

УДК 621.383:615.47

## ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО СВЕТОДИОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИНАМИКИ КРОВОТОКА И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ МЫШЦ В БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЯХ

<sup>1</sup>Л.А. ВАСИЛЕВСКАЯ, <sup>2</sup>М.М. САЛИМИ ЗАДЕХ

<sup>1</sup>Республиканский научно-практический центр неврологии и нейрохирургии, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15 ноября 2018

**Аннотация.** С использованием спекл-оптического метода исследованы кровотоки в кожных покровах височной области и функциональное состояние мышц. Показано, что спекл-оптический метод может применяться для объективизации кожного кровотока и оценки сосудистой реактивности при задержке дыхания и гипервентиляции. Полученные объективные данные тонического состояния передней большеберцовой мышцы здоровых людей могут быть использованы в клинике в качестве показателей нормы при сравнения с результатами обследования пациентов с заболеваниями двигательной сферы и патологией нервно-мышечного аппарата, а также в спортивной медицине.

**Ключевые слова:** спекл, микрогеодинамика, кровотоки, функциональная активность мышц, передняя большеберцовая мышца, спекл-оптика.

**Abstract.** The blood flow in the skin of the temporal region and the functional state of the muscles were investigated using the speckle-optical method. It is shown that the speckle-optical method can be used to objectify the skin blood flow and to evaluate vascular reactivity during breath-holding and hyperventilation. Obtained objective data of the tonic state of the anterior tibial muscle of healthy people can be used as indicators of the norm in the clinic for comparison with the results of examinations of patients with diseases of the motor sphere and the pathology of the neuromuscular apparatus, as well as in sports medicine.

**Keywords:** speckle, microgeodynamics, blood flow, functional muscle activity, anterior tibialis muscle, speckle-optics.

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 117, No. 7, pp. 133-138**

**Optical system on the basis of a laser LED for control of the dynamics  
of the blood flow and functional state of the muscles in biological tissues**

**L.A. Vasilevskaya, M.M. Salimi Zadeh**

### Введение

Для определения информативных параметров спектра флуктуации интенсивности динамических спекл-картин, позволяющих оценить состояние кровотока в биоткани, была использована лазерная спекл-оптическая система контроля микроциркуляции крови [1, 2].

Расходимость лазерного излучения  $\alpha$  на выходе одномодового световода, определенная экспериментально, составила  $\sim 6^\circ$ . Торец освещающего одномодового световода размещался на расстоянии  $S_2$  от исследуемой поверхности биологического объекта (БО). Это расстояние равно 7 мм. В зависимости от степени освещенности исследуемой зоны поверхности одинаковые колебания приводят к различающимся изменениям сигнала, что вызывает погрешности при проведении исследования. Для предотвращения подобных неточностей применена схема усилителя с нормировкой входного сигнала.

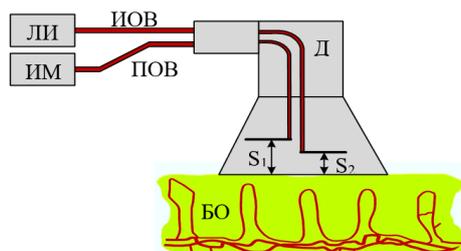


Рис. 1. Оптическая схема датчика: ЛИ – лазерный источник; ИМ – измерительный модуль; ИОВ – излучающее оптическое волокно; ПОВ – приемное оптическое волокно; Д – датчик; БО – биологический объект

Основным требованием к компоновке модулей системы является минимизация уровня их помех, воздействующих на фотоприемник. Разработанное программное обеспечение комплекса обеспечивает не только регистрацию данных, но также Фурье-анализ и статистическую обработку полученных результатов. В системе предусмотрен программный выбор частотной полосы, в которой снимается сигнал, а также воспроизведение данных, снятых и сохраненных ранее, для просмотра и обработки. После выполнения Фурье-анализа сигнала предусмотрена возможность усреднения заданного числа спектров и работа с усредненными результатами. Имеется возможность фильтрации или сглаживания по заданному числу точек, вывода и расчета параметров для заданного частотного интервала, нормировки по площади или по максимальной амплитуде в заданном диапазоне частот, сравнения различных измерений между собой.

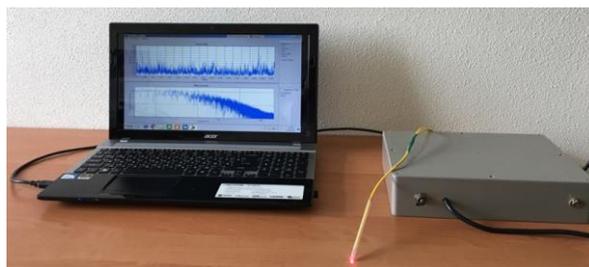


Рис. 2. Внешний вид макетного образца лазерной спекл-оптической системы контроля микроциркуляции

Целью работы является создание спекл-оптических методик для контроля динамики кровотока, оценки эффективности лечения при фотодинамической терапии, диагностики ряда заболеваний в клинической практике.

### **Методика использования спекл-оптической характеристики микрогемодинамики кожных покровов височной области у пациентов с артериальными аневризмами**

Функциональное состояние кожной микрогемодинамики (МГД) изучали неинвазивным спекл-оптическим методом с использованием устройства Speckle-SCAN, представляющего собой лазерную спекл-оптическую систему контроля микроциркуляции крови [2].

Статистическую обработку полученных результатов исследований проводили с применением пакета прикладных программ Statistica 10.0. Данные обрабатывались с помощью непараметрических методов исследования. Результаты представлялись в виде медианы и интерквартильного интервала (Me (25<sup>0</sup>/<sub>00</sub>; 75<sup>0</sup>/<sub>00</sub>). Учитывались абсолютные числа и относительные величины в процентах (%). Статистически значимыми считались значения  $p < 0,05$ .

Спекл-оптическое исследование сосудистой реактивности в условиях ЗД и ГВ проведено у 21 пациента с неразорвавшимися АА, диагностированными с помощью компьютерной томографической ангиографии. У пациентов с АА адекватная вазодилататорная реакция сосудов микрогемодициркуляторного русла кожных покровов височной области интактной стороны в условиях выполнения теста с ЗД зарегистрирована в 10 случаях (48 %). При этом в 94 % случаев наблюдаемые реакции были своевременными и развивались в течение 2 мин после восстановления дыхания (табл. 1).

Таблица 1. Динамика показателей кожной МГД в области висков на интактной стороне у пациентов с АА с адекватными реакциями при выполнении пробы с ЗД (медиана и квартили),  $n = 16$

| Показатели МГД           | До ЗД (фон)         | Период восстановления дыхания       |                                   |                    |                    |                    |
|--------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                          |                     | 1 мин                               | 2 мин                             | 3 мин              | 4 мин              | 5 мин              |
| $S$ , отн. ед.           | 10116<br>6178–18794 | 14427<br>10454–24820<br>$p = 0,007$ | 10251<br>6353–22612<br>$p = 0,07$ | 7943<br>3474–13915 | 5864<br>3998–13477 | 6412<br>3055–11922 |
| $\langle f \rangle$ , Гц | 139,5<br>135–155    | 139<br>136–143                      | 145<br>129–157                    | 149<br>130–163     | 149<br>135–162     | 141<br>140–156     |
| $Kb$ , отн. ед.          | 0,25<br>0,22–0,27   | 0,21<br>0,20–0,25<br>$p = 0,05$     | 0,24<br>0,22–0,27                 | 0,28<br>0,24–0,33  | 0,31<br>0,23–0,36  | 0,28<br>0,22–0,32  |

Примечание: здесь и в табл. 2–5  $p$  – значения статистически значимы по сравнению с фоном

Выявлена тенденция к возрастанию средней частоты спектра кривой кожной МГД в этих условиях на 2 и 5 % соответственно на 2-й и 3-й мин после окончания ЗД по сравнению с фоном. При исследовании динамики спекл-оптических показателей на контралатеральной стороне с диагностированными аневризмами в 76 % случаев (16 чел.) зарегистрированы адекватные реакции сосудов микрогемодикуляторного русла кожных покровов виска на гиперкапнию, что статистически не отличалось от количества адекватных сосудистых реакций пациентов этой же группы на противоположной здоровой стороне,  $p = 0,06$  (табл. 2.).

Таблица 2. Динамика показателей кожной МГД в области висков на стороне с АА у пациентов в условиях выполнения пробы с ЗД (медиана и квартили),  $n = 16$

| Показатели МГД           | До ЗД (фон)        | Период восстановления дыхания      |                    |                    |                    |                    |
|--------------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                          |                    | 1 мин                              | 2 мин              | 3 мин              | 4 мин              | 5 мин              |
| $S$ , отн. ед.           | 9073<br>7211–17596 | 12903<br>9658–19115<br>$p = 0,039$ | 8550<br>6483–21393 | 9460<br>5326–15615 | 8897<br>5477–19726 | 9036<br>5661–16584 |
| $\langle f \rangle$ , Гц | 138,5<br>128–149   | 138<br>138–130                     | 145<br>129–160     | 141<br>129–148     | 142<br>134–156     | 135<br>129–148     |
| $Kb$ , отн. ед.          | 0,23<br>0,215–0,27 | 0,22<br>0,197–0,26                 | 0,25<br>0,217–0,29 | 0,24<br>0,219–0,29 | 0,23<br>0,214–0,30 | 0,25<br>0,20–0,31  |

В табл. 3 представлена динамика спекл-оптических показателей адекватной сосудистой реактивности на ГВ на интактной стороне. Установлено снижение мощности спектра  $S$  в течение 1-й, 2-й и 3-й мин на 26 % ( $p = 0,033$ ), 33 % ( $p = 0,019$ ) и 19 % ( $p = 0,039$ ) соответственно с последующей ее нормализацией в постгипервентиляционном периоде. Направленность изменений средней частоты спектра и полосового коэффициента спектра носила противоположный характер с преимущественным статистически не значимым увеличением значений в период восстановления дыхания после окончания ГВ.

Таблица 3. Динамика показателей кожной МГД в области висков на интактной стороне у пациентов с АА в условиях выполнения пробы с ГВ (медиана и квартили),  $n = 13$

| Показатели МГД           | До ГВ (фон)         | Период восстановления дыхания     |                                   |                                    |                     |                              |
|--------------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------|
|                          |                     | 1 мин                             | 2 мин                             | 3 мин                              | 4 мин               | 5 мин                        |
| $S$ , отн. ед.           | 11922<br>8154–30246 | 9356<br>4663–13251<br>$p = 0,033$ | 7929<br>5261–14929<br>$p = 0,019$ | 10592<br>7818–17342<br>$p = 0,039$ | 10362<br>7781–21201 | 11030<br>6504–19979          |
| $\langle f \rangle$ , Гц | 136<br>129–141      | 137<br>128–144                    | 140<br>135–143                    | 142<br>132–153                     | 142<br>130–160      | 142<br>130–157<br>$p = 0,07$ |
| $Kb$ , отн. ед.          | 0,23<br>0,195–0,27  | 0,24<br>0,204–0,33                | 0,26<br>0,227–0,32                | 0,23<br>0,201–0,33                 | 0,27<br>0,216–0,28  | 0,24<br>0,211–0,33           |

Применение спекл-оптического метода регистрации кожной МГД контралатеральных сторон височной области у пациентов с АА позволило объективизировать состояние кожного кровотока с дифференциацией реактивности сосудов головного мозга в условиях изменения газового состава крови при выполнении дыхательных проб с гипер- и гипоканией.

## Оптимизация исследования функциональной активности мышц нижней конечности с применением спекл-оптики

При клиническом обследовании пациентов с заболеваниями нервной системы, сопровождающимися поражением позвоночника или спинного мозга, а также с патологией нервно-мышечного аппарата или нарушениями в двигательной сфере актуальным является исследование функционального состояния скелетных мышц, определение их тонической активности. Объективная оценка функциональной активности мышц у этих пациентов возможна при наличии количественных показателей, установленных у здоровых людей и принятых за норму. Используемая в экспериментальных и клинических исследованиях миотонметрия недостаточно пригодна для объективизации мышечного тонуса и оценки функционального состояния мышц, поскольку является малоинформативной.

Исследовано тоническое состояние мышц 20 здоровых добровольцев, медиана возраста которых равна 48 годам (от 43 до 58 лет). Разработан алгоритм исследования биомеханических параметров мышц голени у здоровых добровольцев с применением метода спекл-оптической диагностики функциональной активности передней большеберцовой мышцы – разгибателя стопы с определением сократительных и релаксационных свойств. Исследования проводились в условиях выполнения тестов с функциональной нагрузкой различного характера (статической нагрузкой – напряжением мышц при максимальном произвольном сокращении передней большеберцовой мышцы в условиях разгибания стопы и динамической нагрузкой – измерением тонуса мышц после 20-кратного сгибания и разгибания стопы в ранний период релаксации).

Статистическая обработка полученных результатов проводилась с применением пакета прикладных программ Statistica 10.0. Основной массив данных обрабатывался с помощью непараметрических методов исследования. Результаты представлялись в виде медианы и интерквартильного интервала  $Me$  (250/00; 750/00). При сравнении зависимых выборок применялся критерий Уилкоксона. Учитывались абсолютные числа и относительные величины в процентах (%). Статистически значимыми считались значения  $p < 0,05$ . Спекл-оптические показатели функционального состояния мышц регистрировались с помощью лазерного устройства Speckle-SCAN для неинвазивной оценки биохимических характеристик мышц и поверхностной микрогемодинамики [3]. При сопоставлении значений спекл-оптических показателей на правой и левой нижних конечностях у здоровых людей в покое и в условиях выполнения различных тестов асимметрии изучаемых параметров на контралатеральных конечностях не установлено. Результаты спекл-оптического исследования тонуса передней большеберцовой мышцы у здоровых лиц на обеих ногах представлены в табл. 4, а в условиях выполнения теста «сокращение с усилением» – в табл. 5.

Таблица 4. Спекл-оптические показатели тонуса передней большеберцовой мышцы в различных условиях функциональной активности,  $Me$  (250/00; 750/00),  $n = 40$

| Функциональное состояние мышцы                                      | Спекл-оптические показатели        |  |   |
|---|------------------------------------|--|---|
|   | Мощность спектра $S$ , отн. ед.    | Средняя частота спектра $\langle f \rangle$ , Гц | Полосовой коэффициент $Kb$                        |
| 1. Исходные значения (состояние покоя)                              | 2275<br>1749; 3318                 | 23,2<br>20,9; 25,8                               | 0,45<br>0,35; 0,6                                 |
| 2. Сокращение мышцы со статической физической нагрузкой             | 2180<br>1740; 2930<br>$p = 0,016$  | 24,6<br>22,4; 27<br>$p = 0,001$                  | 0,52<br>0,4; 0,6<br>$p = 0,001$                   |
| 3. Состояние покоя после теста с динамической физической нагрузкой  | 2530<br>1820; 3365<br>$p = 0,03$   | 23,1<br>20; 25                                   | 0,44<br>0,36; 0,56                                |
| 4. Сокращение мышцы после теста с динамической физической нагрузкой | 2040<br>1590; 2500<br>$p_1 = 0,02$ | 25<br>23; 27,5<br>$p = 0,001$<br>$p_1 < 0,001$   | 0,56<br>0,45; 0,7<br>$p = 0,001$<br>$p_1 < 0,001$ |

Таблица 5. Динамика спекл-оптических показателей мышечной активности (прирост, в % к исходным значениям) у здоровых лиц в условиях выполнения теста «сокращение с усилением»,  $n = 40$

| Функциональное состояние мышцы      | Спекл-оптические показатели    |  |                               |   |
|-------------------------------------|--------------------------------|--|-------------------------------|---|
|                                     | Мощность спектра $S$ , отн. ед | Средняя частота спектра $\langle f \rangle$ , Гц | Полосовой коэффициент $Kb$    | Частота основной спектральной гармоники $\langle f \rangle_0$ |
| 1. Состояние покоя                  | 0                              | 0  | 0                             |   |
| 2. Сокращение мышцы                 | 4<br>-22; 50                   | 32<br>13; 54<br>$p = 0,001$                      | 120<br>40; 218<br>$p = 0,001$ | 46<br>-22; 210<br>$p = 0,04$                                  |
| 3. Состояние покоя после сокращения | 29<br>-20; 52                  | 30<br>14; 52<br>$p = 0,001$                      | 90<br>42; 190<br>$p = 0,005$  | 207<br>-4; 370<br>$p = 0,01$                                  |

### Заключение

Таким образом, для объективизации состояния кровотока и оценки сосудистой реактивности в различных функциональных условиях целесообразно анализировать амплитудно-частотные характеристики спектров флуктуации интенсивности динамического спекл-поля, образованного в результате рассеивания лазерного излучения кожными покровами височной области, косвенно характеризующие реактивность сосудов головного мозга в условиях гипер- и гипоксии. Установленный паттерн спекл-оптических показателей в условиях функционального покоя и после проведения статической и динамической физической нагрузок, а также теста «сокращение с усилением» позволил выявить наиболее информативные параметры спекл-оптической миограммы, которые являются биомеханическими характеристиками тонического состояния мышц. Динамика спекл-оптических показателей в виде возрастания значений средней частоты спектра  $\langle f \rangle$  и полосового коэффициента  $Kb$  свидетельствует об увеличении тонуса исследуемых мышц, что может быть применено для оценки исходного функционального состояния мышц, их сократительных свойств, а также постактивационных изменений, в частности, релаксационных и усталостных характеристик в условиях выполнения различных функциональных тестов.

### Список литературы

1. Characterization of blood flow rate in dental pulp by speckle patterns of backscattered light from an in vivo tooth / S.K. Dick [et al.] // J. Biomed. Opt. 2014. Vol. 19, № 10. P. 106012-1–106012-8.
2. Дик С.К. Лазерно-оптические методы и технические средства контроля функционального состояния биообъектов. Минск: БГУИР, 2014. 235 с.
3. Ходулев В.И. Электронейромиографическая характеристика функционального состояния периферических нервов при хронической воспалительной демиелинизирующей полиневропатии // Актуальные проблемы неврологии и нейрохирургии: сб. науч. тр. 2008. Вып. 11. С. 371–382.

### References

1. Characterization of blood flow rate in dental pulp by speckle patterns of backscattered light from an in vivo tooth / S.K. Dick [et al.] // J. Biomed. Opt. 2014. Vol. 19, № 10. P. 106012-1–106012-8.
2. Dik S.K. Lazerno-opticheskie metody i tehicheskie sredstva kontrolja funkcional'nogo sostojanija bioob'ektov. Minsk: BGUIR, 2014. 235 s. (in Russ.)
3. Hodulev V.I. Jelektronejromiograficheskaja harakteristika funkcional'nogo sostojanija perifericheskikh nervov pri hronicheskoy vospalitel'noj demielinizirujushhej polinevropatii // Aktual'nye problemy nevrologii i nejrohirurgii: sb. nauch. tr. 2008. Vyp. 11. S. 371–382. (in Russ.)

### Сведения об авторах

Василевская Л.А., к.м.н., в.н.с. РНПЦ неврологии и нейрохирургии.

Салими Задех М.М., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

Vasilevskaya L.A., PhD, leading researcher of NSPC of neurology and neurosurgery.

Salimi Zadeh M.M., PG student of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

**Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П.Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-25-516-69-57;  
e-mail: mehrnoosh.salimizadeh@gmail.com  
Салими Задех Мехрнуш Махмуд

**Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki st., 6.  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. +375-25-516-69-57;  
e-mail: mehrnoosh.salimizadeh@gmail.com  
Slimi Zadeh Mehrnoosh Mahmoud