

ОПТИКА / OPTICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.172>

РАЗРАБОТКА МЕТОДА МОНИТОРИНГА ЛАЗЕРНОГО АБЛЯЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРОСКОПИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭНДОСКОПИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Научная статья

Терешенкова О.А.^{1,*}, Ким А.А.²

¹ ORCID : 0000-0003-1669-146X;

² ORCID : 0000-0002-8923-2953;

^{1,2} Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (tereshenkova_oa[at]mail.ru)

Аннотация

Одной из проблем при проведении медицинских операций с применением лазерного излучения для абляции тканей является невозможность прямого наблюдения области воздействия. Воздействие лазерного излучения в зависимости от режима работы (мощности, длины волны излучения, размера области засветки), а также типов поражаемых тканей может иметь как недостаточный, так и чрезмерный эффект, выражающийся в некрозе, карбонизации тканей и пригаранием оптического световода. Обратная связь между величиной воздействия на ткани и интенсивностью оказания этого воздействия должна быть достаточно быстродействующей, чтобы предотвратить нежелательные повреждения при лазерной абляции. В статье представлены результаты исследования метода оценки лазерного абляционного воздействия на биологически ткани в режиме реального времени для эндоскопических применений. По результатам представленных экспериментов была показана работоспособность, эффективность и быстродействие.

Ключевые слова: лазерная абляция тканей, спектроскопия, эндоскопия.

THE DEVELOPMENT OF A METHOD FOR MONITORING LASER ABLATIVE EXPOSURE USING SPECTROSCOPY IN ENDOSCOPIC OPERATIONS

Research article

Tereshenkova O.A.^{1,*}, Kim A.A.²

¹ ORCID : 0000-0003-1669-146X;

² ORCID : 0000-0002-8923-2953;

^{1,2} D.F. Ustinov Baltic State Technical University "Voenmekh", Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (tereshenkova_oa[at]mail.ru)

Abstract

One of known problems of medical surgeries of laser ablation of tissues is no possibility of straight monitoring of field of ablation. Laser exposure can cause both excessive and insufficient effect what depends on laser settings (laser power, wavelength, size of field of illumination). Excessive ablation causes necrosis, carbonization of tissues and optical fiber may be burnt. Feedback between the value of exposure and performing degree of ablation must be fast for prevention of the unwanted damage during laser ablation. The article presents results of the research of the method of the real-time estimations of laser ablation on biological tissues for using during endoscopic surgery. According to results of preformed experiments were showed efficiency, workability and operation speed of the method.

Keywords: laser ablation of tissues, spectroscopy, endoscopic surgery.

Введение

С начала 90х годов 20 века в медицине началось активное развитие малоинвазивных эндоскопических операций, которые позволяют направленно осуществлять воздействие на целевую область тканей, а также уменьшить степень хирургического вмешательства [1]. В настоящее время широкое распространение получили малоинвазивные эндоскопические операции, в ходе которых производится абляционное воздействие на ткани. Для воздействия применяются различные воздействующие факторы: радиочастотное, лазерное излучения, низкотемпературное воздействие [2], [3], [4]. Такой вид операций применяется во многих областях медицины, а именно в кардиологии, флебологии и онкологии [2], [3], [4]. Эндоскопические операции по абляционному воздействию, например, применяются для лечения аритмии, нарушения ритма сердца, варикозной болезни вен нижних конечностей [2], [4]. Каждая из областей медицины использует различные методы для обеспечения эффективности операции. В частности, во флебологии при эндоваскулярной лазерной абляции вен режим работы лазера определяется по предварительным ультразвуковым исследованиям вен [4]. При радиочастотной или лазерной абляции сердца необходимый эффект воздействия наблюдается по ЭКГ или по измерению разности потенциалов области, подвергаемой воздействию [2]. Описанные методы мониторинга абляционного воздействия не дают полной картины об эффективности абляции ткани, а также не всегда могут быть использованы в процессе проведения операции, что может стать причиной чрезмерного или недостаточного воздействия на биологическую ткань. Развитие быстродействующих методов мониторинга абляционных процессов в режиме реального времени для использования в эндоскопических операциях

является актуальной задачей. За счет использования методов спектроскопии может быть выполнен контроль степени абляционного воздействия.

Описание предлагаемого метода мониторинга лазерной абляции

Был предложен метод мониторинга абляционного лазерного воздействия в режиме реального времени для использования во время эндоскопических операций. Метод основывается на непрерывной регистрации спектральной характеристики области, которая подвергается лазерному абляционному воздействию. Схема метода представлена на рисунке 1.

В соответствии с предложенным методом, область, подвергающаяся лазерному абляционному воздействию, подсвечивается широкополосным излучением видимого оптического диапазона, которое подводится к области воздействия по оптическому волокну, по которому также подводится и воздействующее лазерное излучение. Обратное рассеянное излучение по тому же оптическому волокну через систему спектрального разделения поступает на спектрометр. С помощью системы спектрального разделения осуществляется объединение широкополосного излучения подсветки и лазерного воздействующего излучения, а также отсечение излучения лазера в обратном рассеянном излучении. Описанный метод может использоваться как дополнение к существующим устройствам для лазерной абляции тканей, а также может быть изменен для использования с приборами, которые производят абляцию тканей другим воздействующим излучением.

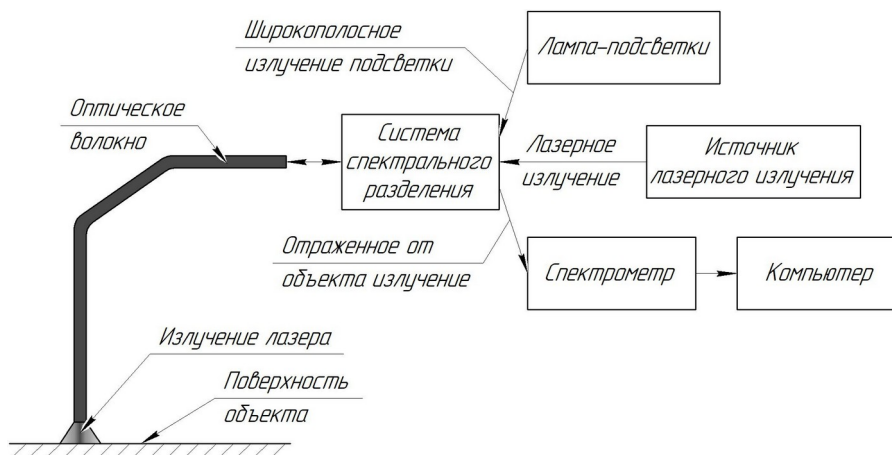


Рисунок 1 - Схема метода
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.172.1>

Описание изменений в мышечных тканях в ходе абляционного воздействия

При воздействии различными факторами (высокая или низкая температура, ультрафиолетовое, инфракрасное, ионизирующее и пр. излучения) на мышечную ткань происходит денатурация белка, входящего в её состав. Под воздействием увеличивается колебательное движение молекулы белка, происходит разрыв слабых взаимосвязей и белок разрушается. Денатурация белков мышечных тканей происходит при достижении определенных для каждого белка температур. Например, температура денатурации наиболее чувствительного к нагреву белка – миозина – составляет 45-50°C. Данный белок составляет до 40-60% от количества мышечных белков [5]. Для белка миоглобина денатурация наступает при температуре 60°C [6], [7]. В молекуле этого белка содержится хромофорная группа гем, обуславливающая окраску мышечных тканей. При денатурации из гема образуется гемин, обуславливающий изменение цвета тканей.

Первые эксперименты по лазерной абляции биологических тканей

В ходе исследования метода были проведены экспериментальные исследования по лазерному абляционному воздействию на бедренную мышцу и миокард свиньи *ex vivo*. Для лазерного воздействия использовался хирургический лазер с длиной волны 1064нм и волоконным выходом. Подсветка области воздействия осуществлялась с помощью галогеновой лампы AvaLight Hal-S фирмы Avantes [8]. Регистрация данных производилась спектрометром AvaSpec-2048, Avantes [9]. Для воздействия использовался диапазон мощности лазерного излучения 15-30Вт, а длительность воздействия варьировалась в зависимости от наблюдаемого результата. Поверхность ткани в ходе абляционного воздействия подвергалась охлаждению за счет ирригации раствором NaCl.

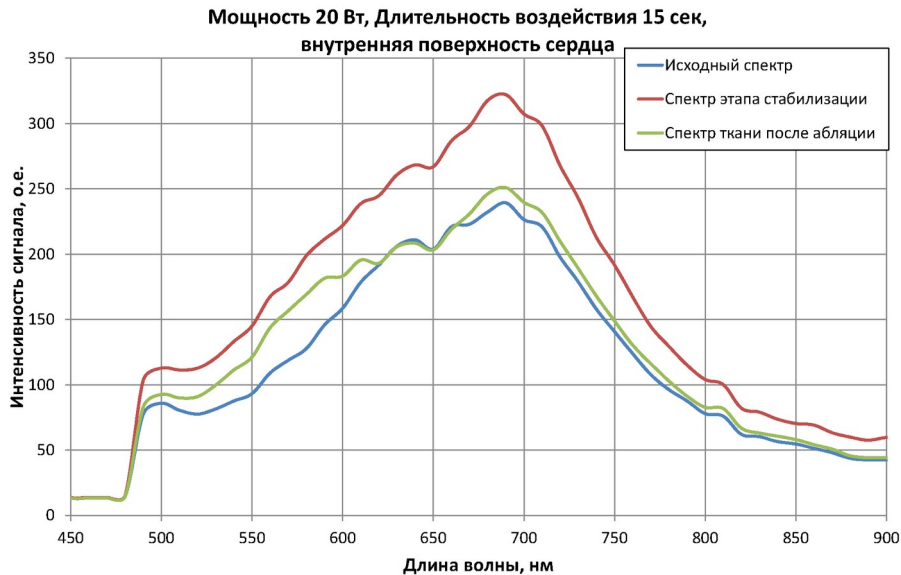


Рисунок 2 - Спектральные характеристики на разных этапах воздействия для эксперимента на сердечной мышце свиньи для мощности 20Вт и длительности воздействия 15 секунд
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.172.2>

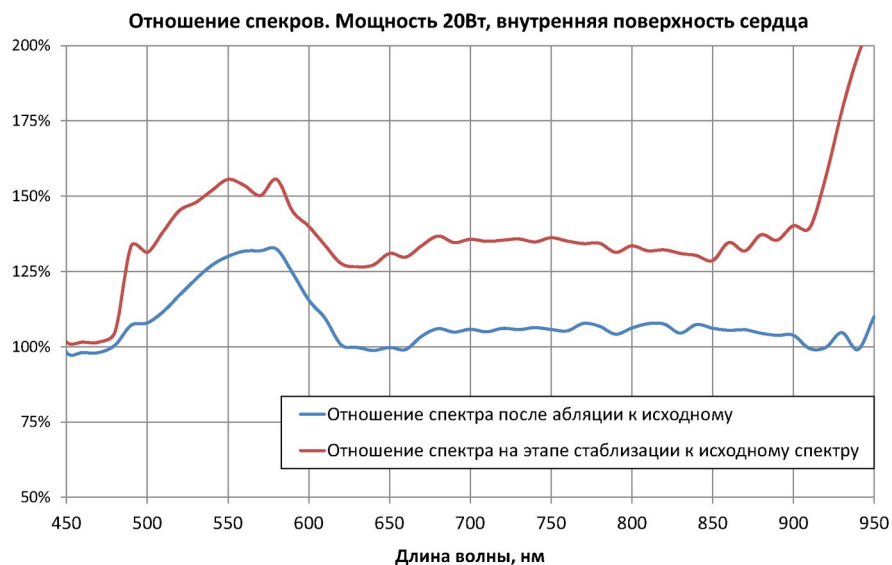


Рисунок 3 - Относительные графики для эксперимента на сердечной мышце свиньи для мощности 20Вт и длительности воздействия 15 секунд
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.172.3>

В ходе экспериментов была отмечена характерная динамика изменения спектральной характеристики при оказании воздействия, которая в большинстве случаев состоит из трех этапов: этап роста интенсивности сигнала, этап стабилизации и этап падения. Общий рост интенсивности характеристики соответствует постепенному развитию абляционного некроза, который на этапе стабилизации распространяется вглубь тканей и не сопровождается видимыми изменениями на поверхности. Последующее снижение интенсивности спектральной характеристики обуславливается тем, что на поверхности ткани началось локальное потемнение, впоследствии переходящее в обугливание. По результатам серии экспериментов были получены спектральные характеристики, которые представлены на рисунках 2 и 4, а также графики отношений спектров (рисунок 3 и 5).

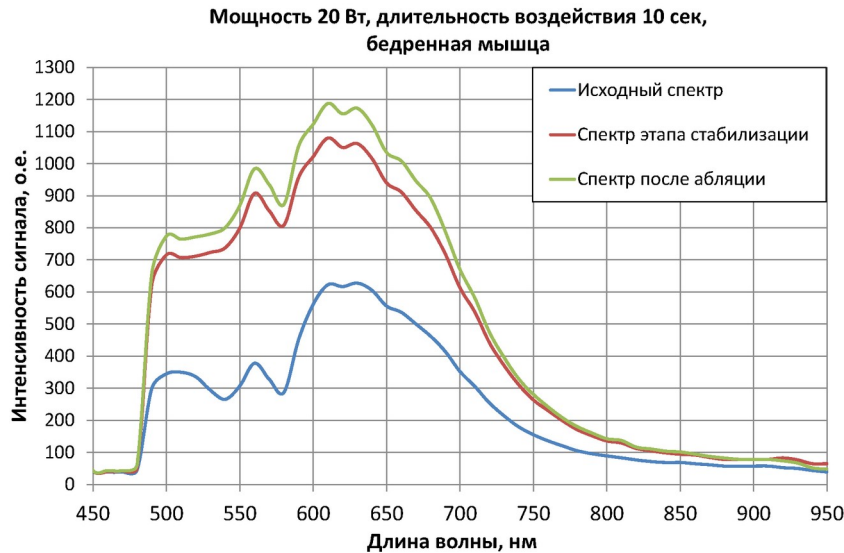


Рисунок 4 - Спектральные характеристики на разных этапах воздействия для эксперимента на сердечной мышце свиньи для мощности 20Вт и длительности воздействия 100 секунд

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.172.4>

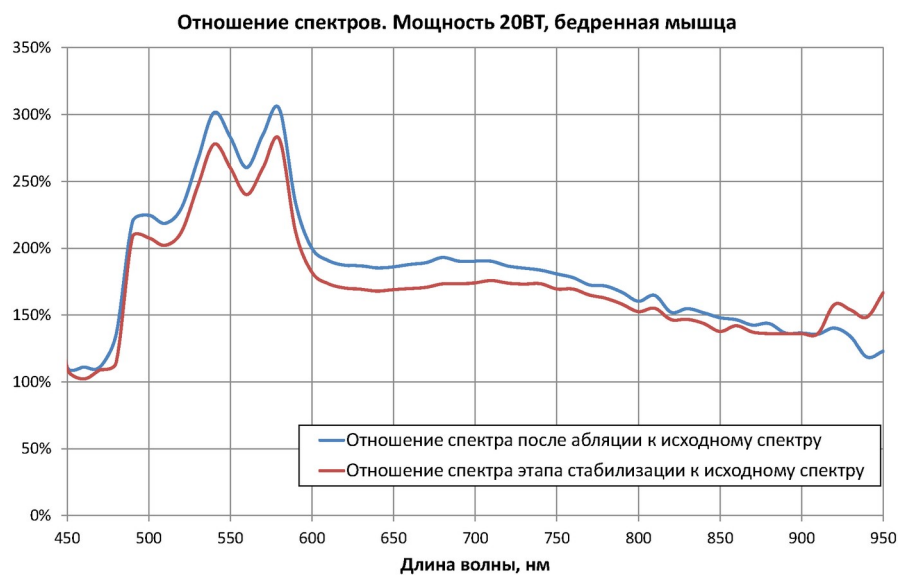


Рисунок 5 - Относительные графики для эксперимента на сердечной мышце свиньи для мощности 20Вт и длительности воздействия 100 секунд

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.172.5>

По экспериментам было выявлено, что воздействие лазерной мощностью больше 20Вт чаще приводит к негативному воздействию (вскипанию или разрыву) на ткани.

Описание оптической системы спектрального разделения

Для эффективной работы предлагаемого метода была разработана оптическая система спектрального разделения. Данная система позволяет объединять широкополосное излучение лампы подсветки и лазерное воздействующее излучение в оптическом волокне катетера, а также избежать засветки приемника спектрометра лазерным излучением. Оптическая система была помещена в корпус, в котором также размещаются оптические волокна. Внешний вид разработанной оптической системы представлен на рисунке 6.

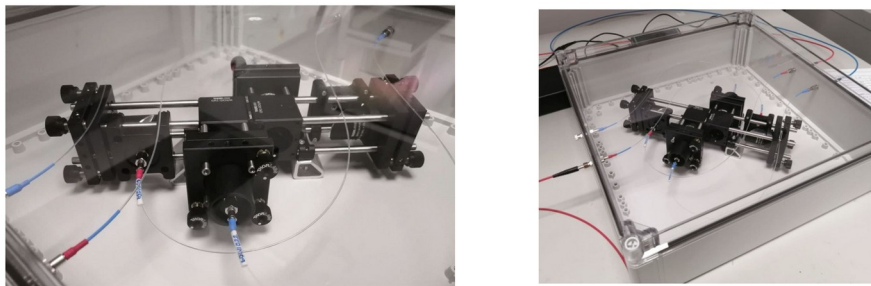


Рисунок 6 - Оптическая система спектрального разделения в корпусе
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.172.6>

Описание программы разработанной для спектрометра

В рамках исследования также было разработано дополнительное программное обеспечение для спектрометра AvaSpec-2048. Разработанная программа имеет несколько особенностей, отличающих её от стандартного программного обеспечения AvaSoft. Разработанное ПО позволяет отображать спектральные характеристики в течение некоторого промежутка времени в виде трехмерной функции, а также сохранять двумерный массив данных со спектральными характеристиками в течение задаваемого интервала времени в формате данных *.csv. В ПО отображение спектра зависит от настроек временных параметров – времени интеграции и усреднения. При низкой интенсивности поступающего на спектрометр сигнала для увеличения различимости спектральных составляющих предусмотрена возможность увеличить время накопления сигнала. Частота записи данных зависит от времени накопления и числа усреднений. Также программа позволяет отображать и записывать первые две производные по частоте и по времени. В разработанной программе реализована возможность производить нормировку спектральной функции на выбранный начальный спектр. Дополнительно была добавлена функция воспроизведения записанных файлов. Окно разработанной программы представлено на рисунке 7.

На разработанное ПО было получено свидетельство о регистрации программы ЭВМ №2022611677 [10].

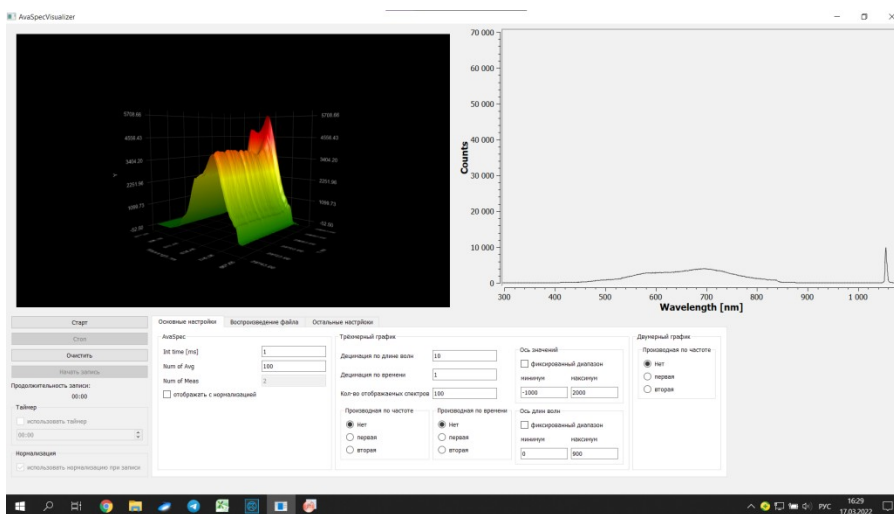


Рисунок 7 - Окно разработанной программы для спектрометра
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.172.7>

Второй этап экспериментальных исследований

Следующим этапом были проведены экспериментальные исследования с использованием разработанной оптической системы спектрального разделения и разработанного программного обеспечения для спектрометра. В этих экспериментах выполнялось лазерное абляционное воздействие на миокард свиньи *ex vivo* в различных условиях: на воздухе, при погружении образца в раствор NaCl и смесь раствора NaCl и крови. Время воздействия варьировалось в зависимости от наблюдаемого результата воздействия, а диапазон воздействующей лазерной мощности был 2,5-10Вт. Результаты воздействия наблюдались с помощью разработанного программного обеспечения.

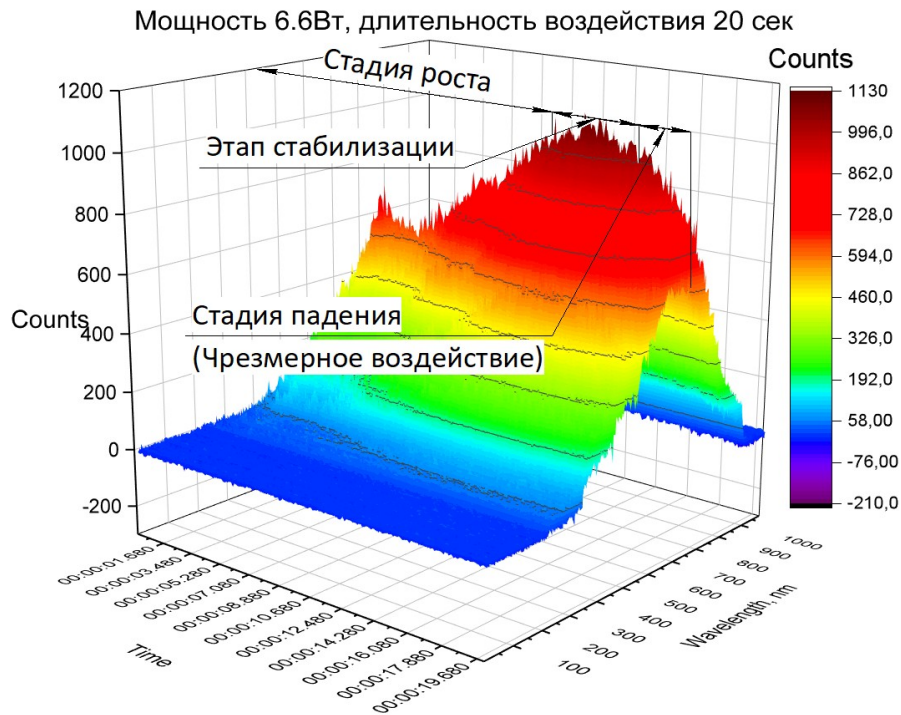


Рисунок 8 - Трехмерные спектральные характеристики для проведенных эксперимента в смеси раствора NaCl и крови на сердечной мышце свиньи
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.172.8>

В ходе экспериментов были записаны нормированные трехмерные спектральные характеристики, некоторые из которых представлены на рисунках 8-10.

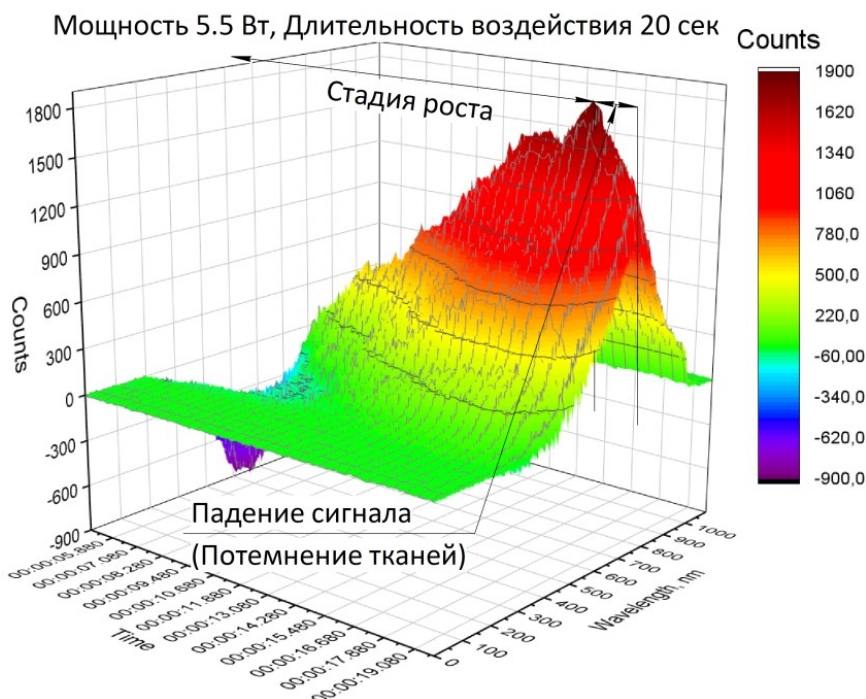


Рисунок 9 - Трехмерные спектральные характеристики для проведенных эксперимента в смеси растворе NaCl на сердечной мышце свиньи эксперимент в смеси раствора NaCl и крови
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.172.9>

Во всех спектральных характеристиках были отмечены выявленные ранее характерные этапы эволюции спектральной характеристики при абляционном воздействии. В одном из экспериментов в спектре на этапе падения были отмечены явные спектральные изменения (рисунок 10). Спектры в некоторые моменты времени для этапа падения представлены на рисунке 11.

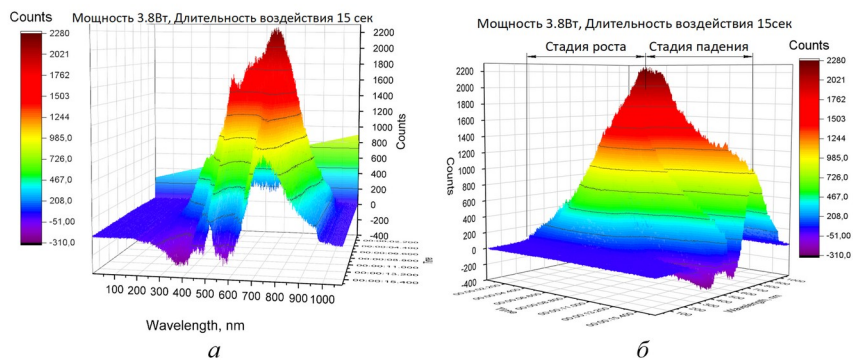


Рисунок 10 - Спектральная характеристика для эксперимента на воздухе:
 а – вид спереди; б – изометрия
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.172.10>

На рисунке 11 видны спектральные пики на длине волны 580нм и в области 680-720нм. Подобные спектральные пики могут быть использованы для более глубокого анализа абляционного процесса.

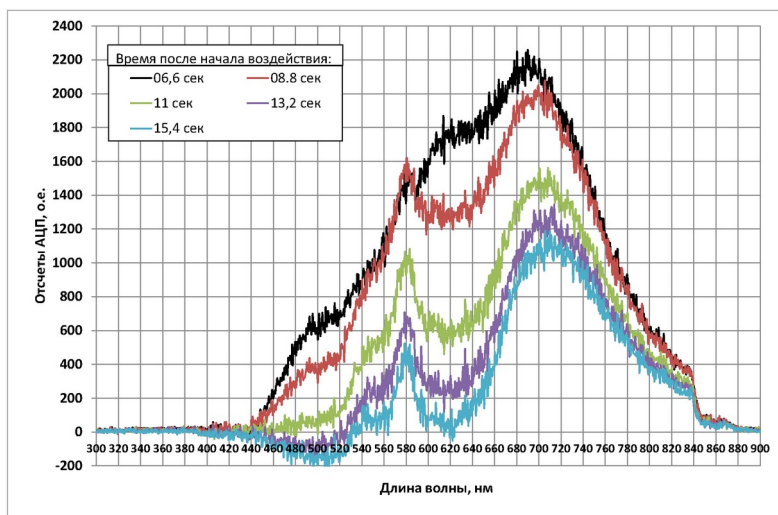


Рисунок 11 - Спектры этапа падения в некоторые моменты времени
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.172.11>

По результатам проведенных экспериментов в 93% случаев удалось отследить начало чрезмерного воздействия на ткань и прекратить воздействие до начала повреждения поверхности миокарда в области абляции. Примеры полученной абляции тканей показаны на рисунке 12.

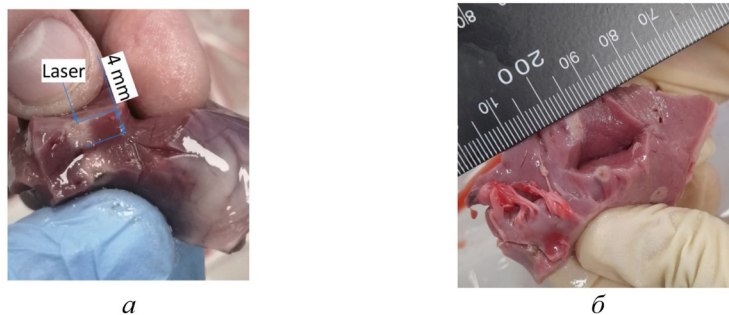


Рисунок 12 - Абляция тканей, полученная в ходе экспериментов:

a – эксперимент в растворе NaCl при мощности 5,5Вт и длительности воздействия 20 секунд; *б* – эксперимент в смеси раствора NaCl и крови при мощности 6,6Вт и длительности воздействия 20 секунд

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.172.12>

Заключение

На основе материалов, представленных в данной статье, были получены следующие результаты:

- 1) предложен и апробирован метод мониторинга степени абляционного лазерного воздействия в режиме реального времени в процессе проведения эндоскопических операций;
- 2) разработана оптическая система спектрального разделения и программное обеспечение для спектрометра;
- 3) показана эффективность и быстродействие предложенного метода на основе экспериментальных исследований, в которых в 93% случаев (проведено 43 эксперимента) удалось отследить начало чрезмерного воздействия на ткань.

В настоящий момент продолжают экспериментальные исследования для выявления более точных закономерностей.

Финансирование

Данное исследование было выполнено за счет средств по гранту Фонда Содействия Инноваций по программе «УМНИК. НТИ-Хелснет» договор №16517ГУ/2021, а также при материально-технической поддержке ФГБОУ ВО «БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», АО «Лазерные системы» и ФБГУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Министерства здравоохранения РФ.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

This study was carried out at the expense of funds from a grant from the Foundation for the Promotion of Innovations under the program "SMART GUY. NTI-Helsnet" agreement No. 16517GU/2021, as well as with the material and technical support of the D.F. Ustinov BSTU VOENMEH, JSC Laser Systems and the V.A. Almazov NMIC Federal State Budgetary Educational Institution of the Ministry of Health of the Russian Federation.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. St. Peter S.D. History of minimally invasive surgery / S.D. St. Peter, G.W. Holcomb // Endoscopic Surgery in Infants and Children. — 2009. — P. 1-5.
2. Weber H. Sagerer-Gerhardt The Development of a laser catheter with improved monitoring of lesion formation during arrhythmia ablation / H. Weber, L. Schmitz, A. Heinze et al. — Nova Science Publishers, 2017. — P. 4-49.
3. Москвичева Л.И. Возможности современных методов абляции при нерезектабельном местно-распространенном раке поджелудочной железы / Л.И. Москвичева // Research'n Practical Medicine Journal. — 2018. — №2. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-sovremennyh-metodov-ablyatsii-pri-nerezektabelnom-mestno-rasprostranennom-rake-podzheludochnoy-zhelezy> (дата обращения: 22.05.2022).
4. Катанов Е.С. Эндоваскулярная лазерная коагуляция и физиотерапия при лечении варикозной болезни вен нижних конечностей / Е.С. Катанов, Т.Н. Ерёмкина, А.В. Семёнов // Вестник Чувашского университета. — 2014. — №2. — С. 251-256.
5. Терентьев А.А. Биохимия мышечной ткани / А.А. Терентьев. — ФГБОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрав России, 2019. — 76 с.
6. Большая Медицинская энциклопедия: Миоглобин. — URL: <https://бмэ.орг/index.php/МИОГЛОБИН> (дата обращения 20.02.2023)
7. Пищевая химия. Лекции: Денатурация белков. — URL: <https://moodle.kstu.ru/mod/book/view.php?id=78456&chapterid=17170> (дата обращения 20.02.2023)

8. Галогенный источник света AvaLight-HAL. — URL: <http://www.avantes.ru/production/lightsource/tec/avalight-hal.php> (дата обращения 20.05.2021)
9. Спектрометр AvaSpec-2048. — URL: <http://www.avantes.ru/spectrometer/tec/avaspec2048.php> (дата обращения 20.05.2021)
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022611677 Российская Федерация. Программа для записи и обработки оптических спектральных характеристик в масштабе реального времени / О.А. Терешенкова, А.А. Ким, И.А. Богдановский.

Список литературы на английском языке / References in English

1. St. Peter S.D. History of minimally invasive surgery / S.D. St. Peter, G.W. Holcomb // Endoscopic Surgery in Infants and Children. — 2009. — P. 1-5.
2. Weber H. Sagerer-Gerhardt The Development of a laser catheter with improved monitoring of lesion formation during arrhythmia ablation / H. Weber, L. Schmitz, A. Heinze et al. — Nova Science Publishers, 2017. — P. 4-49.
3. Moskvicheva L.I. Vozmozhnosti sovremennyh metodov ablyatsii pri nerezektabel'nom mestno-rasprostranennom rake podzheludochnoj zhelezy [Possibilities if modern ablation methods for unresectable locally advanced pancreatic cancer] / L.I. Moskvicheva // Research'n Practical Medicine Journal. — 2018. — №2. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-sovremennyh-metodov-ablyatsii-pri-nerezektabelnom-mestno-rasprostranennom-rake-podzheludochnoy-zhelezy> (accessed: 22.05.2022). [in Russian]
4. Katanov E.S. Jendovaskuljarnaja lazernaja koaguljacija i fizioterapija pri lechenii varikoznoj bolezni ven nizhnih konechnostej [Endovascular laser coagulation and physiotherapy in the treatment of varicose veins of the lower extremities] / E.S. Katanov, T.N. Erjomina, A.V. Semjonov // Vestnik Chuvashskogo universiteta [Newsletter of the Chuvash University]. — 2014. — №2. — P. 251-256. [in Russian]
5. Terent'ev A.A. Biohimija myshechnoj tkani [Biochemistry of muscle tissue] / A.A. Terent'ev. — Pirogov Russian National Research Medical University, 2019. — 76 p. [in Russian]
6. Bol'shaja Medicinskaja jenciklopedija: Mioglobin [The Great Medical Encyclopedia: Myoglobin]. — URL: <https://bmje.org/index.php/MIOGLOBIN> (accessed 20.02.2023) [in Russian]
7. Pishhevaja himija. Lekcii: Denaturacija belkov [Food chemistry. Lectures: Denaturation of proteins]. — URL: <https://moodle.kstu.ru/mod/book/view.php?id=78456&chapterid=17170> (accessed 20.02.2023) [in Russian]
8. Galogenovyj istochnik sveta AvaLight-HAL [Halogen light source AvaLight-HAL]. — URL: <http://www.avantes.ru/production/lightsource/tec/avalight-hal.php> (accessed 20.05.2021) [in Russian]
9. Spektrometr AvaSpec-2048 [Fiber Optic Spectrometer AvaSpec-2048]. — URL: <http://www.avantes.ru/spectrometer/tec/avaspec2048.php> (accessed 20.05.2021) [in Russian]
10. Svidetel'stvo o registracii programmy dlja JeVM № 2022611677 Rossijskaja Federacija. Programma dlja zapisi i obrabotki opticheskikh spektral'nyh harakteristik v masshtabe real'nogo vremeni [Certificate of registration of the computer program No. 2022611677 Russian The Federation. A program for recording and processing optical spectral characteristics in real time] / О.А. Tereshenkova, А.А. Kim, I.A. Bogdanovskij. [in Russian]