

### Список литературы

1. Урядов В.Н., Зеленин А.С. // Матер. МНТК приур. к 50-лет. МРТИ-БГУИР. Ч. 2. Минск. 2014. С. 201–202.
2. Прокис Дж. Цифровая связь. М., 2000.
3. Бунас В.Ю., Стункус Ю.Б., Тарченко Н.В. и др. Построение и расчет гибридных СКТ с глубоким проникновением оптики: учеб. пособие. М., 2012.
4. Урядов В.Н., Стункус Ю.Б. // Докл. БГУИР. 2006. № 3 (15). С. 48–53.
5. Урядов В.Н., Рошупкин Я.В., Бунас В.Ю. и др. // Докл. БГУИР. 2015. № 8 (94). С. 11–16.
6. Урядов В.Н., Рошупкин Я.В., Бунас В.Ю. и др. // Докл. БГУИР. 2016. № 4 (98). С. 10–14.

УДК615.47:616-072.7

## ЛАЗЕРНЫЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ ФЛОУМЕТР С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ АНАЛИЗОМ РИТМИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТ МИКРОСОСУДИСТОЙ ГЕМОДИНАМИКИ

В.И. ИВАНОВ, Н.И. ИВАНОВ, А.Н. ЛАЗАРЧИК

*НИИ ядерных проблем Белорусского государственного университета  
Бобруйская, 11, Минск, 220030, Беларусь*

*Поступила в редакцию 21 ноября 2016*

Приведены результаты разработки и исследования лазерного доплеровского флоуметра для диагностики микрососудистой гемодинамики с дифференциальным анализом ритмических компонент.

*Ключевые слова:* лазерный доплеровский флоуметр, микрогемодинамика, тканевый кровоток.

### Введение

Сосуды микроциркуляторного русла (МЦР) человека реализуют транспортную функцию сердечно-сосудистой системы и тем самым обеспечивают массоперенос и трансапиллярный обмен крови, необходимый для жизнедеятельности тканей и органов человека. При этом высокоточное исследование параметров микрогемодинамики МЦР имеет важное значение для раннего определения патогенеза многих заболеваний. Одним из современных и наиболее объективных методов оценки состояния микрогемодинамики человека является метод лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) [1]. Наряду с задачей определения степени кровоснабжения (кровенаполнения) тканей МЦР все более важное значение в медицинской диагностической практике приобретает исследование колебательных процессов (ритмов) микрогемодинамики, отражающих механизм многозвенной регуляции МЦР на основе исследования эндотелиально-зависимой, нейрогенной, миогенной компонент, а также дыхательной и сердечной частотных компонент ритмов и их взаимосвязи во времени [1, 2].

### Разработка и результаты

Разработанный авторами оптиковолоконный лазерный доплеровский флоуметр микрогемодинамики человека с дифференциальной оценкой ритмов гемодинамики МЦР на основе модовой декомпозиции лазерных доплеровских флоуграм (ЛДФ – грамм) показан на рис. 1. Данный прибор является второй модифицированной версией разработки, сертифицированной Министерством здравоохранения Республики Беларусь и разрешенной к применению в медицинской практике [3]. Зондирование и прием отраженного лазерного сигнала в приборе осуществляется трехканальным оптиковолоконным датчиком.

Используемые длины волн лазерного излучения (0,53–0,87) мкм, мощность зондирующего излучения 1–3 мВт. Лазерный флоуметр обеспечивает исследование параметров капиллярного кровотока в диапазоне скоростей эритроцитов от 10 мкм/с до 1см/с (соответствует частотному диапазону детектируемых доплеровских сигналов от 35 Гц до 35 кГц). Разрешающая способность по групповой скорости 10 мкм/с. Дифференциальный спектральный анализ ритмических компонент гемодинамики в диапазоне частот от 0,005 до 2 Гц с частотным разрешением 0,001 Гц. Допплеровская составляющая выделяется методом оптического гетеродинамирования зондирующего и принимаемого излучений на приемной апертуре фотодетектора.

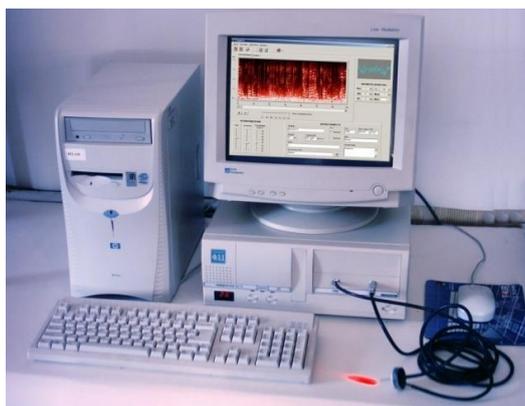


Рис. 1. Оптиковолоконный лазерный доплеровский флоуметр

ЛДФ-грамма формируется от всех эритроцитов, находящихся в объеме зондирования (1–1,5 мм<sup>3</sup>), движущихся с разными скоростями и по разному количественно распределенных в артериолах, капиллярах, венах и артериовенулярных анастомозах, рис. 2. В результате обработки ЛДФ-граммы определяется параметр показателя микроциркуляции (ПМ), который характеризует кровенаполнение МЦР в исследуемом объеме:

$$ПМ = N_{эр} \cdot V_{ср}, \tag{1}$$

где  $N_{эр}$  – количество эритроцитов в зондируемом объеме;  $V_{ср}$  – средняя скорость эритроцитов.

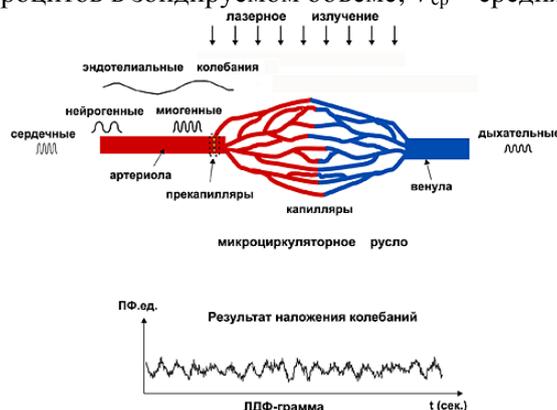


Рис. 2. Механизмы формирования ЛДФ-граммы

В приборе имеется программируемый в диапазоне температур (26–44) °С теплостимулятор с накладным датчиком тепловой нагрузки для исследования резерва ПМ и двухволновой спектрофотометрический канал для определения оксигенации крови. Ритмические колебания ПМ обусловлены рядом активных механизмов регуляции, изменяющие мышечный сосудистый тонус МЦР, пространственно локализованы в микроциркуляторном русле (МЦР) и имеют важное диагностическое значение (рис. 2). На рис. 3 приведены экспериментально полученные спектрограммы ЛДФ – спектрограммы, как результат влияния ряда ритмических компонент ПМ.

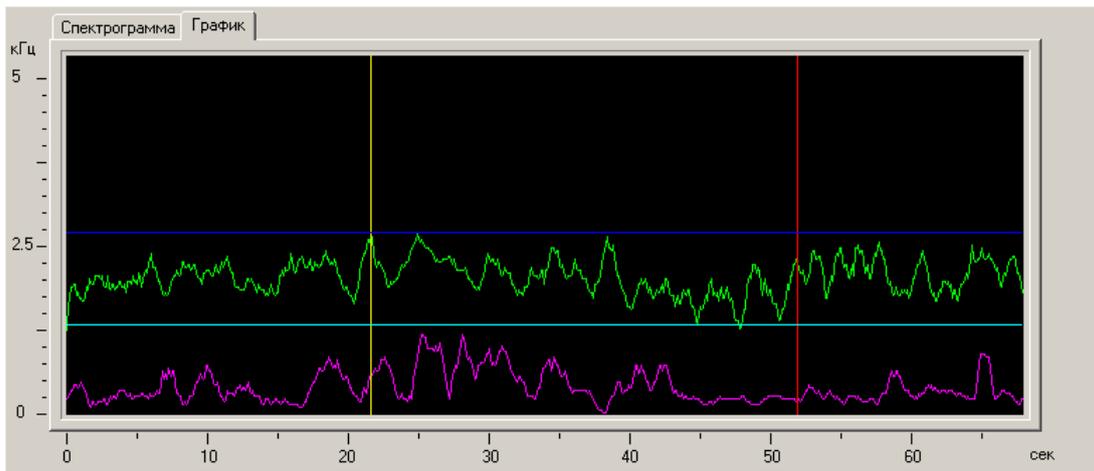


Рис. 3. Экспериментальные ЛДФ-граммы ритмических процессов колебаний ПМ

Дифференциальный анализ ритмических составляющих ПМ и выявления степени их взаимосвязи осуществляется процедурой модовой декомпозицией флоуграм на отдельные составляющие в инфранизкой области спектра 0,005 – 2Гц с одновременным обеспечением высокого разрешения, как в частотной так и временной областях.

Проведены исследования трех наиболее распространенных методов модовой декомпозиции сигналов: оконное преобразование Фурье с алгоритмом быстрого преобразования Фурье (БПФ) – Short time FFT [4]; вейвлет – преобразование [5,6]; преобразование Хуанга- Гильберта- ННЕ (E(Huang–Hilbert transform – ННТ) [7]. Отличительной особенностью оконного преобразования Фурье является необходимость применения узких скользящих временных окон с оптимизацией выбора сглаживающих (взвешивающих) функций: Хемминга, Ханна, Блэкмана и др. При этом для повышения разрешающей способности анализа во временной области следует увеличивать число участков разбиений длительности реализации сигнала (уменьшать длительность временного окна), что, с одной стороны, улучшает разрешающую способность во временной области, а с другой стороны – сильно ухудшает частотное разрешение в низкочастотной области спектра. Это существенно усложняет процедуру обработки, требует большого объема вычислений и необходимого времени анализа. Декомпозиция флоуграм с использованием прямого вейвлет-преобразования сигналов преобразует исследуемую функцию  $f(x)$  в набор вейвлет-коэффициентов  $W\psi(a, \nu)f$  согласно правилу свертки исследуемого сигнала с некоторой базисной вейвлет – функцией (анализирующим вейвлетом)

$$W\psi(a, \nu)f = \frac{1}{\sqrt{C\psi}} \int \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x) dx, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – параметры, определяющие соответственно масштаб и смещение функции  $\psi$ , называемой анализирующим вейвлетом,  $C\psi$  – нормирующий множитель.

Интегрирование ведется по всей числовой оси. В отличие от оконного преобразования Фурье, вейвлет-преобразование, при аналогичных дискретных значениях сдвигов  $b$ , дает семейства спектров масштабных коэффициентов  $a$  сжатия-растяжения  $W\psi(a, \nu)f$ , определяемых выражением (2). Многомерное временное окно вейвлет-преобразования позволяет одинаково хорошо выявлять и низкочастотные, и высокочастотные спектральные составляющие ЛДФ-граммы с одновременным определением их локализации во времени. Вместе с тем применение метода требует оптимизации выбора базисных функций. Исследования проводились с использованием базисных вейвлетов (функций) Морле и Добеши. Существенной разницы в эффективности их применении не выявлено. Рассмотренные выше методы декомпозиции имеют один общий существенный недостаток – качество получаемых результатов напрямую зависит от правильного выбора соответствующих параметров метода (типа использованного базисного вейвлета, размера окна анализа, масштаба, выбора функции

окна для спектрограммы и т.д.), что требует привлечения дополнительной априорной информации об исследуемом процессе для каждого конкретного случая.

Эмпирическая модовая декомпозиция EMD не требует априорного функционального базиса и предположений о стационарности исследуемых процессов. Функции базиса декомпозиции получаются адаптивно непосредственно из характеристик флоуграм процедурами отсеивания EMD. Следует также отметить более простую программную реализацию метода, быстрдействие и визуализацию результатов. Разработанная методика и программное обеспечение (ПО) прибора обеспечивают дифференциальный анализ ритмических процессов микроциркуляционной гемодинамики, дифференцируемой по эндотелиальной (ЭНДО: 0,0095–0,02 Гц), нейрогенной (НЕЙРО: 0,02–0,052 Гц), сенсорной пептидергической (СЕНС: 0,052–0,069), миогенной (МИОГ: 0,07–0,12 Гц) и холинергической (ХОЛИ: 0,12–0,18 Гц) активностей, включая анализ дыхательных (ДЫХ: 0,2–0,4 Гц) и сердечных (СЕРД: 0,8–1,6 Гц) компонент ритмов ПМ (рис. 4) и существенно расширяют диагностические возможности микроциркуляционной гемодинамики методами лазерной доплеровской флоуметрии. На рис. 4 приведен пример экспериментальной дифференциальной обработки ЛДФ – граммы капиллярного кровотока.



Рис. 4. Пример дифференциальной обработки (окно программного обеспечения)

В индикаторных окошках «Max» и «Min» выводятся значения максимальной и минимальной частоты ЛДФ-граммы, соответствующих максимальной и минимальной групповой скорости эритроцитов. Окошко «DF» отображает размах частот флоуграммы (Max-Min). В индикаторном окошке «T» выводится величина длительности интервала времени измерения ЛДФ-граммы, а окошко «Mean» содержит среднее значение доплеровской частоты (скорости) эритроцитов на этом интервале. Последние пять индикаторов отображают следующие параметры микрососудистого тонуса: ПМ – показатель микроциркуляции (поток); ЭККТ – эндотелиально-зависимый компонент тонуса; НТ – нейрогенный тонус; МТ – миогенный тонус; ПШ – показатель шунтирования. В связи с нестационарным процессом микрогемодинамики для определения параметров микрососудистого тонуса длительность измерения ЛДФ-граммы должна составлять около трех минут. Данные параметры вычисляются автоматически в соответствии с расчетными формулами, приведенными в [1].

### Заключение

Разработанный лазерный доплеровский флоуметр микрогемодинамики с дифференциальной оценкой ритмических компонент существенно расширяет диагностические возможности и интерпретацию широкого спектра сосудистых патологий в тканях и слизистых оболочках, включая и внутренние органы человека, для раннего обнаружения синдрома «диабетическая стопа», некротических изменений, контроля приживаемости тканей при пересадках, проявлений атеросклероза, артериальной гипертензии, тромбобразования и стеноза сосудов, контроля воздействия медицинских препаратов и физиопроцедур.

## LASER DOPPLER FLOWMETER WITH DIFFERENTIAL ANALYSIS OF THE RHYTHMIC COMPONENT OF MICROVASCULAR HEMODINAMIC

V.I. IVANOV, N.I. IVANOV, A.N. LAZARCHIK

### Abstract

The results of the development and research of laser Doppler flowmetry for the diagnosis of microvascular hemodynamics with a differential analysis of the rhythmic component are presented.

*Keywords:* laser Doppler flowmeter, microhemodynamics, tissue blood flow.

### Список литературы

1. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови. Руководство для врачей / Под ред. А.И. Крупаткина, В.В. Сидорова. М., 2005.
2. Rossi M., Carpi A., Di Maria C. et al. // *Microvasc. Res.* 2006. Vol. 72. P. 34.
3. Флоуметр лазерный доплеровский ФЛД-01. Регистрационное удостоверение Минздрава РБ ИМТ № ИМ – 7.2848.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. М., 1983.
5. Mallat S.G. // *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 1989. Vol. 11, № 7. P. 674–693.
6. Daubechies I. // *IEEE Trans. Inform. Theory.* 1990. Vol. 36, № 5. P. 961–1004.
7. Norden Huang. // *Proc. of the Royal Society of London.* London, 1998. P. 903–995.

УДК 616.853:616.831-005-007.64-001.5]-008.6

## МЕТАБОЛИЧЕСКИЕ И КЛИНИКО-РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ У ПАЦИЕНТОВ С СИМПТОМАТИЧЕСКОЙ ЭПИЛЕПСИЕЙ ПРИ РАЗОРВАВШИХСЯ АНЕВРИЗМАХ СОСУДОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Н.И. НЕЧИПУРЕНКО, Р.Р. СИДОРОВИЧ, И.Д. ПАШКОВСКАЯ,  
О.Л. ЗМАЧИНСКАЯ, Л.А. ВАСИЛЕВСКАЯ

*Республиканский научно-практический центр неврологии и нейрохирургии  
Ф.Скорины, 24, Минск, 220114, Беларусь*

*Поступила в редакцию 22 ноября 2016*

Приведены результаты исследования метаболических и клинико-радиологических изменений у пациентов двух групп с симптоматической эпилепсией или без эпилепсии при кровоизлияниях из разорвавшихся артериальных аневризм. Полученные данные свидетельствуют о развитии нарушений гипоксического характера с активацией прооксидантных реакций в обеих группах, однако у пациентов с симптоматической эпилепсией установлено значительное снижение антиоксидантной активности ферментативных и неферментативных систем защиты клеток при повышении продукции провоспалительного цитокина ФНО-альфа в отличие от группы пациентов без эписиндрома.

*Ключевые слова:* артериальная аневризма, кровоизлияние в головной мозг, симптоматическая эпилепсия, КТ-ангиография, метаболические показатели.