

Потенциальные возможности спектроскопии при оценке состояния артериальных сосудов микроциркуляторного русла

В. А. Фираго

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: firago@bsu.by

Проанализированы возможности спектроскопии диффузного отражения при решении актуальной задачи – оперативной неинвазивной оценки состояния сосудов микроциркуляторного русла биотканей. Перечислены основные проблемы, которые необходимо решить при создании методики определения основных параметров микроциркуляторного русла и усредненного коэффициента растяжения стенок артериол в кольцевом направлении. Приводятся особенности расчетной модели формирования спектрально-временного профиля диффузного отражения излучения пульсирующей кровенаполненной тканью и результаты моделирования процесса определения искомых параметров, которые подтверждают возможность создания аппаратуры для неинвазивной оценки состояния артериальных сосудов микроциркуляторного русла.

Ключевые слова: спектроскопия диффузного отражения; спектрально-временные профили; биологические ткани; микроциркуляторное русло; коэффициент растяжения стенок сосудов.

Potential possibilities of spectroscopy in the tasks of determining the condition of arterial vessels of the microcirculatory bed

V. A. Firago

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: firago@bsu.by

The possibilities of diffuse reflectance spectroscopy in solving the urgent task of operative noninvasive assessment of the state of vessels of the microcirculatory bed of biotissues are analyzed. The main problems that need to be solved when creating a technique for determining the main parameters of the microcirculatory channel and the average stretching coefficient of arteriolar walls in the annular direction are listed. The peculiarities of the computational model of the formation of the spectral-temporal profile of diffuse reflection of radiation by pulsating blood-filled tissue are considered, as well as the results of modeling the process of determining the required parameters, which confirm the possibility of creating equipment for noninvasive assessment of the state of arterial vessels of the microcirculatory channel.

Keywords: Diffuse reflectance spectroscopy; spectral-time profiles; biological tissues; microcirculatory bloodstream; vessel wall stretching coefficient.

Введение

Термин «микроциркуляторное русло» используют при описании обменных процессов, происходящих в основном сегменте кровеносной системы, который состоит из артериол, прекапилляров, капилляров, посткапилляров и венул [1]. Нарушения микроциркуляции вносит большой вклад в заболеваемость и смертность населения. К сожалению, отсутствие неинвазивных методов оценки состояния сосудов микроциркуляторного русла препятствуют созданию соответствующей аппаратуры для массового скрининга населения, хотя выявление патологии

еще на стадии доклинического проявления, позволит существенно снизить затраты на лечение.

Ультразвуковые методы при исследовании микроциркуляции практически неприменимы, поскольку диаметры сосудов микроциркуляторного русла меньше 100 мкм. Спектроскопия диффузного отражения светового излучения позволяет определять оптические характеристики рассеивающих сред [2]. Поэтому перспективно проанализировать ее возможности при оценке параметров артериальных сосудов микроциркуляторного русла. Длины волн светового излучения λ малы, а в спектре отраженного излучения присутствуют полосы поглощения основных хромофоров, в том числе и гемоглобина, который содержится в эритроцитах крови.

1. Проблемы, возникающие при создании методики оценки состояния сосудов микроциркуляторного русла

При создании обсуждаемой методики приходится решать комплекс задач. Необходима модель, адекватно описывающая связи между диаметрами внутреннего просвета концевых участков малых артерий, артериол и прекапилляров, трансмуральным давлением крови $P_{ao}(t)$ в них [1] и систолическим P_s и диастолическим P_d давлением. Тонус этих сосудов напрямую формирует диастолическое давление P_d . Также нужна модель, позволяющая рассчитывать спектрально-временные профили диффузного отражения $R(\lambda, t, \rho_0)$, учитывающая пульсации объема крови в единичном объеме ткани V_1 при периодических сокращениях сердца.

Поскольку отношение сигнал/шум в получаемых спектрах диффузного отражения ограничено, приходится определять оптимальное расстояние ρ_0 между точкой ввода излучения в ткань и точкой регистрации выходящего из ткани излучения. Причем, при создании расчетной модели необходимо обеспечивать возможность разделения вкладов артериального и венозного бассейнов микроциркуляторного русла в суммарный спектральный показатель поглощения излучения кровью.

Для повышения устойчивости получаемых решений необходимо минимизировать число варьируемых параметров расчетной модели формирования профилей $R(\lambda, t, \rho_0)$. Поэтому необходимо проанализировать возможность использования фотоплетизмограммы, регистрируемой в точке исследования, для формирования опорной временной зависимости трансмурального давления крови в артериолах $P_{ao}(t)$. Также следует рассмотреть возможность использования значений сатурации гемоглобина артериальной крови кислородом S_a , получаемых параллельно с измерением профиля $R_m(\lambda, t, \rho_0)$ с помощью хорошо зарекомендовавшей себя пульсоксиметрической техники. Решение этих двух проблем позволит упростить алгоритмы решения обратной задачи, т. е. минимизацию отклонения моделируемых зависимостей $R(\lambda, t, \rho_0)$ от измеряемых $R_m(\lambda, t, \rho_0)$ путем нахождения минимума функции невязки.

Отдельного анализа требует вопрос получения аналитического выражения для расчета усредненного коэффициента растяжения стенок артериальных сосудов микроциркуляторного русла в кольцевом направлении \bar{k}_e . Для этого необходимо найти связь между отношением $\Delta D_{ao} / \bar{D}_{ao}$ (амплитуды пульсовых колебаний ΔD_{ao} их диаметра внутреннего просвета к усредненному значению \bar{D}_{ao} этого диаметра)

и трансмуральным давлением крови $P_{ao}(t)$ в артериолах, что требует анализа процессов гемодинамики.

При успешном решении отмеченных проблем возможно создание методики оценки основных параметров микроциркуляторного русла, которые наряду с оценками скорости распространения пульсовой волны в магистральных артериальных сосудах и времени задержки t_{FP} между формированием локальной силовой кардиограммы и фотоплетизмограммы могут служить новыми диагностическими признаками при дифференциальной диагностике артериальной гипертензии.

2. Особенности методики оценки рассматриваемых параметров микроциркуляторного русла

В докладе подробно рассмотрены особенности предлагаемой расчетной модели формирования $R(\lambda, t, \rho_0)$, которая учитывает пульсации объемной концентрации артериальной крови C_v^{blao} в пульсирующей секции артериального бассейна микроциркуляторного русла. Поясняется, как учитывается связь между объемными концентрациями артериальной C_v^{bla} и венозной C_v^{blv} крови с усредненными значениями диаметров внутреннего просвета артериальных \bar{D}_a и венозных \bar{D}_v сосудов, а также их усредненными длинами \bar{L}_a и \bar{L}_v для единичного объема ткани V_1 в точке исследования. Приводятся приблизительные аналитические выражения, позволяющие связать параметры артериальных сосудов пульсирующей секции микроциркуляторного русла с систолическим P_s и диастолическим P_d давлением крови. Показывается, что при учете относительных сопротивлений кровотоку различных секций кровеносного русла можно использовать нормированную фотоплетизмограмму для расчета временной зависимости трансмурального давления в артериолах $P_{ao}(t)$, что позволяет получить аналитическое выражение для определения коэффициента растяжения стенок артериол в кольцевом направлении \bar{k}_e . Обсуждается необходимость градуировки применяемой спектральной аппаратуры и особенности применения диффузионного приближения при использовании экспоненциально-степенной аппроксимации спектрального показателя приведенного рассеяния $\mu'_s(\lambda)$ ткани, а также способ определения ее показателя поглощения $\mu_a(\lambda)$.

Указывается, что при формировании функции невязки f_{res} целесообразно использовать отношение $R(\lambda, t, \rho_0)/R_m(\lambda, t, \rho_0)$, что позволяет обеспечить одинаковый вклад в невязку всех спектральных составляющих моделируемых и измеряемых профилей. Приводятся результаты моделирования процесса определения параметров микроциркуляторного русла, учитывающего шумы спектрометра, которые подтверждают возможность определения коэффициента растяжения \bar{k}_e .

Библиографические ссылки

1. Распространение пульсовой волны по малым сосудам: результаты измерений и подходы к моделированию / А. И. Кубарко [и др.] // Неотложная кардиология и кардиоваскулярные риски. 2020. Т. 4, № 2, С. 1037–1044.
2. Possibilities of Diffuse Reflectance Spectroscopy in Determining and Operational Control of the Optical Properties of Finely Dispersed Scattering Media. / O. Notra [et al.] // Electronics. 2023. 12. P. 2893.