УДК 612.135:535.371

**Применение метода фазочувствительной модуляционной спектроскопии для оценки параметров кожного кровотока   
в синем и зелёном диапазонах видимого света**

Жеребцов Е.А., Жеребцова А.И.

Жеребцов Е.А. – к.т.н., Aston Institute of Photonic Technologies, Aston University, [zherebzow@gmail.com](mailto:zherebzow@gmail.com)

Жеребцова А.И. – к.т.н., старший научный сотрудник Научно-технологического центра биомедициской фотоники, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, [angelina.zherebtsova@yandex.ru](mailto:angelina.zherebtsova@yandex.ru)

**Аннотация.** В работе рассмотрены измерения параметров капиллярного кровотока посредством фазовых измерений задержки распространения излучения в коже при зондировании волоконно-оптическим пробником в задаче на отражение.

**Ключевые слова:** модуляционная спектроскопия, флуоресцентная спектроскопия, спектроскопия диффузного отражения, капиллярный кровоток, оптическая неинвазивная диагностика

Устройства и методы измерения капиллярного кровотока приобретают в последнее время актуальность в связи с развитием носимых устройств для оперативного мониторинга физиологических параметров организма в покое и при выполнении физических упражнений (фитнес браслеты, проекты умной одежды, умной обуви, военная форма нового поколения). Наиболее доступными для измерений в данном случае оказываются различные поверхности кожи человека. Информативными параметрами при этом являются не только сердечный ритм, но и другие физиологические ритмы модуляции кожного кровотока (миогенной, нейрогенной, эндотелиальной природы), а также общее кровенаполнение. В настоящее время в носимых устройствах наибольшее распространение получила техника фотоплетизмографии с регистрацией интенсивности отраженного излучения. Зондирование при этом ведётся, как правило, в спектральном диапазоне зелёного света. Альтернативным является подход, заключающийся в применении лазерной допплеровской флоуметрии в носимом исполнении. Измерение параметров кровенаполнения ткани также необходимо при решении задачи компенсации влияния кровенаполнения на результаты других оптических измерений, проводимых *in vivo*.

Таким образом, актуальной задачей является разработка методов надёжной, устойчивой к артефактам движения технологии регистрации кожного кровотока.

В данной работе исследуется влияние изменения кровенаполнения в коже руки на задержку фазы регистрируемого сигнала относительно зондирующего синусоидально модулированного излучения. Целью данной работы являлась оценка возможности регистрации параметров кровенаполнения, а также ритмов кровотока данным методом для задачи компенсации влияния кровенаполнения на результаты других оптических измерений, проводимых *in vivo* (измерения времени жизни флуоресценции).

Для генерации зондирующего излучения использовались светодиодные источники OSRAM с центральной длиной волны с максимальной мощностью излучения 1 Вт и длинами волн 450 нм, 528 нм и 632 нм. С помощью амплитудной модуляции протекающего тока производилась модуляция выходного излучения светодиодных источников, сопряжённых с волоконно-оптическим зондом. Расстояние источник-детектор волоконно-оптического зонда составляло 1 мм. Рассеянное в коже излучение регистрировалось с помощью лавинного фотодиода APD430A2/M. Сигнал с фотодетектора подавался на цифровой измеритель разности фаз Moku:Lab (Liquid Instruments), с помощью которого регистрировался сдвиг фаз относительно сигнала модуляции источников излучения. Установка нуля осуществлялась по поверхности стандарта отражения, выполненного из спектралона, в результате чего фазовый шум измерительной системы был оценен на уровне ±0,05°.

С помощью описанной установки была выполнена регистрация сдвига фаз в коже дистальной фаланги среднего пальца руки при выполнении окклюзионной пробы. Для каждой длины волны была выполнена серия из 5 экспериментов. При частоте модуляции 15,9 МГц излучения с длиной волны 450 нм максимальный сдвиг фаз, обусловленный пульсом, был оценен на уровне 6,1±2,7°. Увеличение сдвига фазы, вызванное уменьшением кровенаполнения при окклюзионной пробе, было оценено на уровне 12,5±3,2°. На длине волны 528 нм максимальный сдвиг фаз, обусловленный пульсом, составлял 5,3±3,1°. Аналогичное увеличение сдвига фазы, вызванное уменьшением кровенаполнения при окклюзионной пробе, было оценено на уровне 8,0±3,5°. Измерение фазовой задержки на длине волны 632 нм показало, что кровенаполнение оказывает значительно меньшее влияние. В данной конфигурации оптического зонда влияние пульса на этой длине волны едва регистрируется с максимальной амплитудой фазового сдвига 0,3±0,2°.

Предложенный подход показал высокую чувствительность в оценке параметров кожного кровотока в синем и зелёном диапазонах видимого излучения. В то же время следует отметить, что на изменение сигнала при окклюзионной пробе на длине волны 450 нм может влиять изменение количества окисленных форм FAD, что также может внести свой вклад в результирующую задержку сигнала. В то же время, измерения в зелёной области спектра такой составляющей иметь не будут. В перспективе предлагается применять фазовые измерения на длине волны 528 нм для измерения фоновой задержки сигнала, обусловленной влиянием крови, а также структурными составляющими кожи для получения более достоверных данных о времени жизни флуоресценции компонентов пары NADH/FAD.

**Application of phase-sensitive modulation spectroscopy for evaluation the parameters of cutaneous blood flow in blue and green ranges of visible light**

Zherebtsov E.A., Zherebtsova A.I.

**Abstract.** The measurements of capillary blood flow parameters were considered in the study. We applied phase measurements of a delay of radiation propagation in skin at probing by a fiber-optical probe in the reflection problem.

**Keywords:** modulation spectroscopy, fluorescent spectroscopy, diffuse reflection spectroscopy, capillary blood flow, optical noninvasive diagnostics