

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОИНДУЦИРОВАННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГЕМОГЛОБИНА НА НАГРЕВ КОЖИ ПРИ ОДНО- И ДВУХВОЛНОВОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 450 И 980 НМ

Машарская А.А. (Университет ИТМО), Чучин В.Ю. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – профессор, доктор физико-математических наук,
Беликов А.В. (Университет ИТМО)

Введение

При склерозировании сосудов лазерное излучение поглощается патологическими сосудами, нагревая их до температуры $T_{\text{скл}} \sim 80^\circ\text{C}$, что приводит к слипанию стенок сосуда и его необратимому повреждению [1]. Известно, что при температурах $46\text{--}48^\circ\text{C}$ оксигемоглобин крови преобразуется в дезоксигемоглобин, а при дальнейшем нагреве до $65\text{--}70^\circ\text{C}$ происходит его окисление с образованием метгемоглобина [2], что приводит к изменению отражения, поглощения и пропускания света кожей. Регистрация изменений в спектре отраженного кожей света, связанных с изменением концентрации дезоксигемоглобина и метгемоглобина в содержащейся в ней крови, может позволить определить момент при ее лазерном нагреве, когда в определенной спектральной области произойдет максимальное просветление кожи за счет термостимулированного замещения одного хромофора другим, что позволит доставить свет в биоткань на большую чем обычно глубину. Однако в эксперименте *in vivo* затруднительно детально изучить процессы, влияющие на изменение оптических свойств биотканей при лазерном воздействии, особенно те, которые происходят в глубине ткани, включая динамику распределения температуры, локальное преобразование хромофоров и их влияние на оптические характеристики. Используя численное моделирование, можно изучить эти процессы, анализируя вклад термически индуцированных преобразований хромофоров в оптические и теплофизические процессы, происходящие в биоткани под действием лазерного излучения. Численное моделирование дает возможность установить связь между параметрами лазерного излучения, изменением хромофорного состава биоткани и наблюдаемыми в эксперименте оптическими эффектами, что важно знать для разработки обратных связей в лазерных системах. В основу работы обратной связи может быть положен контроль интенсивности отражённого от кожи оптического сигнала на тех длинах волн, на которых происходит наибольшее изменение оптических свойств кожи в результате её лазерного нагрева, например при замещении оксигемоглобина крови дезоксигемоглобином или метгемоглобином.

Основная часть

В результате эксперимента по измерению спектров отражения крови до и после лазерного воздействия излучением с длиной волны 450 нм или 980 нм было установлено, что наибольшее изменение интенсивности отраженного от слоя крови света наблюдается в области 600 нм, что может быть связано с термостимулированным превращением оксигемоглобина крови в дезоксигемоглобин [3]. В рамках настоящего исследования разработана экспериментальная установка и зарегистрированы изменения спектров отражения цельной крови и кожи лабораторного животного (ухо кролика) в диапазоне 400–800 нм, происходящие в результате лазерного воздействия с длиной волны 450 нм, или 980 нм раздельно (одноволновое воздействие), или их комбинацией (двухволновое воздействие), а также внешний вид этих биотканей до и после такого лазерного воздействия. В рамках разработанной ранее семислойной оптической модели кожи [4] методом Монте-

Карло проведена интерпретация полученных результатов, оценен вклад снижения сатурации крови в составе кожи в наблюдаемые в эксперименте изменения спектра отражения. Также в рамках разработанной ранее теплофизической модели кожи [5] в программе “COMSOL Multiphysics 6.1” (США) был выполнен теплофизический расчёт и оценено влияние снижения сатурации крови на нагрев глуболежащих слоев кожи. Результаты исследования позволили определить параметры одно- и двухволнового лазерного воздействия, приводящие к просветлению кожи животного, и спектральные диапазоны, в которых просветление может быть связано с преобразованием оксигемоглобина крови в дезоксигемоглобин или метгемоглобин. Эти исследования дополняются данными регистрации внешнего вида биотканей и результатами гистологического исследования тканей животного.

Выводы

В экспериментах установлено, что лазерный нагрев цельной крови и кожи лабораторного животного лазерным излучением с длиной волны 450 нм (средняя мощность 20 Вт, длительность импульса 150 мс), или 980 нм (90 Вт, 150 мс), или их комбинацией вызывает изменения в спектре отражения этих биотканей. Обнаружено, что лазерный нагрев увеличивает отражение цельной крови человека на длинах волн меньших 595 ± 10 нм и уменьшает на длинах волн больших 595 ± 10 нм. Изменения спектров отражения цельной крови могут быть ассоциированы с трансформацией оксигемоглобина в дезоксигемоглобин. В *in vivo* эксперименте установлено, что сразу после лазерного нагрева отражение кожи лабораторного животного (ухо кролика) увеличивается во всем диапазоне длин волн (400–800 нм), при этом на длине волны 600 ± 10 нм максимальные изменения в спектре отражения регистрируются при двухволновом лазерном воздействии сначала излучением с длиной волны 980 нм, а затем сразу с длиной волны 450 нм. В рамках оптической компьютерной модели кожи установлено, что этот эффект можно связать со снижением сатурации ее крови кислородом. В рамках теплофизической модели кожи установлено, что уменьшение сатурации ее крови кислородом приводит к большему нагреву глуболежащих сосудов при двухволновом лазерном воздействии сначала с длиной волны 450 нм, а затем с длиной волны 980 нм.

Список использованных источников:

1. E.V. Ross, Y. Domankevitz, "Laser treatment of leg veins: physical mechanisms and theoretical considerations," *Lasers in Surgery and Medicine* 36(2), 105-116 (2005).
2. S. Kimel, et al., "Influence of laser wavelength and pulse duration on gas bubble formation in blood-filled glass capillaries," *Lasers in Surgery and Medicine* 36(4), 281–288 (2005).
3. V.Yu. Chuchin, A.A. Masharskaya, A.V. Belikov, "Investigation of changes in the reflection spectrum of human blood when exposed to laser radiation with wavelengths of 450 or 980 nm," *Journal of Biophotonics* (2024): e202400251.
4. Беликов А. В., Чучин В. Ю. Численное исследование влияния концентрации метгемоглобина в крови на поглощение света в коже человека // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – Т. 23. – №. 4. – С. 685-695.
5. Belikov A.V., Chuchin V.I. Investigation of the influence of thermally-induced methemoglobin in the skin layers on the efficiency of laser sclerosing of telangiectasias // Семинар БРИКС по Биофотонике-2023: сборник материалов семинара БРИКС - 2023, pp. 107-112

Машарская А.А. (автор)

Подпись

Чучин В.Ю. (автор)

Подпись

Беликов А.В. (научный руководитель)

Подпись