

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФИЗИОТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА МИКРОЦИРКУЛЯЦИЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ БИОТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА



**С.К. Дик**

Первый проректор БГУИР, кандидат физико-математических наук, доцент



**Т.В. Гордейчук**

Ассистент кафедры инженерной психологии и эргономики, аспирант БГУИР, магистр технических наук



**М.М. Меженная**

Доцент кафедры инженерной психологии и эргономики БГУИР, кандидат технических наук



**С.Н. Табунов<sup>1</sup>**

Главный врач Санатория «Лесное»



**Г.Д. Ситник<sup>2</sup>**

Заместитель директора по организационно-методической работе РНПЦ неврологии и нейрохирургии, кандидат медицинских наук, доцент



**П.И. Никитенко**

Студентка кафедры электронной техники и технологии БГУИР



**Е.Н. Рункевич**

Студентка кафедры электронной техники и технологии БГУИР



**И.В. Кишкевич**

Студентка кафедры электронной техники и технологии БГУИР

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

<sup>1</sup>Санаторий «Лесное», Республика Беларусь

<sup>2</sup>Республиканский научно-практический центр неврологии и нейрохирургии, Республика Беларусь

E-mail: t.gordeychuk@bsuir.by

**Abstract.** The number of publications in biomedicine published and indexed annually by PubMed [1] almost doubled over the past 10 years (from 746 thousand to 1354 thousand). This leads to a deterioration in the quality of search and cataloging of scientific publications and it becomes increasingly difficult for scientists to find the necessary information. There is a need to transform unstructured scientific texts into structured formats (XML, JSON). In this task, the quality of recognition of named entities in textual information is of great importance.

**Введение.** Мониторинг состояния системы микроциркуляции как основного звена, обеспечивающего метаболический гомеостаз в органах и тканях, является одной из важных проблем современной медицинской диагностики, так как функциональные и морфологические изменения в микроциркуляторном русле наблюдаются при многих заболеваниях: сердечно-

сосудистых осложнениях, атеросклерозе, сахарном диабете, хронической венозной недостаточности и других [1]. В настоящее время мониторинг микроциркуляционной функции ограничен по ряду причин, основными из которых являются: существование ограниченного числа безопасных методов исследования и сложность интерпретации получаемых данных.

Для изучения системы микроциркуляции все чаще применяются оптические методы диагностики, обладающие следующими преимуществами: высокой точностью и чувствительностью, дистанционностью, высоким пространственным разрешением и воспроизводимостью результатов измерений [2]. По сравнению с традиционно используемыми в медицинской практике морфологическими исследованиями, проводящимися в большинстве случаев биопсийным методом, отражающими состояние микроциркуляции только в конкретной точке и не дающие представлений о динамических процессах, данные методы характеризуются неинвазивностью и безопасностью для пациента [2,3]. Возможность проведения диагностики состояния сосудистой системы и микроциркуляции крови в режиме реального времени обеспечивается рядом оптических методов: лазерная доплеровская флуометрия, доплеровская оптическая когерентная томография, интравитальная микроскопия, магнитнорезонансная томография и ангиография, транскраниальная доплерография, лазерная спекл-визуализация и др. Однако, некоторые из них имеют ряд существенных ограничений: недостаточно высокое пространственное и временное разрешение, ограниченность информации о потоке частиц, особенно при сканировании по глубине биоткани, инвазивность измерений и др. [4]

*Основная часть.* Оптические методы являются перспективным инструментом диагностики и лечения заболеваний человека вследствие присущих им преимуществ: бесконтактность, высокая точность и чувствительность, дистанционность, высокое пространственное разрешение и воспроизводимость результатов измерений [1,2].

Использование оптических методов для исследования кожного покрова человека позволяет оценить состояние биологических тканей на различной глубине и с различной разрешающей способностью. По сравнению с традиционно используемой в медицинской практике биопсией данные методы характеризуются неинвазивностью и безопасностью для пациента. При этом большинство современных оптических методов (дерматоскопия, оптический видеомониторинг, оптическая топометрия, 3D-моделирование кожи, оптическая когерентная томография) нацелены на анализ морфологических характеристик кожи на клеточном уровне, что существенно повышает их стоимость и усложняет техническую реализацию [1-3]. В связи с этим актуальной является задача разработки методов и технических средств, реализующих возможность проведения экспресс-диагностики заболеваний и системных нарушений кожи, а также позволяющих осуществлять контроль эффективности терапевтических процедур. Одним из перспективных направлений в изучении системы микроциркуляции является лазерная спекл-визуализация, основанная на использовании лазерного излучения для исследования биоспеклов кожи.

Актуальной задачей данного направления является разработка устройства и программного обеспечения для реализации метода исследований динамических биоспеклов. Данный метод обеспечивает визуализацию кровеносных сосудов и обнаружение в исследуемой области без инвазивного вмешательства относительных изменений капиллярного кровотока, связанных со снижением либо повышением его интенсивности. [1,5].

Биологические ткани являются оптически неоднородными поглощающими средами, средний показатель преломления которых выше, чем у воздуха, поэтому взаимодействие лазерного излучения с ними определяется процессами отражения, поглощения, рассеивания и проникновения. [7]. Метод исследования динамических биоспеклов кожи основывается на анализе параметров динамического спекл-поля, которое образуется в результате интерференции отраженного или рассеянного биообъектом когерентного излучения. Спекл-поле в плоскости наблюдения формирует картину, состоящую из множества спеклов (пятен), интенсивность света и форма которых изменяются при наличии в объекте движущихся рассеивателей

(клетки покровной ткани и форменные элементы крови) [6].

Оптические свойства дермы и скорость кровотока изменяются не только при развитии патологических процессов в организме человека (гипо- и гипертермия, посттравматическое нарушение кровоснабжения конечностей, диабетическая микроангиопатия, экзема, ангииты кожи и онкологические заболевания кожи), но и возникают как ответ на различные внешние физиотерапевтические факторы воздействия [3].

В качестве физиотерапевтических факторов активации терморегуляционных механизмов организма человека, сопровождающихся в том числе и изменениями в микроциркуляции, могут выступать различные физиотерапевтические процедуры: инфракрасная (ИК) терапия, криотерапия, гипербарическая оксигенация (ГБО).

Влияние инфракрасного излучения на организм человека проявляется в его нагреве, который способствует расширению и увеличению количества функционирующих капилляров в покровных тканях тела человека, облегчению продвижения крови по артериям, повышению скорости кровотока [8].

Криотерапия представляет собой совокупность физических методов лечения, основанных на использовании холодного фактора для отведения тепла от тканей, органов или всего тела человека, в результате чего их температура снижается в пределах криоустойчивости (5-10 С) без выраженных сдвигов терморегуляции организма. [9]. Воздействие холодом приводит к выраженным фазовым изменениям деятельности периферических сосудов, которые проявляются сначала спазмом мелких артерий и артериол, прекапиллярных сфинктеров, замедлением скорости кровотока и повышением вязкости крови. Фазовые изменения состояния сосудов кожи и подкожной клетчатки дают адекватную тренирующую нагрузку системе кровообращения [10].

ГБО заключается в лечении кислородом под давлением в медицинских бароаппаратах. Эффект применения ГБО проявляется в увеличении кислородной ёмкости крови. Сущность метода заключается в повышении содержания кислорода в тканях организма, что достигается вдыханием кислорода под повышенным давлением. Под влиянием кислородного насыщения стимулируются и нормализуются биохимические процессы в мозге, миокарде, печени. ГБО мобилизует собственные системы организма, отвечающие за обезвреживание и выведение токсинов, повышает метаболические системы защиты мозга, сердца, печени, почек от отравляющего воздействия аммиака при нарушении кровоснабжения органов.

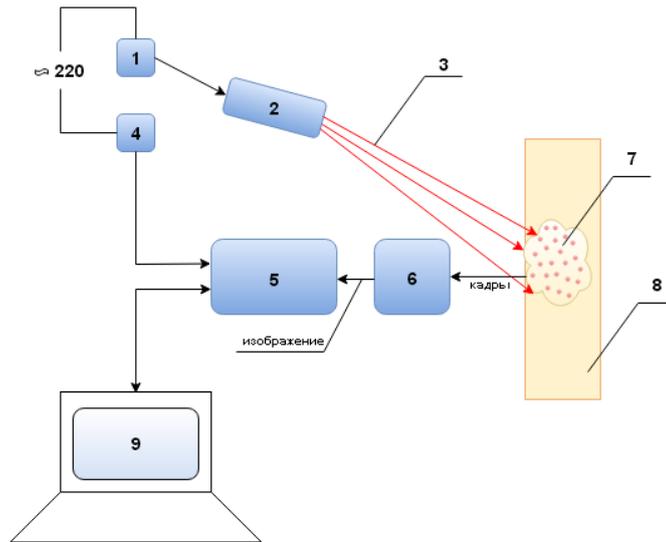
В данной работе представлены результаты применения разработанного авторами аппаратного и программного обеспечения динамического измерения биоспектров для мониторинга микроциркуляции человека до и после проведения физиотерапевтических процедур.

*Аппаратное и программное обеспечение исследований биоспектров кожи.* Регистрация динамических биоспектров кожи выполнялась на базе устройства, схема которого приведенного на рисунке 1. На исследуемый участок кожного покрова человека фокусируется пучок лазерного излучения, интерференционная картина рассеянного биообъектом лазерного излучения регистрируется с помощью видеокамеры, снабженной специальной оптической системой. Полученная видеoinформация поступает на персональный компьютер для отображения и цифровой обработки.

Для видеорегистрации динамических спекл-полей использовалась высокоскоростная камера с интерфейсом GigE, объективом Kowa LM50HC, CCD-матрицей и частотой 120 кадров в секунду при разрешении VGA.

Регистрируемые со скоростью 120 кадров в секунду спекл-изображения подвергались цифровой обработке. Целью цифровой обработки являлся расчет контрастности для каждого пикселя спекл-изображения.

Для реализации поставленной задачи выполнялась пространственно-временная обработка спекл-изображений на базе модификации метода LASCA.



1 – блок питания лазера; 2 – лазер; 3 – лазерное излучение; 4 – блок питания видеокамеры; 5 – видеокамера; 6 – оптическая система; 7 – стекл-картина; 8 – биообъект, 9 – персональный компьютер

Рис. 1. Схема (а) и реальный вид (б) устройства динамического измерения биоспеклов кожи

В соответствии с методом tLASCA расчет значения контрастности для каждого пикселя спекл-изображения выполняется для центральной точки в окне  $3 \times 3$  по  $n=10$  накопленным кадрам:

$$K_{tLASCA(i,j)} = \frac{1}{9} \cdot \sum_{r=i-1}^{r=i+1} \sum_{c=j-1}^{c=j+1} \frac{\sigma_{i,j,t}}{\langle I_{i,j,t} \rangle}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{i,j,t}$  – среднеквадратическое отклонение всех пикселей в пространственной  $(i, j)$  и временной  $(t)$  областях, полученное для векторизированной трёхмерной матрицы;

$I_{i,j,t}$  – среднее арифметическое значение интенсивности всех пикселей в пространственной  $(i, j)$  и временной  $(t)$  областях.

Таким образом, при использовании окна минимального размера единичный пиксель результирующего кадра содержит в себе данные до 90 соседних в пространстве и времени пикселей. При разрешении камеры 659 на 494 пикселей в обработке участвуют более 38 миллионов точек каждую секунду.

**Методика исследований.** Диагностика состояния кожного покрова человека выполнялась на базе устройства динамического измерения биоспеклов кожи с последующей цифровой обработкой спекл-изображений [6].

Исследования проводились на базе ИК камеры для низкоинтенсивного воздействия на тело человека (рис. 2, а), представляющей собой кабину с входной дверью, воздушными отверстиями и размещенными внутри нее источниками инфракрасного излучения; барокамеры «Vitaeris 320 Hyperbaric Chamber» (рис. 2, б); криосауны «Kältekammer  $-110^\circ\text{C}$ » (рис. 2, в).

Объектом исследования являлся участок кожи на пальце правой руки в форме квадрата  $10 \times 10$  мм. Расстояния от источника света, а также от объектива камеры до исследуемого участка составляли 275 мм.



Рис. 2. Физиотерапевтические аппараты: (а) ИК камера; (б) барокамера «Vitaeris 320 Hyperbaric Chamber»; (в) криосауна «Kältekammer –110°C»

На первом этапе исследования проводились в ИК камере. Продолжительность сеанса составила 30 минут. Температура внутри кабины во время сеанса составляла 39°C. Регистрировалось исходное состояние микроциркуляции исследуемых участков кожи (0 мин), после завершения сеанса (30 мин), и спустя 30 минут после завершения сеанса (60 мин). Визуальных изменений на исследуемых участках после проведения процедуры не наблюдалось. Полученные спекл-изображения показывают, что ведущей реакцией микроциркулярного кровотока в условиях гипертермии явилась его выраженная интенсификация (рис.3).

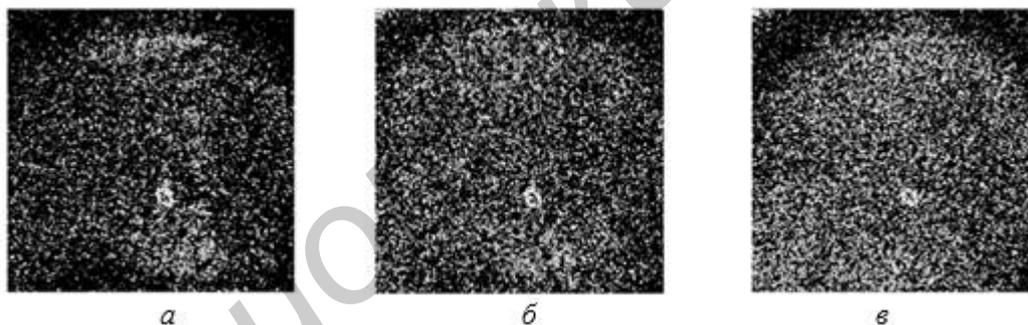


Рис.3. Спекл-изображения микроциркуляции до проведения сеанса ИК терапии (а), непосредственно после окончания сеанса ИК терапии (б), через 30 мин после окончания сеанса ИК терапии (в)

На втором этапе исследования проводились в Барокамере «Vitaeris 320 Hyperbaric Chamber». Продолжительность сеанса составила 20 минут. Регистрация микроциркуляции проводилась в исходном состоянии (0 мин), после процедуры (20 мин), спустя 30 мин после окончания процедуры (50 мин). После процедуры гипербарической оксигенации наблюдается значительное снижение кровотока, который уже через 30 мин после окончания процедуры восстанавливается (рис.4).

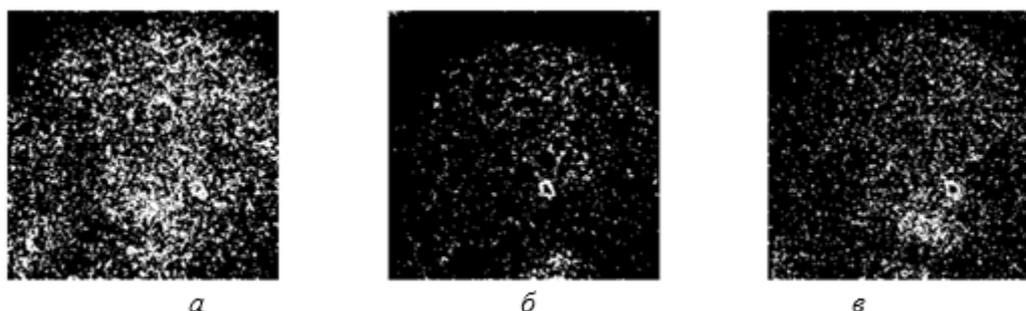


Рисунок 3 – Спекл-изображения микроциркуляции до проведения сеанса процедуры гипербарической оксигенации (а), непосредственно после окончания сеанса процедуры гипербарической оксигенации (б), через 30 мин после окончания сеанса процедуры гипербарической оксигенации (в)

На третьем этапе исследования проводились в криосауне «Kältekammer  $-110^{\circ}\text{C}$ ». Испытуемый помещался в кабину на 3 минуты, температура внутри кабины составляла  $-110^{\circ}\text{C}$ . Полученные в результате обработки спекл-изображения (рис.5) отображают снижение процессов микроциркуляции в поверхностных тканях человека непосредственно после окончания процедуры криотерапии и постепенное их восстановление спустя 30 минут.

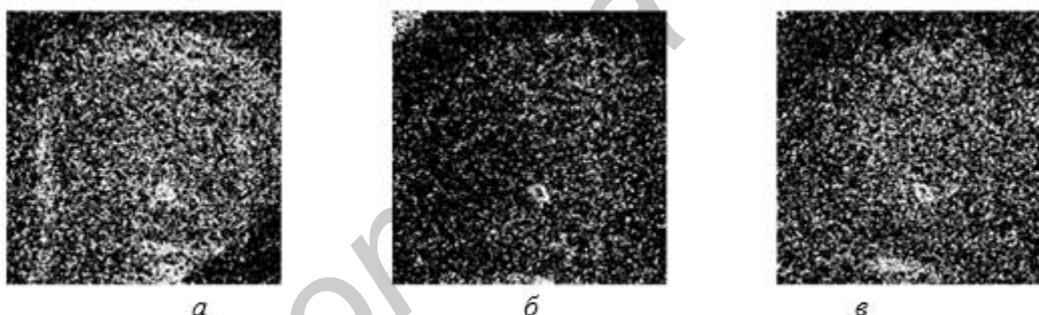


Рис. 5. Спекл-изображения микроциркуляции до проведения сеанса криотерапии (а), непосредственно после окончания сеанса криотерапии (б), через 30 мин после окончания сеанса криотерапии (в)

*Результаты исследований.* Разработанное авторами аппаратное и программное обеспечение динамического измерения биоспеклов использовано для мониторинга состояния системы микроциркуляции при воздействии различных физиотерапевтических факторов.

На основании проведенных исследований были сформулированы следующие выводы:

1 Метод динамического измерения и цифровой обработки биоспеклов кожи позволяет проводить неинвазивную диагностику в режиме реального времени и получать оптические изображения внутренней структуры поверхностного кровотока.

2 Метод динамического измерения и цифровой обработки биоспеклов кожи позволяет выявить изменения в микроциркуляции, происходящие при проведении различных физиотерапевтических процедур.

3 Результаты анализа спекл-изображений согласуются с общей реакцией микроциркулярного кровотока в условиях различных воздействий на покровные ткани человека.

Мониторинг состояния системы микроциркуляции при воздействии различных физиоте-

рапевтических факторов позволяет оценить эффективность проводимых мероприятий по профилактике и лечению функциональных систем человека.

С другой стороны мониторинг состояния системы микроциркуляции содержит диагностическую информацию, так как позволяет оценить происходящие в организме естественные адаптивные процессы терморегуляции. Значения времени для возвращения уровня микроциркуляции в исходное состояние после окончания физиотерапевтической процедуры вариабельны у каждого человека, однако важным критерием нормального функционирования регуляторных механизмов является тенденция к восстановлению исходных функциональных показателей и их последующее достижение в пределах временных параметров нормы. Иная тенденция к восстановлению функциональных показателей является поводом для прекращения сеансов физиотерапевтических процедур и последующей консультации с врачом.

Результаты исследований показали целесообразность применения метода регистрации и анализа биоспектров для оценки эффективности проводимых физиотерапевтических процедур. Кроме того, указанный метод может быть использован в разработке лечебно-диагностических комплексов, основанных на воздействии физиотерапевтических факторов, для обеспечения функций диагностики и контроля состояния микроциркуляции поверхностных биотканей, а также управления режимами воздействия.

#### *Литература*

- [1]. Тимошина П.А. Мониторинг микроциркуляции крови методом спекл-контрастной визуализации в исследованиях модельных патологий на животных диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 03.01.02. – Саратов, 2016. – 102 с.
- [2]. Дик, С. К. Лазерно-оптические методы и технические средства контроля функционального состояния биообъектов / С. К. Дик. – Минск : БГУИР, 2014. – 235 с.
- [3]. Штиршнайдер, Ю. Ю. Современные неинвазивные технологии визуализации в дерматологии / Ю. Ю. Штиршнайдер, А. В. Минченко, О. Р. Катунина, А. Р. Зубарев. – Вестник дерматологии и венерологии, вып. №5, 2011, с. 41-53.
- [4]. Виленский М.А. Спекл-корреляционный анализ микрокапиллярного кровотока ногтевого ложа / М. А. Виленский, Д. Н. Агафонов, Д. А. Зимняков, В. В. Тучин, Р. А. Задражевский. – Квантовая электроника, Т.41, №4 (2011) – С.324-328.
- [5]. Семячкина-Глушаковская О.В. Лазерная спекл-визуализация автономии мозгового кровообращения на уровне макро- и микроциркуляции у крыс / О.В. Семячкина-Глушаковская, А.С. Абдурашитов, С.С. Синдеев, В.В. Тучин. – Квантовая электроника, Т.46, №6 (2016) – С.496-501.
- [6]. Дик С.К., Меженная М.М., Завацкий Д.А., Гордейчук Т.В., Счастливая Н.И. Цифровая обработка спекл-изображений в лазерной диагностике биологических тканей Сборник материалов Второй Международной Научно-Практической Конференции «BIG DATA and Advanced Analytics BIG DATA и анализ высокого уровня» 15 — 17 июня, 2016 Минск, Беларусь. – С.282-289.
- [7]. Барун, В.В., Иванов, А.П., Волотовская, А.В. // ЖПС. 2007. Т 74. С. 391-398.
- [8]. Пономаренко Г.М. Биофизические основы физиотерапии / Г.Н. Пономаренко, И.И. Турковский. М.: "Медицина", 2006. с. 17-18
- [9]. Физиотерапия: национальное руководство / под ред. Г. Н. Пономаренко. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 864 с.
- [10]. Волотовская А.В. К 82 Криотерапия: учеб.-метод. пособие / А.В. Волотовская, Г.К.Колтович, Л.Е. Козловская, А.Н. Мумин,. – Минск: БелМАПО, 2010. – 26 с