

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КОЛЛАГЕНА БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ К ИК ЛАЗЕРНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

А.В. Афанасьевская^{1,2}, Н.Ю. Игнатьева^{1,2}, О.И. Захаркина², Э.Н. Соболев²

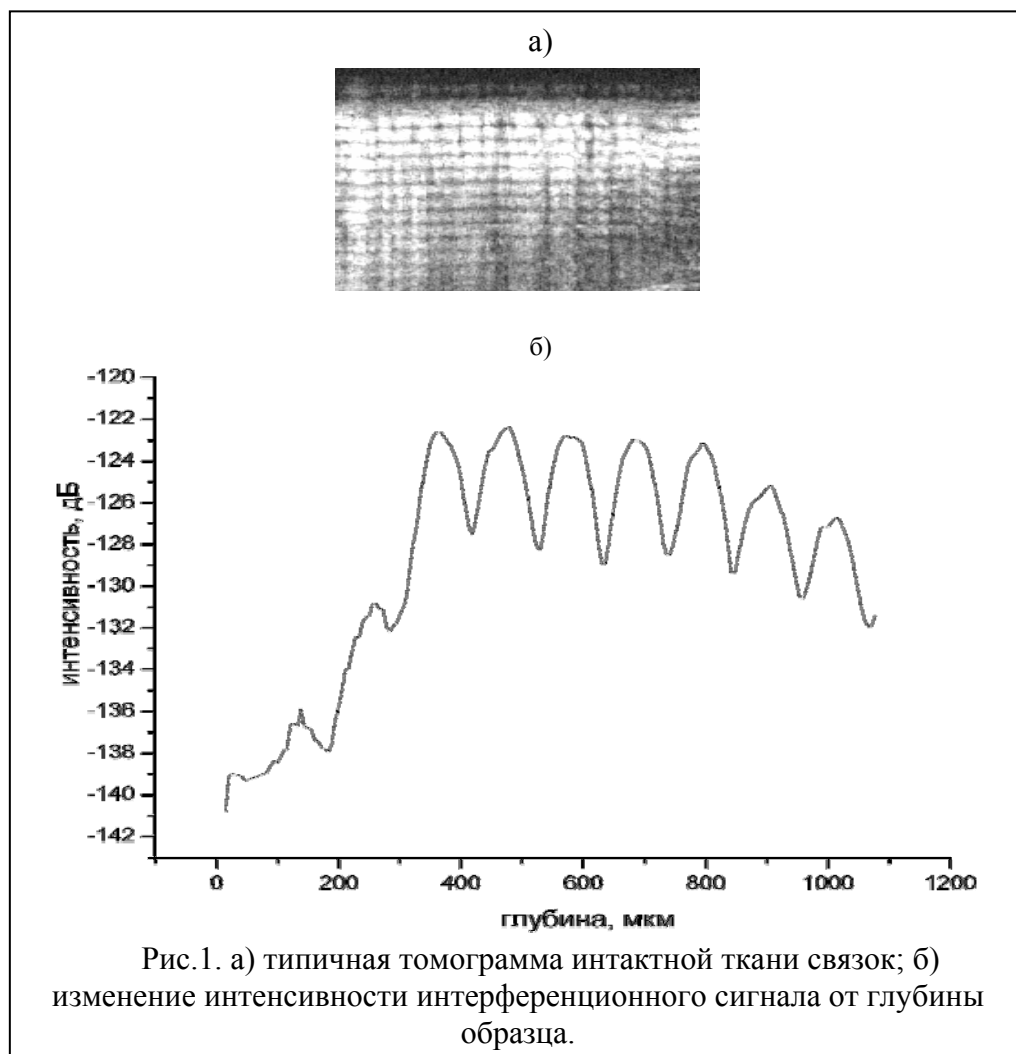
¹Химический факультет Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова; ²Институт Проблем Лазерных и Информационных Технологий РАН
E-mail: anastasiaaff@mail.ru

The laser treated changes in ligament collagen structure in tension were examined by polarization-sensitive optical coherence tomography and differential scanning calorimetry. It was shown that mechanical loading leads to decrease of collagen stability to laser irradiation.

В последнее время в медицинскую практику активно внедряется метод локального лазерного нагрева соединительных тканей [1]. В нашей лаборатории проводятся исследования изменения молекулярной структуры соединительных тканей под действием лазерного излучения. Основным компонентом соединительной ткани является коллаген, трехспиральные молекулы которого последовательно укладываются в фибриллы, а затем волокна, образуя высокоупорядоченную анизотропную квазикристаллическую структуру. При температуре около 60-70°C в ткани происходит дезорганизация этой структуры с разрушением тройных спиралей молекул с образованием случайных клубков. Этот процесс называется денатурацией или плавлением коллагена и по своим характеристикам может быть отнесен к фазовому переходу I рода. Для коллагена характерно уменьшение температуры денатурации T_d с увеличением одноосной растягивающей силы f , приложенной к волокну в направлении его оси [2]. Экспериментальные результаты, связанные с денатурацией коллагена в вырезанных образцах, и наблюдения, сделанные *in vivo*, различаются. Это связано с тем, что соединительная ткань в живом организме не свободна от нагрузки.

Целью данной работы является изучение лазеро-индуцированной модификации коллагена в связках кролика при приложении механической нагрузки. Исследования проводились методами поляризационно чувствительной оптической когерентной томографии (ПЧ ОКТ, Н.Новгород, Россия) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК, «Mettler TA4000»).

На рис.1 представлен ПЧ ОКТ образ интактной ткани связок и изменение интенсивности интерференционного сигнала по глубине образца. Чередование темных и светлых полос свидетельствует о наличии высокоупорядоченной анизотропной структуры, двулучепреломление составляет $\Delta n = (6,8 \pm 2) \cdot 10^{-3}$.



Для лазерной обработки образцов тканей использовали излучение Er-Glass волоконного ИК лазера ЛС-1,56-5 (“ИРЭ-Полус”, Россия), $\lambda = 1,56$ мкм. Выходную мощность варьировали от 0.5 до 2 Вт. Излучение лазера подавалось через оптическое волокно диаметром 600 мкм под углом 90° на образцы изучаемой ткани. Расстояние между концом световода и облучаемой поверхностью образцов составляло 0.5 см, при этом диаметр облучаемой зоны равнялся 1,6 мм.

Температуру поверхности облучаемых образцов контролировали дистанционно при помощи ИК камеры IRTIS 200 (режим сканирования одной строкой, частота ≈ 100 Гц). Параметры режимов облучения и достигаемая температура представлены в таблице 1.

Номер режима	Мощность излучения, Вт	Время облучения образца, с	Температура, °С	Тип режима
1	0.5	4	59°С	непрерывный
2	2	1	80,6 °С	непрерывный
3	2	2	70°С	импульсный 1Гц 500мс

Режим 1- самый мягкий из используемых нами режимов. Температура, измеренная методом ИК радиометрии, не достигает температуры денатурации. ДСК анализ показал, что ΔH денатурации коллагена не меняется. Однако на томограммах видно искажение структуры параллельных полос. Двухлучепреломление уменьшается почти в 2 раза. Т.о. нам удалось наблюдать модификацию коллагенового волокна при отсутствии разрушения нативной структуры тройной спирали макромолекул.



Натяжение коллагенового волокна приводит к существенному уменьшению его устойчивости к лазерному воздействию. Об этом свидетельствуют данные ДСК анализа (степень денатурации коллагена в результате лазерного воздействия на эти образцы достигает $27 \pm 5\%$), а также данные ПЧ ОКТ, свидетельствующие об изменении организации коллагенового волокна. На некоторых томограммах четко визуализируется приповерхностная область с практически полным отсутствием анизотропной структуры. Во внутренней зоне на всех томограммах наблюдается значительное искажение параллельных полос, их расширение и «проседание». Оценить двухлучепреломление по периоду осцилляции интенсивности рассеянного поляризованного света не представляется возможным.

Данные, полученные нами для остальных режимов, также свидетельствуют о понижении устойчивости коллагеновой структуры к ИК лазерному воздействию при приложении механической нагрузки. Полученный результат принципиально отличается от влияния одноосной нагрузки на стабильность коллагеновой структуры при гидротермальном нагреве. Это различие, по видимому, связано с термомеханическим эффектом неабляционного лазерного воздействия, при котором значительные механические напряжения (как растягивающие так и сжимающие) возникают за счет термического расширения неоднородно нагреваемых участков биологической ткани [3].

Выводы:

- Впервые показано, что приложение одноосной нагрузки приводит к уменьшению стабильности коллагенового волокна при ИК лазерном воздействии.
- Обнаружена стадия модификации коллагена, которая проявляется в дезорганизации упаковки коллагенового волокна с уменьшением его двухлучепреломления.

1. Лазерная инженерия хрящевых тканей. Под редакцией В.Н.Баграташвили, Э.Н.Соболя, А.Б.Шехтера. М: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
2. Л.Манделькern. Кристаллизация полимеров. М., Ленинград: “Химия”. 1966.
3. E.N. Sobol, T.E. Milner, A.B. Shekhter, et al, Laser Phys. Lett. 4, No. 7, 488–502, 200