

Применение прибора «Speckle-Scan» для оценки состояния поверхностной микрогемодинамики в эксперименте

С. К. ДИК¹, А. С. ТЕРЕХ¹, И. И. ХЛУДЕЕВ²,
Н. И. СЧАСТНАЯ³, А. В. СМИРНОВ¹, Н. В. ВОЙЧЕНКО³

Представлены результаты численных расчетов и экспериментальные данные исследования спектров флуктуации интенсивности рассеянного динамического спекл-поля от поверхности кожи при воздействии вазодилатора и вазоконстриктора, а также при моделировании экспериментального дерматита и артрита. Полученные экспериментальные результаты находятся в хорошем соответствии с результатами численных расчетов.

Ключевые слова: спекл-поле, спектр флуктуаций интенсивности спекл-поля, микрогемодинамика.

The paper presents the result of numerical calculations, the experimental data of studying the fluctuation spectra of speckle-field intensity from a skin surface when exposed to vasodilator and vasoconstrictor, as well as the modeling of experimental dermatitis and arthritis. The experimental results obtained are in good agreement with the data of numerical calculations.

Keywords: speckle-field, fluctuation spectra of speckle-field intensity, microhemodynamics.

Аппаратная часть

Для оценки состояния кожной микрогемодинамики используют различные методы диагностики: с определением линейных и объемных скоростей кровотока – высокочастотная ультразвуковая доплерография, количественным анализом пространственно-временных показателей микрогемодинамики – лазерная доплеровская флоуметрия, с регистрацией амплитудно-частотных характеристик динамического спекл-поля, а также тепловизионные исследования. Для оценки изменений состояния кровеносных сосудов часто используются гистологические методы, например, микроскопический анализ срезов тканей и сосудов органа-мишени. Для прижизненного контроля состояния васкулярной системы в экспериментах применяются методики интравитальной микроскопии. Обычно для этого необходимо вживление подопытным животным специальных камер (ячеек) или проведение хирургического препарирования тканей, наиболее подходящих для визуального контроля (например, брыжейки, cremaster muscle). В первом случае требуется длительная предварительная подготовка животного к эксперименту, во втором – продолжительность опыта ограничена временем поддержания жизнеспособности выделенных тканей. Инвазивность можно отнести к недостаткам подобных методик исследования, поэтому в последнее время активно разрабатываются неинвазивные методы контроля состояния васкулярной системы, например, путем регистрации параметров циркуляции крови в сосудах с использованием лазерной доплеровской флоуметрии при ряде патологий [1], а также при различных внешних воздействиях [2]. Весьма перспективной является методика, основанная на анализе амплитудно-частотных характеристик спектра флуктуации интенсивности динамического спекл-поля, образованного рассеянным от поверхностных слоев биологической ткани лазерным излучением [3; 4; 5].

Разработан экспериментальный образец лазерной спекл-оптической системы контроля микроциркуляции крови «Speckle-Scan» (Рисунок 1).

Устройство включает в себя лазерный освещающий модуль, блок низковольтного питания, модуль измерения мощности лазерного излучения, модуль контроля лазерного излучения и ПЭВМ. Структурная схема прибора представлена на рисунке 2.

В состав лазерного освещающего модуля входит одномодовый полупроводниковый лазерный диод HL6501MG, сопряженный с одномодовым волоконно-оптическим световодом SM600, и коннектор типа FC. Длина волны излучения полупроводникового лазерного диода $\lambda = 660$ нм и мощность излучения на выходе волоконно-оптического световода $P_{\text{вых}} \leq 7,5$ мВт.



Рисунок 1 – Экспериментальный образец лазерной спекл-оптической системы контроля микроциркуляции крови «Speckle-Scan»

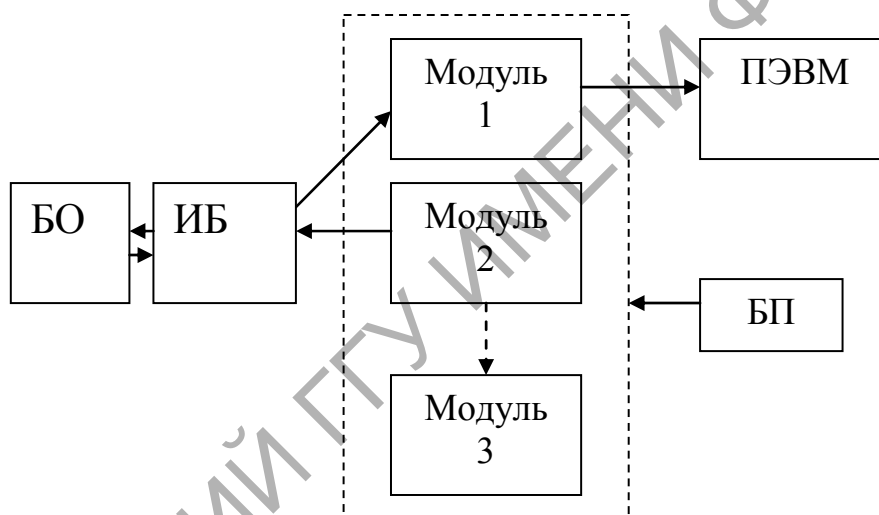


Рисунок 2 – Экспериментальный образец лазерной спекл-оптической системы контроля микроциркуляции крови «Speckle-Scan»: модуль 1 – модуль регистрации рассеянного лазерного излучения, модуль 2 – лазерный освещающий модуль, модуль 3 – модуль контроля мощности лазерного излучения, БП – блок низковольтного питания, ИБ – измерительный блок, БО – биологический объект

Блок низковольтного питания предназначен для трансформации сетевого напряжения питания (220 В, 50 Гц) в низковольтное постоянное напряжение (5 В) и обеспечивает необходимый для работы всех схем ток, составляющий 1000 мА.

Модуль регистрации рассеянного лазерного излучения состоит из приемного световода, фотоэлектронного умножителя, усилителя, аналого-цифрового преобразователя. В модуле регистрации динамического спекл-поля для обеспечения заданного порога чувствительности $1 \cdot 10^{-10}$ лм/Гц фотоприемного датчика в спектральном диапазоне 250–850 нм напряжение на выходе блока высоковольтного питания необходимо выбирать $U_{пит} \geq 1100$ В.

При освещении участка исследуемой поверхности происходит следующее: движение (колебание) диффузора или кожного покрова над скелетной мышцей при ее сокращении, либо движение клеток крови в капиллярной сети приводит к динамической трансформации спекл-поля, образованного рассеянным от кожи лазерным излучением. Рассеянное излучение попадает на выходной торец приемного световода, диаметр которого, равный 4 мкм, соизме-

рим с размерами единичного спекла. Пройдя через световод, излучение поступает на приемную площадку фотодатчика типа ФЭУ-114. На выходе фотоэлектрического умножителя формируется электрический сигнал, анализ которого позволяет получить информацию об амплитудно-частотных характеристиках вибраций диффузных объектов, биомеханических параметрах скелетных мышц человека (степень сократимости, тонус и т.д.) и изменении скорости и интенсивности кожного кровотока. С выхода фотоэлектронного умножителя сигнал поступает на усилитель, затем на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), с выхода АЦП сигнал поступает в ПЭВМ через порт USB.

В программе предусмотрена возможность выбора частотной полосы, в которой снимается сигнал.

Кроме съема данных непосредственно с прибора, есть возможность воспроизводить данные, снятые и сохраненные ранее для просмотра и обработки.

После Фурье-анализа оцифрованного сигнала возможно усреднение заданного числа спектров и работа с усредненными результатами, возможность фильтрации (сглаживания) по заданному числу точек, вывод и расчет параметров для задаваемого частотного интервала, возможность нормировки либо по площади, либо на максимальную амплитуду в задаваемом диапазоне частот, а также сравнения результатов различных измерений между собой.

При оценке изменения параметров микроциркуляции крови анализировался полосовой коэффициент (K_b) спектра интенсивности спекл-поля:

$$K_b = \frac{\int_{f_3}^{f_4} W(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} W(f) df}$$

где $W(f)$ – спектральные амплитуды, f – спектральная частота.

При расчете использовались следующие частоты: $f_1 = 200$ Гц, $f_2 = 400$ Гц, $f_3 = 400$ Гц, $f_4 = 600$ Гц. Для локального криовоздействия проводили наложение на исследуемый участок кожи аккумулятора холода в течение 5–8 минут, что позволяло достичь градиента температур более 15 градусов в сравнении с окружающими участками кожи. В качестве объекта исследования использовали участки кожного покрова передней поверхности предплечья здоровых добровольцев.

Исследование влияния вазоконстрикторов и вазодилататоров на поверхностный кровоток

Оценку изменений параметров микроциркуляции крови на исследуемых участках кожи проводили, регистрируя экспериментальные спеклограммы с помощью прибора «Speckle-Scan» и тепловизионной камеры MobIR M4 до и через определенные промежутки времени после воздействия, вызывавшего локальное изменение температуры. Параллельно производили мониторинг изменения профилей распределения температуры по поверхности кожи внутренней стороны предплечья. Установлено, что при холодовом воздействии по данным тепловизионного контроля разница температур между обрабатываемым и отдаленным участками кожи сразу после холодной пробы, через 5, 10 и 35 мин восстановительного периода составляла 20°C; 10°C; 5,2°C и 3,3°C соответственно. При регистрации микрогемоциркуляторных реакций спекл-оптическим методом наблюдали увеличение полосового коэффициента при холодовом воздействии с постепенным уменьшением его после его прекращения и достижением исходного уровня через 35 мин (рисунок 3). Таким образом, наблюдается корреляция между величиной измеряемых параметров спекл-поля и данными тепловизионного контроля.



Рисунок 3 – Изменение полосового коэффициента и температуры при холодном воздействии

При использовании аппликации препарата «Финалгон», вызывающего усиление кровотока, происходило сопутствующее увеличение температуры обработанного участка кожи (рисунок 4).

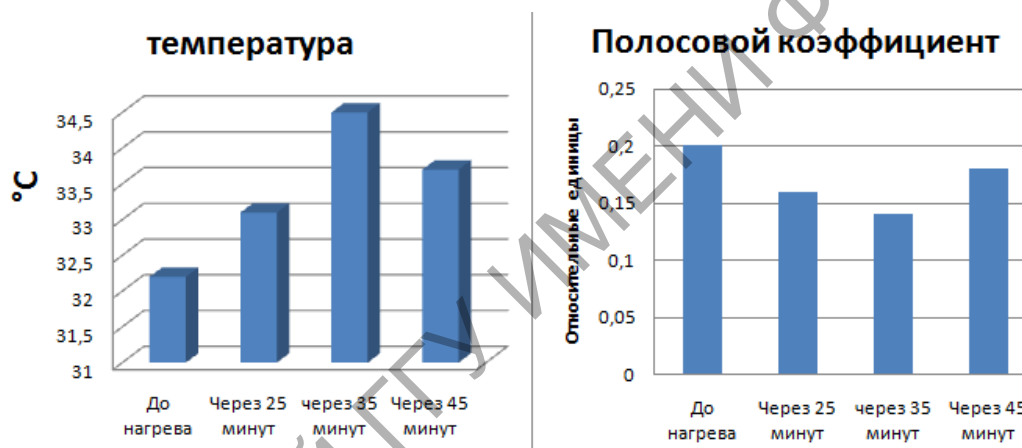


Рисунок 4 – Изменение полосового коэффициента и температуры при аппликации препарата «Финалгон» на кожу человека

Максимальное повышение температуры в зоне обработки наблюдалось через 35 минут после нанесения препарата и составляло, согласно данным тепловизионного контроля, +2,3°C по сравнению с периферийными участками кожи. Через 45 мин после нанесения препарата температура снизилась на 0,8°C. Спекл-оптические измерения зафиксировали постепенное снижение полосового коэффициента в течение 35 мин после нанесения препарата. Через 45 мин происходит увеличение полосового коэффициента.

Таким образом, наблюдается корреляция между величиной измеряемых параметров спекл-поля и данными тепловизионного контроля. При этом необходимо учитывать, что в реакции кожи на воздействия, приводящие к изменению температуры ее поверхности, могут быть задействованы, помимо вазоконстрикции и вазодилатации, и другие физиологические механизмы.

Исследование поверхностного кровотока при моделировании экспериментального дерматита

Моделирование экспериментального дерматита осуществляли путем подкожной инъекции 0,2 мл терпентинного масла на предварительно депилированном участке кожи в межлопаточной области. Исследования проводились у трех групп животных с дерматитом. Первая группа не подвергалась терапевтическим процедурам. Во второй группе ежедневно (курс

семь процедур) в течение 20-ти минут применяли переменное магнитное поле (ПМП) с индукцией 25 мТл, создаваемое аппаратом АТМ-01 (ОАО «Минский приборостроительный завод», Беларусь). На крыс третьей группы воздействовали ежедневно низкочастотным импульсным магнитным полем с теми же параметрами, генерируемым аппаратом магнитофототерапии «ФотоСПОК» (ОДО «Магномед», Беларусь).

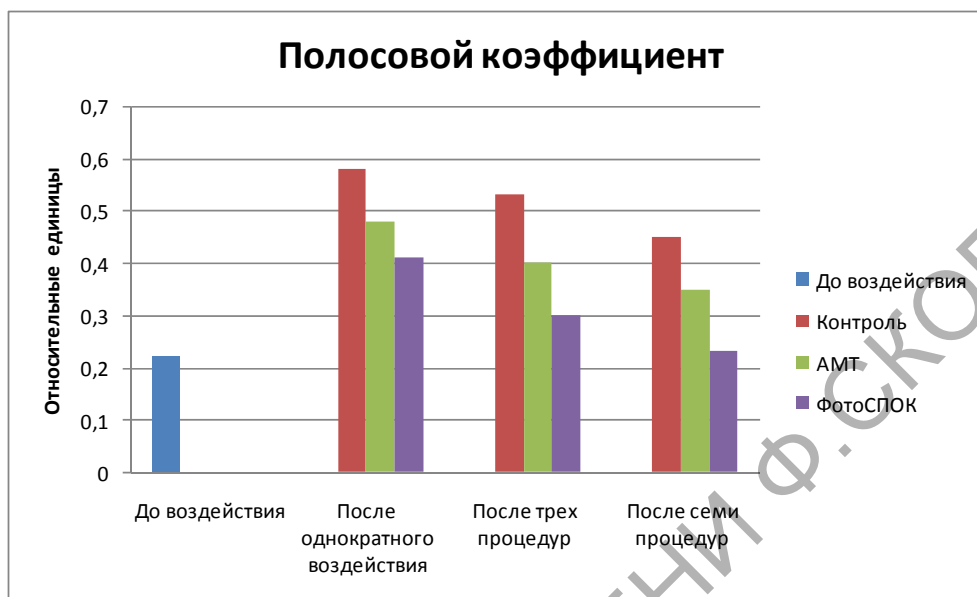


Рисунок 5 – Изменение полосового коэффициента при экспериментальном дерматите при воздействии магнитотерапии

Измерения параметров спекл-поля проводились до воздействия, после одной, трех и семи процедур магнитотерапии. После однократного воздействия магнитным полем наблюдается увеличение полосового коэффициента в контрольной группе на 0,36, под воздействием ПМП (АМТ) – на 0,26, НИМП (ФотоСПОК) – на 0,19, что свидетельствует о нарушении кровотока в исследуемых тканях. После трех процедур отмечено увеличение полосового коэффициента в контрольной группе на 0,31, под воздействием ПМП (АМТ) – на 0,81, НИМП (ФотоСПОК) – на 0,08 относительно начальных данных. После семи процедур отмечено увеличение полосового коэффициента в контрольной группе на 0,23, под воздействием ПМП (АМТ) – на 0,13, НИМП (ФотоСПОК) – на 0,01 относительно начальных данных.

Полученные данные свидетельствуют о выраженном влиянии низкочастотного импульсного магнитного поля (аппарат «ФотоСПОК») по сравнению с переменным магнитным полем (аппарат «АМТ») при экспериментальном дерматите.

Исследование поверхностного кровотока при моделировании артрита

При оценке микроциркуляции крови в поверхностных тканях крыс при моделировании артрита крысы были разделены на 5 групп: интактная группа, контрольная группа и 3 опытные группы. Данные интактной группы животных служили для определения нормативных значений параметров при исследовании микроциркуляции с помощью спеклооптического метода. С целью моделирования локального воспаления (артрит) животным контрольной и опытных групп в первый день эксперимента в голено-предплюсневый сустав правой задней лапы вводили 0,2 мл 1,5% раствора зимозана (15 мг зимозана растворяли в 1 мл 0,9% раствора NaCl).

С четвертого дня развития воспаления, вызванного введением зимозана, животным первой опытной группы на область правого голено-предплюсневых сустава осуществляли воздействие низкочастотным импульсным магнитным полем (НЧ МП), создаваемым аппаратом «ФотоСПОК». Использовались следующие параметры воздействия: величина магнитной

индукции – 25 ± 5 мТл, время воздействия – 15 мин, кратность воздействия – 1 раз в день ежедневно в течение 10 дней.

Животным второй опытной группы с четвертого дня развития артрита проводили сочетанное воздействие низкочастотным НЧ МП и монохроматическим оптическим излучением синей области спектра, создаваемым аппаратом «ФотоСПОК». Использовались следующие параметры воздействия: величина магнитной индукции – 25 ± 5 мТл, время воздействия – 15 мин, кратность воздействия – 1 раз в день ежедневно в течение 10 дней.

Животным третьей опытной группы на область правого голено-предплюсневое сустава осуществляли «озвучивание» с помощью аппарата низкочастотной ультразвуковой терапии «Тюльпан» (АНУЗТ 1-100), разработанного НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ. Параметры воздействия: частота – 22 кГц, амплитуда – 5 мкм, интенсивность – $0,4$ Вт/см², длительность воздействия – 5 минут, 1 раз в день ежедневно в течение 10 дней. В качестве контактного вещества использовали вазелин. Результаты представлены на рисунке 6.

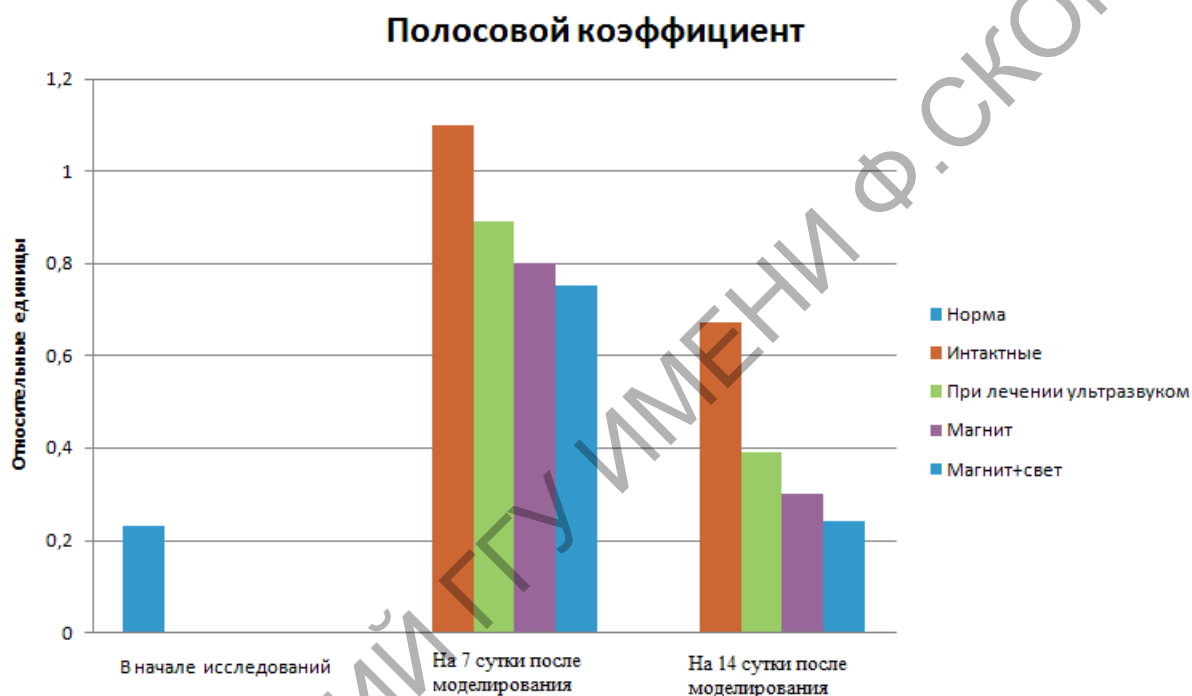


Рисунок 6 – Изменение полосового коэффициента при экспериментальном артрите

Измерения параметров спекл-поля проводились до начала моделирования, на 7-е сутки (в опытных группах после 5 процедур воздействия физическим фактором) и на 14-е сутки создания модели (после 10 процедур воздействия).

На 7-е сутки после создания модели артрита наблюдается увеличение полосового коэффициента спектра в контрольной группе на 0,87, увеличение в третьей группе – на 0,66, увеличение в первой группе – на 0,64, увеличение во второй группе – на 0,43 относительно начальных данных, что свидетельствует о нарушении кровообращения исследуемых участков. Отмечено, что под воздействием физических факторов в опытных группах происходит снижение данного показателя.

На 14-е сутки наблюдается увеличение полосового коэффициента спектра в контрольной группе на 0,44, увеличение в третьей группе – на 0,16, увеличение в первой группе – на 0,07, увеличение во второй группе – на 0,01 относительно начальных данных, что свидетельствует о восстановлении кровотока в исследуемых областях. Отмечено, что под воздействием физических факторов восстановление кровотока при экспериментальном артрите происходит быстрее и приближается к нормальным значениям в опытной группе, подвергшейся воздействию НЧ МП и монохроматическим излучением синей области спектра.

Проведенные исследования свидетельствуют об оптимальном мониторинге состояния поверхностной кожной микрогемодинамики с помощью разработанного экспериментального

образца прибора «Speckle-Scan» при курсовом воздействии физическими факторами по методике, основанной на анализе амплитудно-частотных характеристик спектра флуктуации интенсивности динамического спекл-поля.

Литература

1 Буров, Ю.А. Оценка изменений микроциркуляции у больных облитерирующим атеросклерозом артерий нижних конечностей после реконструктивных операций / Ю.А. Буров, Е.Г. Микульская, А.Н. Москаленко // Материалы IV Всероссийского симпозиума «Применение ЛДФ в медицинской практике». – М., 2002. – С. 125–128.

2 Немцов, Б.Ф. Изменение некоторых показателей микроциркуляции у больных ревматоидным артритом / Б.Ф. Немцов, Е.С. Пенкина // Материалы IV Всероссийского симпозиума «Применение ЛДФ в медицинской практике». – М., 2002. – С. 89–91.

3 Спекл-оптическое устройство для оценки поверхностного состояния кровотока и биомеханических параметров мышц: пат. на изобретение ВУ 14011 С1 27.10.10 / С.К. Дик, А.С. Терех, М.М. Король, И.И. Хлудеев, А.В. Смирнов, С.А. Лихачев.

4 Сборник статей VI Международной научно-технической конференции «МЕДЭЛЕКТРОНИКА–2010: Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии» / С.К. Дик, И.И. Хлудеев, А.С. Терех, Л.А. Василевская, А.В. Смирнов. – Минск, Беларусь, 8–9 декабря 2010. – С. 245–247.

5 Asakura, T. Dynamic properties of bio-speckles and their application to blood flow measurements / T. Asakura. – Anritsu News, 8, N38, 4–9 (1988). – P. 152–157.

6 Dick, S. Estimation of blood microcirculation in integuments by non-invasive speckle-optical method under the photodynamic action / Sergey Dick, Ivan Khludayev, Ludmila Vasilevskaya, Vladimir Zorin // Journal «Zeitschrift für Medizinische Physik». Elsevier. – Vol. 19, Issue 2, 2009. – P. 90–96.

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Поступило 08.11.11

²Белорусский государственный университет

³Институт физиологии НАН Беларуси