

УДК 616-089.877: 621.373.826

DOI: 10.37895/2071-8004-2021-25-4-9-15

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ХОНДРОМАЛЯЦИИ СУСТАВНОГО ХРЯЩА

А.В. Лычагин¹, С.В. Иванников¹, В.И. Юсупов⁴, Л.А. Семенова⁵, Е.Д. Старцева³, В.В. Сурин¹, И.О. Тинькова², А.И. Наиманн², Т.А. Жарова¹, П.А. Пржевальский¹, Я. Ян¹

¹ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия

²ГБУЗ города Москвы «Городская клиническая больница им. С.П. Боткина» Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

³ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ», Москва, Россия

⁴Институт фотонных технологий РАН, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

⁵ФГБНУ «Центральный научно-исследовательский институт туберкулеза», Москва, Россия

Резюме

Цель: подбор оптимальных параметров двухволнового лазерного излучения ближнего инфракрасного диапазона для артроскопической обработки очагов хондромалиции суставного хряща.

Материалы и методы. Суставные хрящи быка обрабатывали лазерным излучением, выходящим из волокна, с различными параметрами. Суставные хрящи человека с очагами хондромалиции, взятые в процессе тотального эндопротезирования коленного сустава, обрабатывали лазерным излучением, выходящим из волокна, с различными параметрами. Обработанные образцы хрящей оценивали макроскопически, затем исследовали гистологически. Оценивали изменения структуры суставного хряща после лазерного воздействия.

Результаты. Двухволновое лазерное излучение с параметрами $\lambda = 0,97$ мкм / 30 Вт и $\lambda = 1,55$ мкм / 15 Вт в течение 2 с вызвало быстрое «оплавление» краев дефекта без макроскопически видимой карбонизации с широкой зоной термического воздействия в области обработки. На гистологических препаратах хряща, обработанного двухволновым лазерным излучением с параметрами $\lambda = 1,55$ мкм / 5 Вт и $\lambda = 0,97$ мкм / 3 Вт в течение 2 с, наблюдалось незначительное изменение структуры хряща, происходящее без термической деструкции хондроцитов.

Выводы. Оптимальной комбинацией при воздействии в среде физиологического раствора лазерным излучением на хрящевую ткань, обеспечивающей восстановление формы суставного хряща, является сочетанное воздействие излучений $\lambda = 0,97$ мкм при мощности 3 Вт и $\lambda = 1,55$ мкм при мощности 5 Вт с расстояния 1–2 мм в течении 2 с.

Ключевые слова: лазер, суставной хрящ, хондромалиция, длина волны, параметры излучения, лазерная обработка

Для цитирования: Лычагин А.В., Иванников С.В., Юсупов В.И., Семенова Л.А., Старцева Е.Д., Сурин В.В., Тинькова И.О., Наиманн А.И., Жарова Т.А., Пржевальский П.А., Ян Я. Лазерная обработка хондромалиции суставного хряща. *Лазерная медицина*. 2021; 25(4): 9–15. <https://doi.org/10.37895/2071-8004-2021-25-4-9-15>

Контакты: Сурин В.В., e-mail: rassvet_1612@mail.ru

LASER TREATMENT OF CHONDROMALACIA LESIONS IN THE ARTICULAR CARTILAGE

Lychagin A.V.¹, Ivannikov S.V.¹, Yusupov V.I.⁴, Semenova L.A.⁵, Startseva E.D.³, Surin V.V.¹, Tinkova I.O.², Naimann A.I.¹, Zharova T.A.¹, Przhevalsky P.A.¹, Yan Y.¹

¹I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia

²Botkin Hospital, Moscow, Russia

³National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

⁴Institute of Photon Technologies of Federal Scientific Research Centre "Crystallography and Photonics" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵Central Tuberculosis Research Institute, Moscow, Russia

Abstract

Objective: to select optimal parameters of two-wave near-infrared laser irradiation for the arthroscopic treatment of chondromalacia foci in the articular cartilage.

Material and methods. Bull articular cartilages were treated with laser light delivered by a fiber and having various parameters. Human articular cartilages with chondromalacia foci taken during the total knee replacement were also treated with laser light delivered by a fiber and having various parameters. The processed cartilage samples were examined macroscopically and then histologically. Changes in the structure of articular cartilage after laser irradiation were assessed.

Results. A two-second irradiation with two-wave laser light ($\lambda = 0.97$ μ m / 30 W and $\lambda = 1.55$ μ m / 15 W) causes a rapid "melting" of lesion margins without macroscopically visible carbonization with a wide thermally affected zone in the irradiated area. Histologically, cartilage preparations irradiated with two-wave laser light (wavelengths $\lambda = 1.55$ μ m / 5 W and $\lambda = 0.97$ μ m / 3 W) for 2 sec demonstrated slight changes in the cartilage structure without thermal destruction of chondrocytes.

Conclusion. The optimal combination for laser irradiation of the cartilage tissue in the saline solution environment which restores articular cartilage shape is two-wave laser light $\lambda = 0.97 \mu\text{m}$ at power of 3 W and $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ at power of 5 W from the distance of 1–2 mm under 2 sec exposure.

Key words: laser, cartilage, chondromalacia, wavelength, radiation parameters, laser irradiation

For citations: Lychagin A.V., Ivannikov S.V., Yusupov V.I., Semenova L.A., Startseva E.D., Surin V.V., Tinkova I.O., Naimann A.I., Zharova T.A., Przhevalsky P.A., Yan Ya. Laser treatment of chondromalacia lesions in the articular cartilage. *Laser Medicine*. 2021; 25(4): 9–15. [In Russ.]. <https://doi.org/10.37895/2071-8004-2021-25-4-9-15>

Contacts: Surin V.V., e-mail: rassvet_1612@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении артроскопического лечения коленного сустава по поводу гонартроза перед оперирующим хирургом часто, среди прочего, стоит задача обработки очагов хондромалиции на поверхности суставного хряща. Целью такой обработки является восстановление формы суставного хряща и снижение темпов прогрессирования хондромалиции в очаге.

Обработка суставного хряща может осуществляться различными типами инструментов (механические, холодноплазменные, лазерные).

Механические инструменты при артроскопической санации коленного сустава позволяют успешно удалять костные разрастания, массивные гипертрофические участки тканей. Однако при обработке суставного хряща применение механических инструментов избыточно травматично, их использование также затруднено в узких местах сустава [1].

При обработке холодноплазменными инструментами трудно контролировать степень абляции и коагуляции, что может приводить к избыточным повреждениям, как суставного хряща, так и субхондральной кости [2].

При лазерной обработке хряща существует техническая возможность достаточно точного дозирования воздействия излучения. Это позволяет производить лазерную обработку строго определенных участков хряща в строго определенной степени, без повреждения тканей, находящихся за пределами обрабатываемой области [3].

Лазерное излучение также способно стимулировать регенерацию хряща за счет процессов, связанных с его воздействием. Запуск регенеративных процессов происходит по механизму механобиологии в результате стимуляции хрящевой ткани лазероиндуцированными гидродинамическими процессами, связанными с кипением внутритканевой жидкости [4–17], а также из-за образования в ткани многочисленных микропор, появившихся вследствие образования при нагреве пузырьков ранее растворенных во внутритканевой жидкости газов [18, 19].

Таким образом, использование лазерного излучения для обработки очагов хондромалиции в ходе артроскопических операций обладает следующими преимуществами, по сравнению с другими способами воздействия: меньшая вероятность сопутствующих ятрогенных повреждений суставного хряща за счет дозированности воздействия; способность лазерного излучения стимулировать регенерацию суставного хряща.

Ранее были опубликованы результаты экспериментов *in vivo*, проводившихся на суставных хрящах

и субхондральной кости животных (кроликов, свиней), целью которых было определение параметров лазерного излучения, наиболее подходящих для обработки очагов хондромалиции суставного хряща. Наилучшие результаты по восстановлению формы хряща и стимуляции его регенерации были получены при использовании излучения с длиной волны $\lambda = 0,97 \mu\text{m}$ (при мощности до 20 Вт), а также излучения с длиной волны $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ (при мощности до 15 Вт) [20, 21].

С целью уменьшения инвазивности хирургического вмешательства, улучшения качества обработки и усиления эффекта стимулирования регенерации хряща было принято решение объединить излучения с длинами волн 0,97 и 1,55 мкм в одном луче, что, предположительно, должно было позволить уменьшить рабочую суммарную мощность используемого излучения.

Целью настоящей работы являлся подбор оптимальных параметров двухволнового лазерного излучения, для артроскопической обработки очагов хондромалиции суставного хряща.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Был использован двухволновой волоконный лазерный аппарат ЛСП – «ИРЭ-Полус» (НТО «ИРЭ-Полус», Россия) с длинами волн излучения $\lambda = 0,97 \mu\text{m}$ (с мощностью до 30 Вт) и $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ (с мощностью до 15 Вт) и прямым выводом излучения через кварц-кварцевый световод с диаметром светонесущей жилы 600 мкм.

Кроме этого в экспериментах был использован двухволновой волоконный лазерный аппарат «УРОЛАЗ» (НТО «ИРЭ-Полус», Россия) с длинами волн излучения $\lambda = 1,94 \mu\text{m}$ (с мощностью до 120 Вт) и $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ (с мощностью до 15 Вт) и прямым выводом излучения через кварц-кварцевый световод с диаметром светонесущей жилы 600 мкм.

В качестве объектов воздействия были использованы образцы суставных хрящей мышелков бедренной кости человека с очагами хондромалиции, взятые во время операции по тотальному эндопротезированию коленного сустава, а также образцы суставных хрящей быка.

Воздействие производили в среде изотонического 0,9%-ного раствора NaCl для моделирования условий, соответствующих артроскопической операции.

На образцах суставных хрящей быка с помощью скальпеля проделывали сквозные надрезы. Край образовавшихся дефектов обрабатывались с помощью лазерного излучения. Для обработки использовали излучение с разными длинами волн и мощностями.

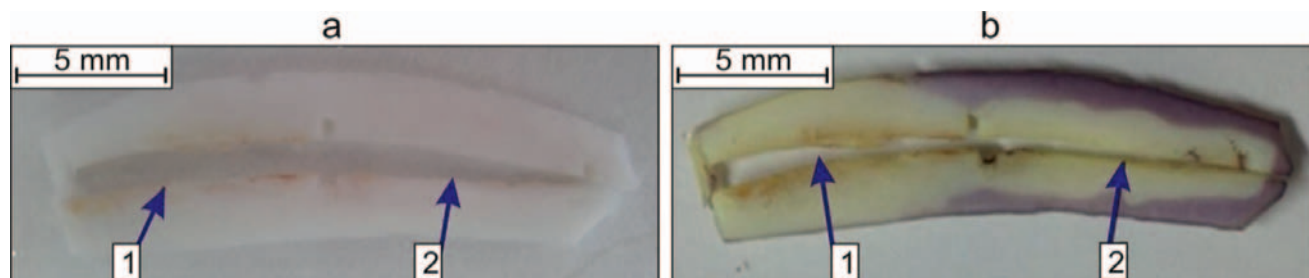


Рис. 1. Образец суставного хряща быка, обработанный двухволновым лазерным излучением с параметрами 1,94 мкм / 10 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт (1) и 0,97 мкм / 20 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт (2) до (а) и после (б) окраски раствором NBT

Fig. 1. A bull articular cartilage sample treated with two-wave laser radiation: parameters 1.94 μm / 10 W + 1.55 μm / 15 W (1) and 0.97 μm / 20 W + 1.56 μm / 15 W (2) before (a) and after (b) staining with NBT solution

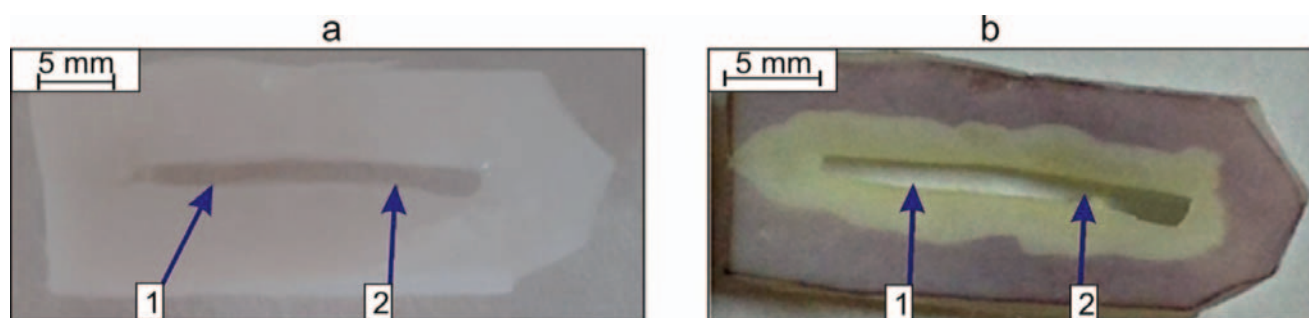


Рис. 2. Образец суставного хряща быка, обработанный двухволновым лазерным излучением с параметрами 0,97 мкм / 15 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт (1) и 0,97 мкм / 20 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт (2) до (а) и после (б) окраски раствором NBT

Fig. 2. A sample of bull articular cartilage treated with two-wave laser light: parameters 0.97 μm / 15 W + 1.56 μm / 15 W (1) and 0.97 μm / 20 W + 1.56 μm / 15 W (2) before (a) and after (b) staining with NBT solution

По завершении лазерной обработки образцов хрящей, с целью определения зоны термического воздействия, образцы окрашивали раствором нитросинего тетразолия хлорида (NBT).

Образцы суставных хрящей мыщелков бедренной кости человека с очагами хондромалиции подвергали воздействию импульсно-периодического двухволнового (1,55 мкм / 5 Вт и 0,97 мкм / 3 Вт) лазерного излучения с длительностью импульсов 100 мс и паузой 50 мс. Расстояние от торца световода до поверхности хряща составляло 2 мм. Длительность воздействия составляла 2 с. Далее из образцов по общепринятой методике были изготовлены микропрепараты, которые были окрашены гематоксилином и эозином. Окрашенные микропрепараты просматривали на цифровом сканирующем микроскопе 3DHitech Panoramic 250 flash (Zeiss Connecting Solutions, Германия).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 показаны образцы суставного хряща быка, обработанные двухволновым лазерным воздействием с параметрами 1,94 мкм / 10 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт и 0,97 мкм / 20 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт.

На рисунках видно, что картины лазерного воздействия для двух используемых режимов существенно различаются. На левой половине хрящевой ткани, обработанной в режиме (1), происходит макроскопически

видимая карбонизация хряща. А на правой половине хряща, обработанной в режиме (2), края дефекта сглажены и имеют округлую форму. Разница в размерах зоны термического воздействия хрящевой ткани между областями, обработанными при режимах (1) и (2), отчетливо видна после окрашивания раствором NBT (рис. 16).

Выполненное по этой же схеме воздействие излучением с длиной волны $\lambda = 1,94$ мкм вызывало карбонизацию хрящевой ткани даже при сравнительно небольшой мощности в 10 Вт. На основании этого было принято решение в дальнейших экспериментах отказаться от использования излучения с $\lambda = 1,94$ мкм.

На рисунке 2 показаны образцы суставного хряща быка, обработанные двухволновым лазерным воздействием с параметрами 0,97 мкм / 15 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт и 0,97 мкм / 20 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт.

Из рисунка 2 видно, что при воздействии данной комбинацией длин волн лазерного излучения видимой (макроскопически) карбонизации хрящевой ткани не возникает. Однако в процессе обработки в режиме (2) «оплавление» краев дефекта хряща происходило значительно быстрее, чем при обработке в режиме (1). После окрашивания раствором NBT хорошо видна зона термического воздействия, одинаковая для обоих режимов лазерного излучения.

На рисунке 3 показаны образцы суставного хряща быка, обработанные двухволновым лазерным

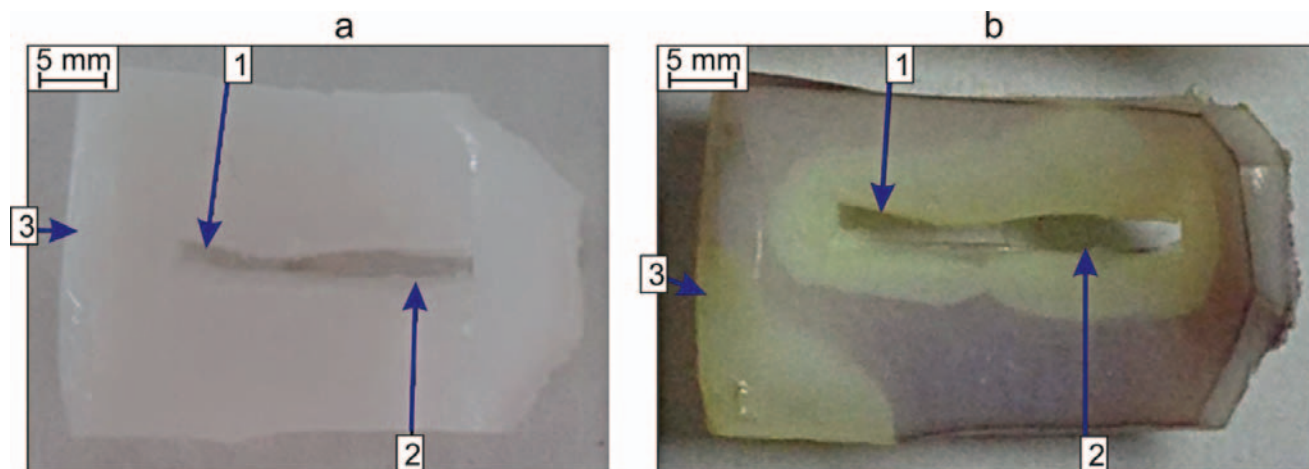


Рис. 3. Образец суставного хряща быка, обработанный двухволновым лазерным излучением с параметрами 0,97 мкм / 15 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт (1), 0,97 мкм / 20 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт (2) и 0,97 мкм / 30 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт (3) до (а) и после (б) окрашивания раствором NBT

Fig. 3. A sample of bull articular cartilage treated with two-wave laser light: parameters 0.97 μ m / 15 W + 1.56 μ m / 15 W (1), 0.97 μ m / 20 W + 1.56 μ m / 15 W (2) and 0.97 μ m / 30 W + 1.56 μ m / 15 W (3) before (a) and after (b) staining with NBT solution

воздействием с параметрами 0,97 мкм / 15 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт, 0,97 мкм / 20 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт и 0,97 мкм / 30 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт.

Из рисунка 3 видно, что при обработке лазерным излучением в режиме (3) видимой (макроскопически) карбонизации хрящевой ткани также не возникало. Однако при обработке в режиме (3) «оплавление» краев дефекта хряща происходило еще быстрее, даже по сравнению с режимом (2). После окрашивания раствором NBT хорошо видна зона термического воздействия (рис. 3б).

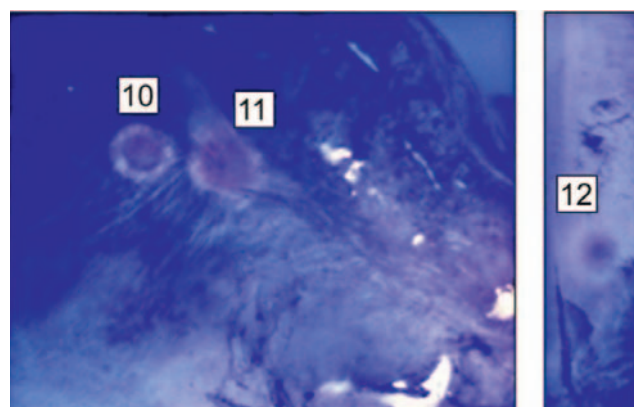


Рис. 4. Образец суставного хряща быка, обработанный различными режимами двухволнового лазерного излучения после окраски раствором NBT: непрерывное 0,97 мкм / 3 Вт и импульсно-периодическое 100 мс / 50 мс 1,55 мкм / 5 Вт (10), импульсно-периодическое 100 мс / 50 мс 0,97 мкм / 3 Вт и непрерывное 1,55 мкм / 5 Вт (11), импульсно-периодическое 100 мс / 50 мс 0,97 мкм / 3 Вт и импульсно-периодическое 100 мс / 50 мс 1,55 мкм / 5 Вт (12)

Fig. 4. A sample of bull articular cartilage treated with various modes of two-wave laser radiation after staining with NBT solution: continuous 0.97 μ m / 3 W and pulsed-periodic 100 ms / 50 ms 1.55 μ m / 5 W (10); pulsed-periodic 100 ms / 50 ms 0.97 μ m / 3 W and continuous 1.55 μ m / 5 W (11); pulsed-periodic 100 ms / 50 ms 0.97 μ m / 3 W and pulsed-periodic 100 ms / 50 ms 1.55 μ m / 5 W (12)

Предыдущие эксперименты показали, что используемые параметры лазерного излучения приводят к образованию слишком обширной зоны термического воздействия, для того чтобы можно было эффективно применять их во время артроскопических операций на суставном хряще. В связи с этим был проведен ряд экспериментов с использованием лазерного излучения с меньшими, но достаточными для «сглаживания» суставной поверхности мощностями. Кроме этого, было проведено исследование с использованием импульсно-периодических и непрерывных режимов излучения.

В результате экспериментов было установлено, что минимальная мощность, при которой достигается «сглаживание» суставной поверхности, при воздействии двухволнового импульсно-периодического (с длительностями импульса / паузы: 100 мс / 50 мс) лазерного излучения составляет 5 Вт для $\lambda = 1,55$ мкм и 3 Вт для $\lambda = 0,97$ мкм.

На рисунке 4 показан образец суставного хряща быка, обработанный различными вариантами двухволнового лазерного излучения после окраски раствором NBT.

На рисунке 4 видно, что при обработке хрящевой ткани лазерным излучением в режиме (12), когда оба сочетаемых излучения были импульсно-периодическими с длительностью импульсов 100 мс и паузой 50 мс, зона термического воздействия имела значительно меньшие размеры по сравнению с режимами (10) и (11), при которых одно из сочетаемых излучений было непрерывным, а второе – импульсно-периодическим с длительностью импульсов 100 мс и паузой 50 мс.

Следующие результаты получены при исследовании образцов суставных хрящей мышелков бедренной кости человека с очагами хондромалиции, взятых

в процессе тотального эндопротезирования коленного сустава.

При гистологическом исследовании очаги хондромалиции до лазерного воздействия были представлены суставными поверхностями, покрытыми гиалиновым хрящом «шероховатого» серовато-желтого цвета. Микроскопически поверхность хряща неровная, неравномерной толщины с ворсинчатыми образованиями, трещинами, проникающими до нижней трети поверхностной зоны. В участках повреждения поверхностной зоны хондроциты не определялись. Наблюдалась метакромазия с видимой вертикальной волокнистостью межклеточного матрикса. В средней и нижней зонах гиалинового хряща микроскопическое строение было без патологических изменений. Хондроциты располагались группами, в лакунах. Линия минерализации, субхондральная костная пластинка были без особенностей.

При гистологическом исследовании образцов хрящевых участков человека с признаками хондромалиции после воздействия лазерного излучения параметрами 1,55 мкм / 5 Вт и 0,97 мкм / 3 Вт (100 мс / 50 мс) признаков деструкции в виде карбонизации и механического повреждения не было обнаружено. Суставная поверхность хряща была гладкая. Отсутствовали ворсинчатые структуры, трещины. Толщина хряща уменьшилась, что, вероятно, связано с так называемым эффектом выпаривания межклеточной жидкости [5]. Хондроциты расположились неравномерно, в том числе наблюдались и отдельно лежащие хрящевые клетки, вне групп и лакун. Группы хондроцитов, преимущественно поверхностной зоны, образовывали более тесные скопления, т. е. располагались более плотно, ближе друг к другу. В поверхностной зоне были обнаружены хондроциты вытянутой формы с гиперхромным ядром, увеличением ядерно-плазматического индекса (рис. 5).

Таким образом, импульсно-периодическое (100 мс / 50 мс) двухволновое лазерное излучение 1,55 мкм / 5 Вт + 0,97 мкм / 3 Вт при воздействии в течении 2 с на суставном хряще расстояния 2 мм в среде изотонического 0,9%-ного раствора NaCl позволяет добиться достаточного хирургического результата за счет сглаживания поверхности суставного хряща без термической деструкции хондроцитов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Воздействие излучения с длиной волны $\lambda = 1,94$ мкм вызывало карбонизацию хрящевой ткани даже при сравнительно небольшой мощности в 10 Вт. На основании этого было принято решение отказаться от использования излучения с $\lambda = 1,94$ мкм в дальнейших экспериментах.

При обработке хряща двухволновым излучением с длинами волн $\lambda = 0,97$ мкм и $\lambda = 1,55$ мкм наивысшая скорость «оплавления» краев дефекта соответствовала режиму 0,97 мкм / 30 Вт + 1,55 мкм / 15 Вт, а зона термического воздействия, визуализировавшаяся

при окраске препаратов раствором NBT, была такой же, как и у излучений с меньшей мощностью.

Однако отсутствие видимой без дополнительного увеличения карбонизации не означает ее полного отсутствия, а визуализированная за счет окраски NBT зона термического воздействия хотя и сравнительно невелика, но все же заметно больше обрабатывавшегося дефекта. В связи с этим был предпринят ряд дальнейших экспериментов с меньшими мощностями.

Минимальная мощность, при которой достигался достаточный хирургический эффект при воздействии двухволнового импульсно-периодического (100 мс / 50 мс) лазерного излучения, составила 5 Вт для $\lambda = 1,55$ мкм и 3 Вт для $\lambda = 0,97$ мкм.

При гистологическом исследовании хрящей из участков хондромалиции, обработанных лазерным излучением 1,55 мкм / 5 Вт и 0,97 мкм / 3 Вт (100 мс / 50 мс), отсутствовали признаки термической деструкции гиалинового хряща, отмечено уменьшение толщины хряща за счет снижения объема межклеточного вещества без существенного повреждения хондроцитов.

ВЫВОДЫ

Оптимальной комбинацией при воздействии в среде физиологического раствора лазерным излучением на хрящевую ткань, обеспечивающей восстановление формы суставного хряща, является сочетанное воздействие излучений $\lambda = 0,97$ мкм при мощности 3 Вт и $\lambda = 1,55$ мкм при мощности 5 Вт с расстояния 1–2 мм в течении 2 с.

БЛАГОДАРНОСТИ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных технологий.

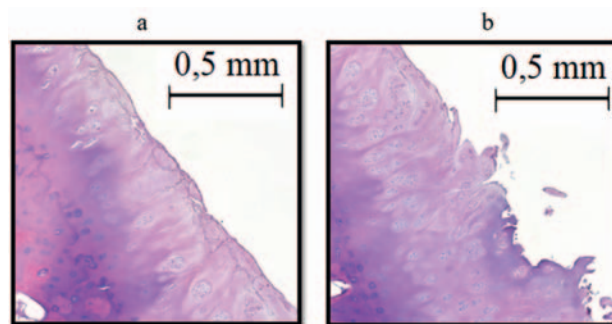


Рис. 5. Хрящевая ткань коленного сустава человека в очаге хондромалиции после обработки лазерным излучением (а) и необработанная хрящевая ткань коленного сустава человека в очаге хондромалиции (б). Окраска гематоксилин-эозином; $\times 100$

Fig. 5. Cartilage tissue of the human knee joint at the chondromalacia lesion after laser irradiation (a) and untreated cartilage tissue of the human knee joint at the chondromalacia focus (b). Stained with hematoxylin and eosin; $\times 100$

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуликов А.Л., Маланин Д.А., Новочадов В.В., Горячев А.Н. Морфологические и морфометрические результаты бесконтактного воздействия холодной плазмы на суставной хрящ в эксперименте. *Волгоградский научно-медицинский журнал*. 2010; 2 (26): 32–36.
2. Богатов В.Б., Матвеева О.В., Петров А.Б. Влияние холодно-плазменной абляции на хрящ коленного сустава человека и экспериментального животного. *Травматология и ортопедия России*. 2011; 1 (59): 61–66.
3. Иванников С.В. Лазерная артроскопическая хирургия (дегенеративно-дистрофические поражения коленного сустава): автореф. дис. ... д-ра мед. наук. М.; 2001.
4. Сандлер Б.И., Суляндзига Л.Н., Чудновский В.М. и др. Перспективы лечения дискогенных компрессионных форм пояснично-крестцовых радикулитов с помощью пункционных неэндоскопических лазерных операций. Владивосток: Дальнаука; 2004.
5. Баграташвили В.Н., Басков А.В., Борщенко И.А. и др. Лазерная инженерия хрящей. М.: Физматлит; 2006.
6. Sobol E., Baskov A., Shekhter A., et al. Laser regeneration of spine discs cartilage: mechanisms, in-vivo study and clinical applications. *Lecture notes in electrical engineering*. 2008; 12 LNEE: 259–266. DOI: 10.1007/978-0-387-71809-5_24
7. Holden P.K., Li C., Da Costa V., et al. The effects of laser irradiation of cartilage on chondrocyte gene expression and the collagen matrix. *Lasers Surg Med*. 2009; 41 (7): 487–491. DOI: 10.1002/lsm.20795
8. Wong B.J.F., Pandhoh N., Truong M.T., et al. Identification of chondrocyte proliferation following laser irradiation, thermal injury, and mechanical trauma. *Lasers Surg Med*. 2005; 37 (1): 89–96. DOI: 10.1002/lsm.20180
9. Yusupov V.I., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N. Laser-induced hydrodynamics in water-saturated biotissues. 1. Generation of bubbles in liquids. *Laser Phys*. 2010; 20 (7): 1641–1646. DOI: 10.1134/S1054660X1014001X
10. Yusupov V.I., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N. Laser-induced hydrodynamics in water-saturated biotissues. 2. Effect on delivery fiber. *Laser Phys*. 2011; 21 (7): 1230–1234. DOI: 10.1134/S1054660X11140015
11. Yusupov V.I., Bulanov V.V., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N. Laser-induced hydrodynamics in water-saturated tissue: III. Optoacoustic effects. *Laser Phys*. 2013; 24 (1): 015601. DOI: 10.1088/1054-660X/24/1/015601
12. Yusupov V.I., Kononov A.N., Ul'yanov V.A., Bagratashvili V.N. Generation of acoustic waves by cw laser radiation at the tip of an optical fiber in water. *Acoust Phys*. 2016; 62 (5): 537–544. DOI: 10.1134/S1063771016050183
13. O'Connor C.J., Case N., Guilak F. Mechanical regulation of chondrogenesis. *Stem Cell Res Ther*. 2013; 4 (4): 61. DOI: 10.1186/scrt211
14. Fahy N., Alini M., Stoddart M.J. Mechanical stimulation of mesenchymal stem cells: Implications for cartilage tissue engineering. *J Orthop Res*. 2018; 36 (1): 52–63. DOI: 10.1002/jor.23670
15. Juang Y.M., Lee C.Y., Hsu W.Y., et al. Proteomic analysis of chondrocytes exposed to pressure. *Biomed Chromatogr*. 2010; 24 (12): 1273–1282. DOI: 10.1002/bmc.1436
16. Mizuno S., Ogawa R. Using changes in hydrostatic and osmotic pressure to manipulate metabolic function in chondrocytes. *Am J Physiol Cell Physiol*. 2011; 300 (6): C1234–C1245. DOI: 10.1152/ajpcell.00309.2010
17. Karamesinis K., Spyropoulou A., Dalagiorgou G., et al. Continuous hydrostatic pressure induces differentiation phenomena in chondrocytes mediated by changes in polycystins, SOX9, and RUNX2. *J Orofac Orthop*. 2017; 78 (1): 21–31. DOI: 10.1007/s00056-016-0061-1
18. Sobol E.N., Baum O.I., Shekhter A.B., et al. Laser-induced regeneration of cartilage. *J Biomed Opt*. 2011; 16 (8): 080902. DOI: 10.1117/1.3614565
19. Alexandrovskaya Y.M., Baum O.I., Shekhter A.B., et al. Mechanisms of laser activation of chondrocytes in osteoarthritis healing. *Laser Phys Lett*. 2018; 15 (8): 085601. DOI: 10.1088/1612-202X/aac746
20. Шестерня Н.А., Иванников С.В., Жарова Т.А. и др. Клинико-биологические аспекты лечения гонартроза. *Клиническая геронтология*. 2011; 17 (3–4): 37–47.
21. Иванников С.В. и др. Лазерная хондропластика – дальнейшее развитие артроскопии коленного сустава. *Московский хирургический журнал*. 2011; 19 (3): 40–43

REFERENCES

1. Zhulikov A.L., Malanin D.A., Novochadov V.V., Goryachev A.N. Morphological and morphometric results of non-contact exposure of cold plasma to articular cartilage in the experiment. *Volgograd Journal of Medical Research*. 2010; 2 (26): 32–36. [In Russ.].
2. Bogatov V.B., Matveeva O.V., Petrov A.B. Effect of cold plasma ablation at human and experimental animal knee cartilage. *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2011; 1 (59): 61–66. [In Russ.].
3. Ivannikov S.V. Laser arthroscopic surgery: Degenerative-dystrophic lesions of the knee joint: Dissertation of Dr. Sc. (Med.). Moscow; 2001. [In Russ.].
4. Sandler B.I., Sulyandziga L.N., Chudnovskiy V.M., et al. Prospects for the treatment of discogenic compression forms of lumbosacral radiculitis using puncture non-endoscopic laser operations. Vladivostok: Dal'nauka; 2004. [In Russ.].
5. Bagratashvili V.N., Baskov A.V., Borshchenko I.A., et al. Laser engineering of cartilage. Moscow: Fizmatlit; 2006. [In Russ.].
6. Sobol E., Baskov A., Shekhter A., et al. Laser regeneration of spine discs cartilage: mechanisms, in-vivo study and clinical applications. *Lecture notes in electrical engineering*. 2008; 12 LNEE: 259–266. DOI: 10.1007/978-0-387-71809-5_24
7. Holden P.K., Li C., Da Costa V., et al. The effects of laser irradiation of cartilage on chondrocyte gene expression and the collagen matrix. *Lasers Surg Med*. 2009; 41 (7): 487–491. DOI: 10.1002/lsm.20795
8. Wong B.J.F., Pandhoh N., Truong M.T., et al. Identification of chondrocyte proliferation following laser irradiation, thermal injury, and mechanical trauma. *Lasers Surg Med*. 2005; 37 (1): 89–96. DOI: 10.1002/lsm.20180
9. Yusupov V.I., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N. Laser-induced hydrodynamics in water-saturated biotissues. 1. Generation of bubbles in liquids. *Laser Phys*. 2010; 20 (7): 1641–1646. DOI: 10.1134/S1054660X1014001X
10. Yusupov V.I., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N. Laser-induced hydrodynamics in water-saturated biotissues. 2. Effect on delivery fiber. *Laser Phys*. 2011; 21 (7): 1230–1234. DOI: 10.1134/S1054660X11140015

11. Yusupov V.I., Bulanov V.V., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N. Laser-induced hydrodynamics in water-saturated tissue: III. Optoacoustic effects. *Laser Phys.* 2013; 24 (1): 015601. DOI: 10.1088/1054-660X/24/1/015601
12. Yusupov V.I., Konovalov A.N., Ul'yanov V.A., Bagratashvili V.N. Generation of acoustic waves by cw laser radiation at the tip of an optical fiber in water. *Acoust Phys.* 2016; 62 (5): 537–544. DOI: 10.1134/S1063771016050183
13. O'Connor C.J., Case N., Guilak F. Mechanical regulation of chondrogenesis. *Stem Cell Res Ther.* 2013; 4 (4): 61. DOI: 10.1186/scrt211
14. Fahy N., Alini M., Stoddart M.J. Mechanical stimulation of mesenchymal stem cells: Implications for cartilage tissue engineering. *J Orthop Res.* 2018; 36 (1): 52–63. DOI: 10.1002/jor.23670
15. Juang Y.M., Lee C.Y., Hsu W.Y., et al. Proteomic analysis of chondrocytes exposed to pressure. *Biomed Chromatogr.* 2010; 24 (12): 1273–1282. DOI: 10.1002/bmc.1436
16. Mizuno S., Ogawa R. Using changes in hydrostatic and osmotic pressure to manipulate metabolic function in chondrocytes. *Am J Physiol Cell Physiol.* 2011; 300 (6): C1234–C1245. DOI: 10.1152/ajpcell.00309.2010
17. Karamesinis K., Spyropoulou A., Dalagiorgou G., et al. Continuous hydrostatic pressure induces differentiation phenomena in chondrocytes mediated by changes in polycystins, SOX9, and RUNX2. *J Orolfac Orthop.* 2017; 78 (1): 21–31. DOI: 10.1007/s00056-016-0061-1
18. Sobol E.N., Baum O.I., Shekhter A.B., et al. Laser-induced regeneration of cartilage. *J Biomed Opt.* 2011; 16 (8): 080902. DOI: 10.1117/1.3614565
19. Alexandrovskaya Y.M., Baum O.I., Shekhter A.B., et al. Mechanisms of laser activation of chondrocytes in osteoarthritis healing. *Laser Phys Lett.* 2018; 15 (8): 085601. DOI: 10.1088/1612-202X/aac746
20. Shesternya N.A., Ivannikov S.V., Zharova T.A., et al. Clinical and biological aspects of gonarthrosis treatment. *Clinical Gerontology.* 2011; 17 (3–4): 37–47. [In Russ.].
21. Ivannikov S.V., et al. Laser chondroplasty – further development of knee arthroscopy. *Moscow Surgical Journal.* 2011; 19 (3): 40–43. [In Russ.].

Конфликт интересов

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Сведения об авторах

Лычагин Алексей Владимирович – доктор медицинских наук, заведующий кафедрой травматологии, ортопедии и хирургии катастроф, ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет); e-mail: dr.lychagin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2202-8149>

Иванников Сергей Викторович – доктор медицинских наук, профессор кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф, ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет); e-mail: s.ivannikov@icloud.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6865-3337>

Юсупов Владимир Исаакович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт фотонных технологий РАН, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН; e-mail: iouss@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9438-6295>

Семенова Людмила Алексеевна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник отдела патоморфологии, клеточной биологии и биохимии,

ФГБНУ «Центральный научно-исследовательский институт туберкулеза»; e-mail: lu.kk@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1782-7763>

Старцева Екатерина Дмитриевна – аспирант кафедры лазерной физики, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ»; e-mail: startsevaed17@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6238-8528>

Сурин Владимир Владимирович – аспирант кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф, ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет); e-mail: rassvet_1612@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1332-6037>

Тинькова Ирина Олеговна – кандидат медицинских наук, патологоанатом, ГБУЗ города Москвы «Городская клиническая больница им. С.П. Боткина» Департамента здравоохранения города Москвы; e-mail: tinkovairen74@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6960-1184>

Найман Андрей Игоревич – кандидат медицинских наук, врач-травматолог-ортопед, ГБУЗ города Москвы «Городская клиническая больница им. С.П. Боткина» Департамента здравоохранения города Москвы; e-mail: Naimann.a@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5999-3770>

Жарова Татьяна Альбертовна – доктор медицинских наук, доцент кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф, ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет); e-mail: zharova-tma@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7872-6149>

Пржевальский Павел Андреевич – аспирант кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф, ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет); e-mail: 89096312422@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9479-6198>

Ян Яньбинь – аспирант кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф, ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет); e-mail: yanbin.yang@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1933-7511>

Information about authors

Lychagin Alexey – Dr. Sc. (Med.), Head of the Department of Traumatology, Orthopaedics and Disaster Surgery, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of Russia; e-mail: dr.lychagin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2202-8149>

Ivannikov Sergey – Dr. Sc. (Med.), Professor at the Department of Traumatology, Orthopaedics and Disaster Surgery, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of Russia; e-mail: s.ivannikov@icloud.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6865-3337>

Yusupov Vladimir – Cand. Sc. (Tech.), Senior Researcher, Institute of Photon Technologies of Federal Scientific Research Centre "Crystallography and Photonics" of Russian Academy of Sciences; e-mail: iouss@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9438-6295>

Semenova Lyudmila – Cand. Sc. (Med.), Senior Researcher at the Department of Pathomorphology, Cell Biology and Biochemistry, Central Tuberculosis Research Institute; e-mail: lu.kk@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1782-7763>

Startseva Yekaterina – Postgraduate at the Department of Laser Physics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute); e-mail: startsevaed17@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6238-8528>

Surin Vladimir – Postgraduate at the Department of Traumatology, Orthopaedics and Disaster Surgery, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of Russia; e-mail: rassvet_1612@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1332-6037>

Tinkova Irina – Cand. Sc. (Med.), Pathologist, Botkin Hospital; e-mail: tinkovairen74@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6960-1184>

Naimann Andrei – Cand. Sc. (Med.), Orthopedic Traumatologist, Botkin Hospital; e-mail: Naimann.a@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5999-3770>

Zharova Tatyana – Dr. Sc. (Med.), Associate Professor at the Department of Traumatology, Orthopaedics and Disaster Surgery, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of Russia; e-mail: zharova-mma@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7872-6149>

Przhevalskii Pavel – Postgraduate at the Department of Traumatology, Orthopaedics and Disaster Surgery, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of Russia; e-mail: 89096312422@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9479-6198>

Yang Yanbin – Postgraduate at the Department of Traumatology, Orthopaedics and Disaster Surgery, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of Russia; e-mail: yanbin.yang@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1933-7511>