

БИОМЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 616.8.-092:616-018

С.К. ДИК, Т.В. ГОРДЕЙЧУК, М.М. МЕЖЕННАЯ, С.Н. ТАБУНОВ*, Э.С. КАШИЦКИЙ**, П.И. НИКИТЕНКО, И.В. КИШКЕВИЧ, Е.Н. РУНКЕВИЧ

**ЛАЗЕРНАЯ СПЕКЛ-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ
КРИОТЕРАПИИ**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Беларусь*

**Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси Минск, Беларусь*

***Институт физиологии НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

В данной работе представлены результаты применения разработанного авторами аппаратного и программного обеспечения лазерной спекл-визуализации для мониторинга микроциркуляции поверхностных тканей человека до и после проведения процедуры криотерапии.

Ключевые слова: микроциркуляция, лазерная спекл-визуализация, биоспеклы, криотерапия, криосауна.

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 часто 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, они 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]

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 визуализации кровеносных сосудов и обнаружения в исследуемой области без инвазивного вмешательства относительных изменений капиллярного кровотока, связанных со снижением либо повышением его интенсивности [1,5].

В основе метода лазерной спекл-визуализации лежит представление о биологических тканях как оптически неоднородных поглощающих средах, средний показатель преломления которых выше, чем у воздуха, поэтому взаимодействие лазерного излучения с ними определяется процессами отражения, поглощения, рассеивания и проникновения. [7]. Динамическое спекл-поле образуется в

результате интерференции отраженного или рассеянного биообъектом когерентного излучения. В плоскости наблюдения спекл-поле формирует картину, состоящую из множества пятен, интенсивность света и форма которых изменяются при наличии в объекте движущихся рассеивателей (клетки покровной ткани и форменные элементы крови) [6]. Это в свою очередь позволяет проводить оценку микроциркуляции поверхностных тканей.

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 в результате воздействия внешних физиотерапевтических факторов [3].

Криотерапия (наряду с инфракрасной терапией, гипербарической оксигенацией) относится к числу физиотерапевтических факторов активации терморегуляционных механизмов организма человека, сопровождающихся изменениями микроциркуляции. В основе криотерапии лежит использование холодного фактора для отведения тепла от тканей, органов или всего тела человека, в результате чего их температура снижается в пределах криоустойчивости ($5-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) без выраженных сдвигов терморегуляции организма [8]. Воздействие холодом приводит к фазовым изменениям деятельности периферических сосудов, которые проявляются спазмом мелких артерий и артериол, замедлением скорости кровотока и повышением вязкости крови. Такие изменения состояния сосудов кожи и подкожной клетчатки создают адекватную тренирующую нагрузку системе кровообращения [9].

В данной работе представлены результаты применения разработанного авторами аппаратного и программного обеспечения лазерной спекл-визуализации для мониторинга микроциркуляции поверхностных тканей человека до и после проведения процедуры криотерапии.

Аппаратно-программное и методическое обеспечение исследований. Оценка микроциркуляции поверхностных тканей человека выполнялась с использованием разработанного авторами устройства динамического измерения биоспеклов кожи (рисунок 1,а) с последующей цифровой обработкой спекл-изображений [6]. Исследования выполнялись в санатории «Лесное» до и после процедуры криотерапии на базе криосауны «Kältekammer -110°C » (рисунок 1,б).



а



б

Рис. 1. Аппаратное обеспечение исследований: устройство динамического измерения биоспеклов кожи (а); криосауна «Kältekammer -110°C » (б)

В процессе измерения динамических биоспеклов на исследуемый участок кожного покрова фокусировался пучок лазерного излучения, сформированного красным лазером мощностью 3 мВт с длиной волны 660 нм, на которой наблюдается существенное рассеяние зондируемого излучения эритроцитами [10]. Интерференционная картина рассеянного биообъектом лазерного излучения регистрировалась с помощью высокоскоростной камеры с интерфейсом GigE, CCD-матрицей и частотой 120 кадров в секунду при разрешении VGA. Оптическая система камеры представлена объективом Kowa LM50HC.

Программное обеспечение для пространственно-временной обработки спекл-изображений на базе метода tLASCA [11] было реализовано в среде MatLab и обеспечивало расчет значения контрастности для каждого пикселя спекл-изображения для центральной точки в окне 3×3 по 12 накопленным кадрам:

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

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.

Основными особенностями разработанного и реализованного в программном обеспечении алгоритма являются: высокая скорость обработки данных, меньшие потери в разрешении итогового изображения за счет минимального размера окна, высокая точность результатов в связи с использованием значений интенсивности пикселей из ряда предыдущих кадров [6].

Лазерная спекл-визуализация микроциркуляции поверхностных тканей человека при проведении криотерапии проводилась для участка кожи в форме квадрата 10×10 мм на пальце и ладони правой руки. Исследования выполнялись до процедуры криотерапии, непосредственно после процедуры, спустя 15 минут и 60 минут после окончания криотерапии.

При проведении сеанса криотерапии испытуемые помещались в кабину на 3 минуты, температура внутри кабины составляла -110°C .

В рамках проведения исследований у испытуемых дополнительно измеряли пульс, температуру тела и артериальное давление до процедуры криотерапии, непосредственно после процедуры и спустя 60 минут после окончания криотерапии.

Результаты лазерной спекл-визуализации микроциркуляции поверхностных тканей человека при проведении криотерапии.

В исследовании приняли участие 7 человек. Примеры результатов лазерной спекл-визуализации микроциркуляции поверхностных тканей при проведении криотерапии приведены на рисунках 2-5 (испытуемые А, Б). Зарегистрированные у испытуемых А, Б физиологические показатели (пульс, температура тела и артериальное давление) представлены в таблицах 1, 2.

Полученные в результате обработки спекл-изображения отражают снижение процессов микроциркуляции в поверхностных тканях человека непосредственно после окончания процедуры криотерапии и их постепенное восстановление в процессе 60 минут после окончания процедуры.

Данный результат согласуется с характером изменений физиологических показателей в ответ на холодное воздействие в процессе проведения криотерапии, который проявляется в снижении температуры тела испытуемых, а в некоторых случаях и давления, а также увеличения частоты пульса.

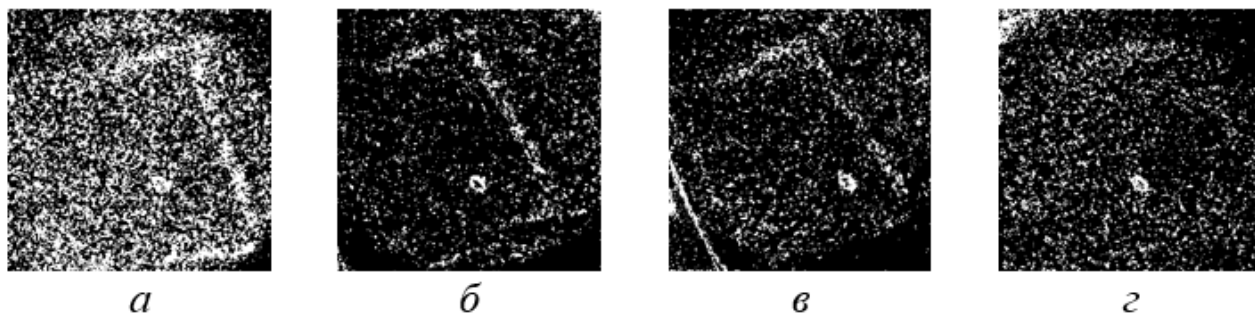


Рис. 2. Спекл-изображения микроциркуляции испытуемого А (участок кожи палец) до проведения сеанса криотерапии (а), непосредственно после окончания сеанса криотерапии (б), через 15 минут (в), через 60 мин после окончания сеанса криотерапии (г)

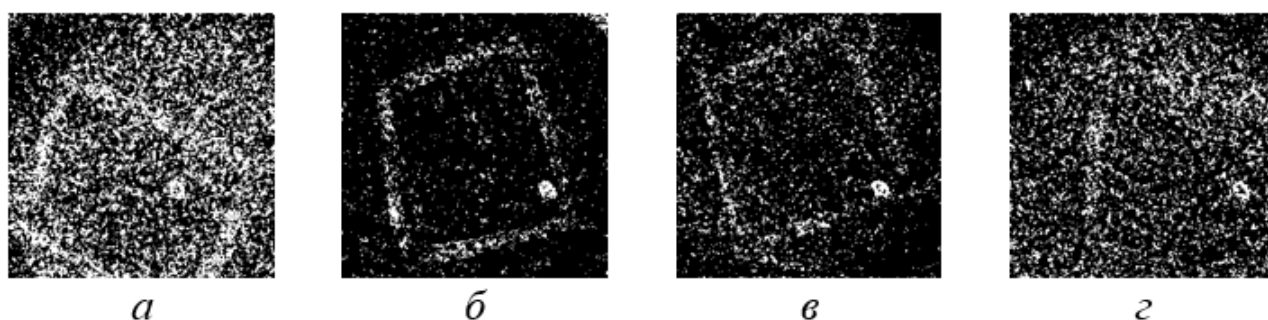


Рис. 3. Спекл-изображения микроциркуляции испытуемого А (участок кожи ладонь) до проведения сеанса криотерапии (а), непосредственно после окончания сеанса криотерапии (б), через 15 минут (в), через 60 мин после окончания сеанса криотерапии (г)

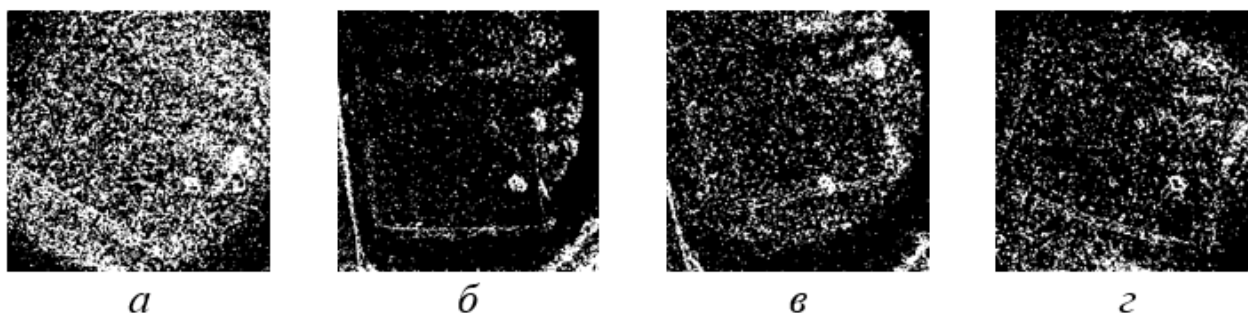


Рис.4. Спекл-изображения микроциркуляции испытуемого Б (участок кожи палец) до проведения сеанса криотерапии (а), непосредственно после окончания сеанса криотерапии (б), через 15 минут (в), через 60 мин после окончания сеанса криотерапии (г)

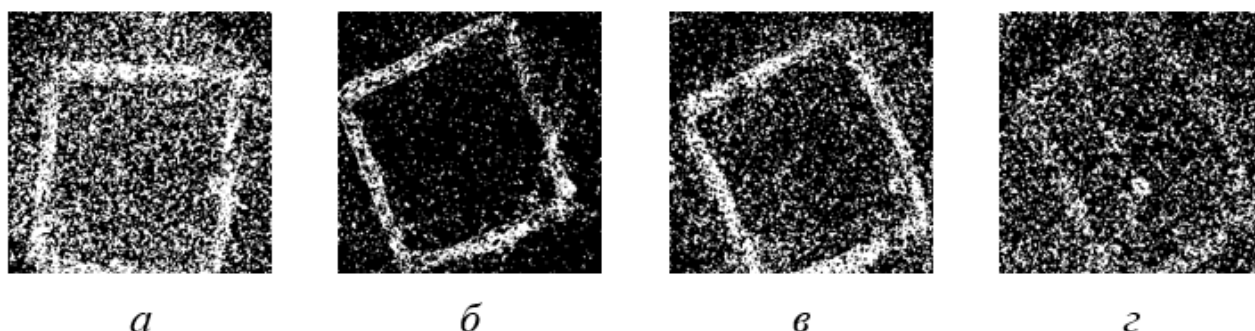


Рис. 5. Спекл-изображения микроциркуляции *испытуемого Б* (участок кожи ладонь) до проведения сеанса криотерапии (а), непосредственно после окончания сеанса криотерапии (б), через 15 минут (в), через 60 мин после окончания сеанса криотерапии (г)

Табл. 1. Значения физиологических показателей испытуемого А.

Физиологические показатели	Значения до процедуры	Значения непосредственно после окончания процедуры	Значения через 60 мин после процедуры
Давление	130/90	130/90	130/90
Пульс	66	84	78
Температура	36,8	36,6	36,2

Табл. 2. Значения физиологических показателей испытуемого Б.

Физиологические показатели	Значения до процедуры	Значения непосредственно после окончания процедуры	Значения через 60 мин после процедуры
Давление	130/80	120/80	120/80
Пульс	66	90	78
Температура	36,7	36,6	36,5

На основании проведенных исследований сформулированы следующие выводы:

1. Метод лазерной спекл-визуализации позволяет выявить изменения в микроциркуляции, происходящие при проведении криотерапии.
2. Результаты анализа спекл-изображений согласуются с общей реакцией организма человека на холодное воздействие в процессе проведения криотерапии.
3. Разработанное авторами аппаратно-программное обеспечение лазерной спекл-визуализации целесообразно использовать для неинвазивной экспресс-диагностики микроциркуляции поверхностных тканей человека и получения оптических изображений внутренней структуры поверхностного кровотока.

Мониторинг состояния системы микроциркуляции при воздействии физиотерапевтического фактора 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 переменны 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.

Заключение. Разработанное авторами аппаратно-программное обеспечение лазерной спекл-визуализации использовано для мониторинга микроциркуляции поверхностных тканей человека до и после проведения процедуры криотерапии.

Проведенные исследования показали, что метод лазерной спекл-визуализации позволяет выявить изменения в микроциркуляции, происходящие при проведении криотерапии. Результаты анализа спекл-изображений согласуются с характером изменений физиологических показателей человека в ответ на холодное воздействие в процессе проведения криотерапии.

На основании вышеизложенного сделан вывод о целесообразности применения метода регистрации и анализа биоспеклов для оценки эффективности физиотерапевтической процедуры криотерапии.

Вышеописанный метод и аппаратно-программное обеспечение планируется использовать 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]. Физиотерапия: национальное руководство / под ред. Г. Н. Пономаренко. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 864 с.

- [9]. *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
- [10]. Исследование параметров микроциркуляции крови в области ногтевого ложа с использованием метода лазерной спекл-визуализации. Д.Н. Агафонов, П.А. Тимошина, М.А. Виленский, И.В. Федосов, В.В. Тучин. Известия Саратовского университета 2011 Т.11. Сер. Физика, вып.2.
- [11]. *Le T.M.* // IEEE Transactionson Medical Imaging. 2007. Vol. 26(6). P.833-842.

Поступила в редакцию: 27.02.2017 г.

*S.K. DZIK, T.V. HARDZEICHUK, M.M. MEZHENNAYA, S.N. TABUNOV, E.S. KASHITSKII,
P.I. NIKITENKO, K.N. RUNKEVICH; I.V.KISHKEVICH*

THE SPEKL-VISUALIZATION METHOD IN THE MICROCIRCULATION RESEARCH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

**A.V. Luikov heat and mass transfer Institute of the National academy of sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

***Institute of Physiology, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

Summary

In this operation results of the application developed by authors hardware and the software of dynamic measurement of biospeckles for monitoring of microcirculation of the person when holding physiotherapeutic procedures are provided.

Key words: microcirculation, biospeckles,, spekl-image, spekl-investigation, cryosauna.