

Тепловая модификация хрящей и мониторинг с помощью спекл-модулированных изображений

М. Л. Новикова^{1,2,*}, А. В. Южаков^{2,†}, О. И. Баум^{2,‡}

¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра медицинской физики Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

² *Институт фотонных технологий РАН, «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН (Статья поступила 11.03.2019; Подписана в печать 11.03.2019)*

Неразрушающее лазерное воздействие на ткани сегодня применяется во многих сферах медицины. Создав в хряще лазерно-индуцированное поле температур, можно добиться структурных перестроек, образования пор и даже изменить форму за счет релаксации механических напряжений. В процессе воздействия лазера на хрящ происходит изменение механических и оптических свойств ткани, которые нужно отслеживать, при необходимости корректируя режим облучения. Это удобно сделать при помощи метода спекл-интерферометрии, который заключается в наблюдении за интерференционной картиной, образованной при взаимодействии монохроматического когерентного излучения с биологической тканью. В работе представлены результаты исследования временных и температурных зависимостей функции контраста и кросскорреляции. Эти зависимости могут служить основой для мониторинга лазерного воздействия на ткань в реальном времени.

PACS: 07.60.-j, 42.62.-b, 42.30.Ms

УДК: 53.06.

Ключевые слова: хрящевая ткань, лазерное облучение, спекл-интерферометрия.

ВВЕДЕНИЕ

Применение лазеров в медицине является быстро развивающейся отраслью на сегодняшний день. Известно, что такое воздействие приводит к возникновению неоднородного теплового поля внутри образца, а также поля термомеханических напряжений [1]. Эти физические процессы широко используются для модификации структуры и формы хряща в отоларингологии и ортопедии, например, для изготовления имплантов для лечения стеноза гортани или управляемой регенерации гиалинового хряща [2]. Для успешного применения метода структурных лазерно-индуцированных перестроек необходимо следить в первую очередь за температурой нагрева ткани. Хрящевая ткань содержит коллагеновые волокна, протеогликановые и гликопротеиновые комплексы, и важно не допустить их денатурации [3]. Основным параметром, который надо отслеживать для этого — температура и, например, уже была создана система контроля температуры при лазерной коррекции перегородки носа [4]. Также при облучении лазером изменяются оптические свойства хрящевой ткани [5] [6], что дает нам предпосылки для нового метода контроля режима облучения, основанного на спекл-интерферометрии [7]. Этот оптический метод представляет собой вычисление контраста интегрированного шаблона спеклов, вызванного монохроматическим когерентным облучением ткани. Таким об-

разом, можно наблюдать изменения в динамике структуры ткани и образование новых оптических центров рассеяния света.

Задачей является связать уже известные процессы, которые наблюдаются в ткани при повышении температуры, и данные, полученные из анализа спекл-контрастных изображений. Такая связь может лечь в основу системы с обратной связью для контроля режима облучения хрящевой ткани в реальном времени, что упростит мониторинг при проведении операций.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовался предварительно размороженный свиной реберный хрящ, из которого были сделаны пластинки размером $10 \times 10 \times 2$ мм. Образцы подсушивались при комнатной температуре чтобы избежать поглощения ИК-излучения избытком воды на поверхности и уменьшить зеркальное отражение зондирующего излучения. Облучение проводилось с помощью эрбиевого-волоконного лазера ($\lambda = 1.56$ мкм) мощностью до 5 Вт, подводимое оптоволокно в диаметре составляло 600 мкм. Одновременно с нагревом образец облучался зондирующим излучением He-Ne лазера. Отражаясь от образца, это излучение попадало в камеру, расположенную перпендикулярно поверхности хряща, и создавало интерференционную картину в виде спеклов.

Изменения спекловой картины, возникающие при изменении структуры ткани за счет нагрева приводили к изменениям статистических показателей контраста изображения и коэффициента корреляции Пирсона. Также измеряя температуру поверхности в процес-

*E-mail: mashundran@ya.ru

†E-mail: yuzhalvas@gmail.com

‡E-mail: baumolga@gmail.com

се нагрева с помощью ИК-камеры FLIR A615, можно было дополнительно отслеживать пороги появления структурных изменений. Каждый эксперимент проводился минимум пять раз.

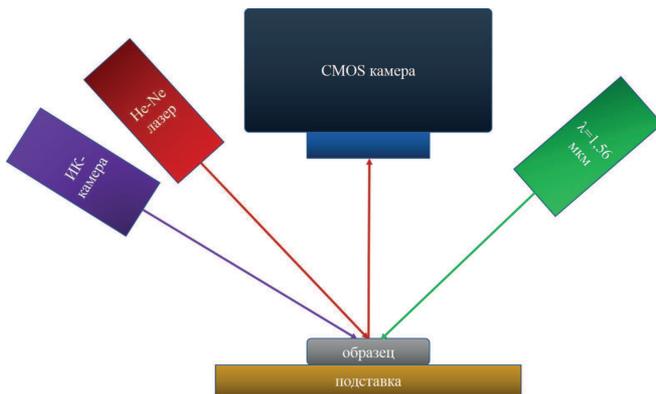


Рис. 1: Схема установки

Полученные методом спекл-интерферометрии картины обрабатывались с помощью статистических формул. Расчет производился по следующим формулам: Среднее значение интенсивности одного кадра:

$$\langle I_k \rangle = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_k. \quad (1)$$

Значение функции контраста одного кадра:

$$V_k = \frac{\sigma_{I_k}}{\langle I_k \rangle} = \frac{\sqrt{\langle I_k^2 \rangle - \langle I_k \rangle^2}}{\langle I_k \rangle}. \quad (2)$$

Кросскорреляционный коэффициент Пирсона для каждой пары последовательных кадров:

$$D_{k,l} = \frac{\text{cov}\langle I_k, I_l \rangle}{\sigma_{I_k} \sigma_{I_l}} = \frac{\langle I_k I_l \rangle - \langle I_k \rangle \langle I_l \rangle}{\sqrt{\langle I_k^2 \rangle - \langle I_k \rangle^2} \cdot \sqrt{\langle I_l^2 \rangle - \langle I_l \rangle^2}}, \quad (3)$$

где $\langle I_k \rangle$ — значение средней интенсивности для кадра k , I_k — значение интенсивности в точке кадра k с координатами $\{m, n\}$. [8]

Обработка тепловых картин и температурных профилей позволила также получить температурные зависимости коэффициента контраста и коэффициента кросскорреляции Пирсона.

По поведению статистических функций можно сделать вывод о физических процессах, происходящих в ткани. Так, снижение контраста картинки во время нагревания говорит об образовании новых светорассеивающих центров (по проведенным ранее исследованиям это могут быть поры и газовые пузырьки [9–11]). Причина состоит в том, что у камеры, фиксирующей спекл-контрастные изображения, конечное время экспозиции, и оно может превышать время образования таких центров. Тогда в месте, где образовался пузырек или пора, мы видим пиксели с интенсивностью,

усредненной по времени экспозиции. Соответственно, чем больше таких пикселей, тем меньше среднеквадратичное отклонение значений интенсивности пикселей по этой картинке, а значит тем меньше значение функции контраста. Функция кросскорреляции по сути показывает как сильно два последовательных кадра похожи друг на друга. С физической точки зрения значение этой функции дает нам информацию о движении структур ткани, например, насколько быстро оно происходит при нагреве и остывании ткани.

Для непрерывного режима облучения были получены кривые, представленные на рис. 2.

Из графика контраста следует:

1. Резкое падение значения коэффициента из-за большого градиента температуры в образце и начала движения рассеивающих центров.
2. Небольшое плато говорит о постоянстве структуры образца.
3. Дальнейшее снижение контраста возникает из-за появления в ткани дополнительных центров рассеяния: газовых пузырьков и пор.
4. Плато свидетельствует об отсутствии изменений структуры.
5. При выключении лазера наступает глобальный минимум значения функции контраста вследствие резкого уменьшения объема газовых пузырьков и размывания картинки. Далее следует релаксация функции контраста к постоянному значению.

Из графика кросскорреляции следует:

1. Резкое падение значения кросскорреляции из-за большого градиента температуры в образце и начала движения рассеивающих центров.
2. Замедляющийся рост, которой наблюдается даже при постоянном контрасте, возможен из-за движения больших агрегатов ткани — протеогликанов или гликопротеинов.
3. При выключении лазера наблюдается локальный максимум функции, связанный с остановкой движения рассеивающих центров. Последующий локальный минимум образуется из-за градиента температур после выключения лазера и релаксационных движений рассеивающих центров с дальнейшим возрастанием вследствие замедления общего движения.

Также кривые характеризуются тем, что при остывании ни контраст, ни коэффициент корреляции не возвращаются к первоначальному значению. Это говорит о наличии структурных изменений, сохраняющихся после облучения, и движении рассеивающих центров внутри ткани, что отражается в пониженных

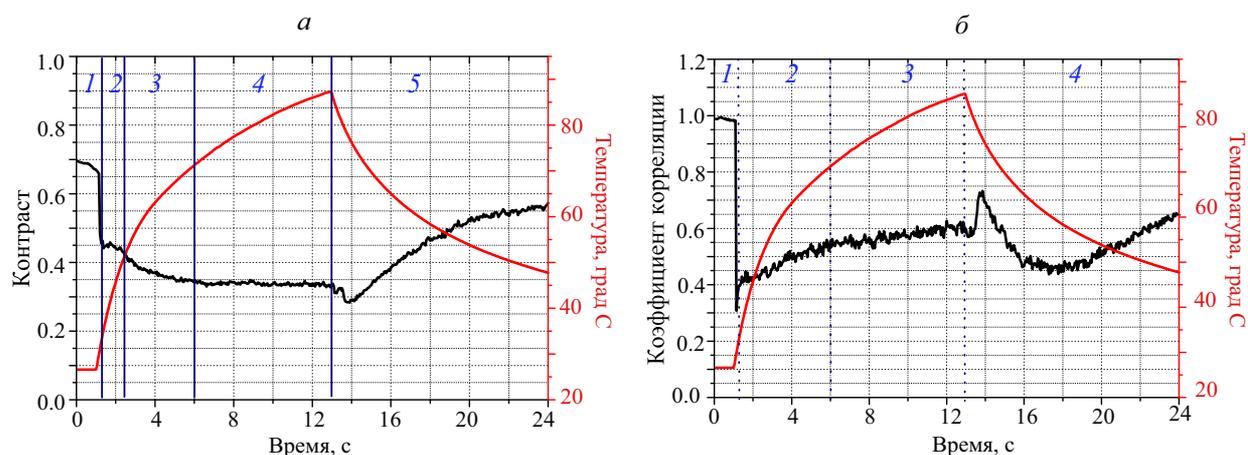


Рис. 2: Временные зависимости *a* — контраста, *б* — кросс-корреляции и температуры для непрерывного режима облучения

значениях обоих параметров. Эти данные коррелируют с исследованиями об изменении пористой структуры хрящевой ткани при лазерном нагреве [11].

вывод, что метод спекл-интерферометрии может служить хорошим базисом для контрольной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные зависимости хорошо согласуются с известными данными о структурных изменениях в хряще при неабляционном лазерном воздействии. Необратимое изменение характеристик спекл-картин говорит о возникновении стабильных во времени пор. На основе исследования временных зависимостей был сделан

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-29-02124-мк) в части «исследования импульсно-периодического режима облучения» и Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части исследования непрерывного режима облучения.

- [1] Омельченко А.И., Соболев Э.Н., Баум О.И. Вестник Югорского государственного университета. 2009. **2**(13). С. 640.
- [2] Соболев Э.Н., Баум О.И., Сошникова Ю.М., Южаков А.В., Касьяненко Е.М., Токарева А.В., Свистушкин В.М., Селезнева Л.В. и др. Квантовая электроника. 2017. **47**:10. С. 935.
- [3] Баграташвили В.Н., Басков А.В., Борщенко И.А., Игнатьева Н.Ю., Овчинников Ю.М., Омельченко А.И., Свиридов А.П., Свистушкин В.М., Соболев Э.Н., Шехтер А.Б. Лазерная инженерия хрящей. 2006.
- [4] Баум О.И. Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2015. **58**(10). С. 847.
- [5] Южаков А.В., Свиридов А.П., Щербаков Е.Щ., Баум О.И., Соболев Э.Н. Квантовая Электроника. 2014. **44**(1). С. 65.
- [6] Sobol E., Sviridov A., Omeltchenko A., Baum O.,

- Baskov A., Borchshenko I., Golubev V., Baskov V. Proc. SPIE. 2011. **7897**. P. 7897.
- [7] Zimnyakov D., Agafonov D., Sviridov A., Omel'chenko A., Kuznetsova L., Bagratashvili V. Appl. Opt. 2002. **41**. P. 5989.
- [8] Баранов С.А. Диагностика лазерно-индуцированных структурных изменений в хрящевой ткани методом спекл-интерферометрии автореф.дис...канд.хим.наук : 02.00.04 : 02.00.09
- [9] Baum O., Wachsmann-Hogiu S., Milner T., Sobol E. Laser Physics Letters. 2017. **14**(6). 065601.
- [10] Sobol E., Baum O., Sviridov A., Shnirelman A. Proc. SPIE 2015. **9321**. P. 9321.
- [11] Sobol E., Baum O., Sviridov A., Shekhter A., Wachsmann-Hogiu S., Shnirelman A., Alexandrovskaya Y., Sadovskyy I., Vinokur V. Journal of Biomedical Optics. 2017. **22**(9). P. 22.

Thermal modification of cartilage and speckle-modulated images monitoring

M. L. Novikova^{1,2,a}, A. V. Yuzhakov^{2,b}, O. I. Baum^{2,c}

¹*Department of Medical Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia.*

²*Institute of Photonic Technologies, Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics» of RAS
Moscow, Russia*

E-mail: ^amashundran@ya.ru, ^byuzhalvas@gmail.com, ^cbaumolga@gmail.com

Today non-destructive laser effect on tissue is used in many areas of medicine. By creating a laser-induced temperature field in the cartilage, one can achieve structural rearrangements, the formation of pores and even the shape changes due to the relaxation of mechanical stresses. In the process of laser exposure to cartilage, there is a change in the mechanical and optical properties of the tissue, which must be monitored to adjust the mode of exposure. This is conveniently done using the speckle interferometry method, the idea of which is to observe the interference pattern produced by the interaction of monochromatic coherent radiation with biological tissue. The paper presents the results of a study of the temporal and temperature dependences of the contrast function and cross-correlation. These dependencies can serve as a basis for monitoring laser exposure of tissue in real time.

PACS: 07.60.-j, 42.62.-b, 42.30.Ms.

Keywords: cartilage tissue, laser radiation, speckle-interference.

Received 11 March 2019.

Сведения об авторах

1. Новикова Мария Леонидовна — студент, техник; тел.: (499)135-63-11, e-mail: mashundran@ya.ru.
2. Южаков Алексей Васильевич — науч. сотрудник; тел.: (499)135-63-11, e-mail: yuzhalvas@gmail.com.
3. Баум Ольга Игоревна — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (499)135-63-11, e-mail: baumolga@gmail.com.