего просвета малых артериальных сосудов при лечении гипертензии, так и состояния микроциркуляторного русла при возникновении отеков тканей, вызываемых сердечно-сосудистой недостаточностью.

Список литературы

1. Физиологическая оценка результатов спектрометрии содержания оксигемоглобина и реакции микрососудов на изменение гемодинамики / А.И. Кубарко, В.А. Фираго // Неотложная кардиология и кардиоваскулярные риски. – 2018. – Том 2, № 2. С. 358–363.
2. Синдромы нарушения микроциркуляции / А. В. Шотт, В.Л. Казушич, А.П. Василевич и др. // Здоровоохранение (Минск). – 2010. – № 6. С.39–42.
3. Jacques, S. Video reflectometry to specify optical properties of tissue in vivo // Proc. SPIE 10311, Medical Optical Tomography: Functional Imaging and Monitoring. – 1993. –P. 103110D-1-103110D-16.
4. Doornbos, R. The determination of in vivo human tissue optical properties and absolute chromophore concentrations using spatially resolved steady-state diffuse reflectance spectroscopy / R. Doornbos, R. Lang, M. Aadlers, [et al.] // Physics in Medicine and Biology. – 1999. – Vol. 44, No 4. P. 967–981.
5. Sanchez-Cano, A. Measurement method of optical properties of ex vivo biological tissues of rats in the near-infrared range / A. Sanchez-Cano, J. Saldana-Diaz, L. Perdices, [et al.] // Applied Optics. – 2020. – Vol. 59, No. 13. – P. D111-D117.
6. Blaney, G. Dual-Slope Diffuse Reflectance Instrument for Calibration-Free Broadband Spectroscopy. Author manuscript / G. Blaney, R. Donaldson, S.Mushtak, [et al.] // Appl Sci (Basel). – 2021. – Vol. 11, No 4. – P. 20.