

АКУСТИКА / ACOUSTICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.31>

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ЛАЗЕРНОЙ ПЕРФОРАЦИИ БИОМАТЕРИАЛОВ

Научная статья

Юсупов В.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-9438-6295;

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (iouss[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Лазерные пункционные технологии широко применяются в медицине, при этом актуальным является контроль за выполнением такой процедуры. В работе на примере трубчатых костей показано, что положение торца лазерного волокна в биоматериале может эффективно контролироваться с помощью акустических методов. Акустический мониторинг, являясь надежным индикатором происходящих процессов при перфорации, позволяет определить моменты начала и окончания перфорации внешней стенки кости, а также момент достижения торцом волокна противоположной внешней стенки. При этом важно, что эти эффекты слабо зависят от используемой длины волны лазерного излучения и способов акустической регистрации. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения механизма действия лазерного излучения на биоткани и совершенствования лазерных медицинских технологий.

**Ключевые слова:** лазерное излучение, волокно, перфорация, трубчатая кость, акустика.

ACOUSTIC CONTROL OF LASER PERFORATION OF BIOMATERIALS

Research article

Yusupov V.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-9438-6295;

<sup>1</sup>National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation

\* Corresponding author (iouss[at]yandex.ru)

**Abstract**

Laser puncture technologies are widely used in medicine, and it is important to control the execution of such a procedure. In this work, using tubular bones as an example, it is shown that the position of the laser fibre end face in the biomaterial can be effectively monitored using acoustic methods. Acoustic monitoring, being a reliable indicator of the processes occurring during perforation, makes it possible to determine the moments of the beginning and the end of perforation of the external wall of the bone, as well as the moment when the fibre end reaches the opposite external wall. It is important that these effects are weakly dependent on the laser radiation wavelength used and the methods of acoustic registration. The results obtained can be used to clarify the mechanism of action of laser radiation on biotissues and to improve laser medical technologies.

**Keywords:** laser radiation, fibre, perforation, tubular bone, acoustics.

**Введение**

Лазерные пункционные технологии находят широкое применение в самых разных областях медицины. Своим бурным развитием они обязаны появлению достаточно компактных и мощных лазеров, излучение которых передается по оптическому волокну [1], [2], [4], [5]. Оптоволокно является достаточно тонким, гибким и прочным и может свободно проходить в рабочий канал эндоскопа или выступать в качестве уникального лазерного инструмента в руках хирурга [6], [8], [10], [11].

Во многих таких технологиях с помощью лазерного волокна проводится перфорация (каналирование) различных тканей, при которой происходит формирование лазерного канала (отверстия) в биоткани путем осевого продвижения оптического волокна при нагреве его торца и близлежащих к нему водосодержащих тканей лазерным излучением. Такое каналирование проводится, например, при лечении межпозвоночных дисков в случае радикулитов, для пункционной лазерной деструкции чувствительного корешка тройничного нерва, при лазерной остеоперфорации (перфорации стенки кости) при лечении остеомиелита [12], [13], [14].

Лазерные медицинские перфорации осуществляются с использованием разнообразных параметров лазерного воздействия, включая режимы непрерывного и импульсного излучения, длину волны, мощность лазера, а также различные типы оптических волокон. Кроме того, важным аспектом является контроль силы прижима оптоволокна к поверхности биологической ткани. Все эти факторы существенно влияют на скорость выполнения процедуры, её эффективность, а также на долгосрочные результаты и безопасность применяемой медицинской технологии. В связи с этим для оптимизации параметров воздействия, улучшения существующих лазерных медицинских технологий и разработки новых решений в области медицинской робототехники необходимо не только проводить систематическое и глубокое исследование процессов, происходящих во время лазерного воздействия [1], но и осуществлять контроль выполнения процедуры, который может быть эффективно осуществлен за счет методов оптоакустики [15], [16], [17], [18]. Это позволит не только повысить качество медицинских процедур, но и обеспечить более высокий уровень безопасности для пациентов, а также расширить возможности применения лазеров в различных областях медицины.

Целью работы была оценка возможности проведения акустического контроля при перфорации кости лазерным излучением с использованием волоконных лазеров.

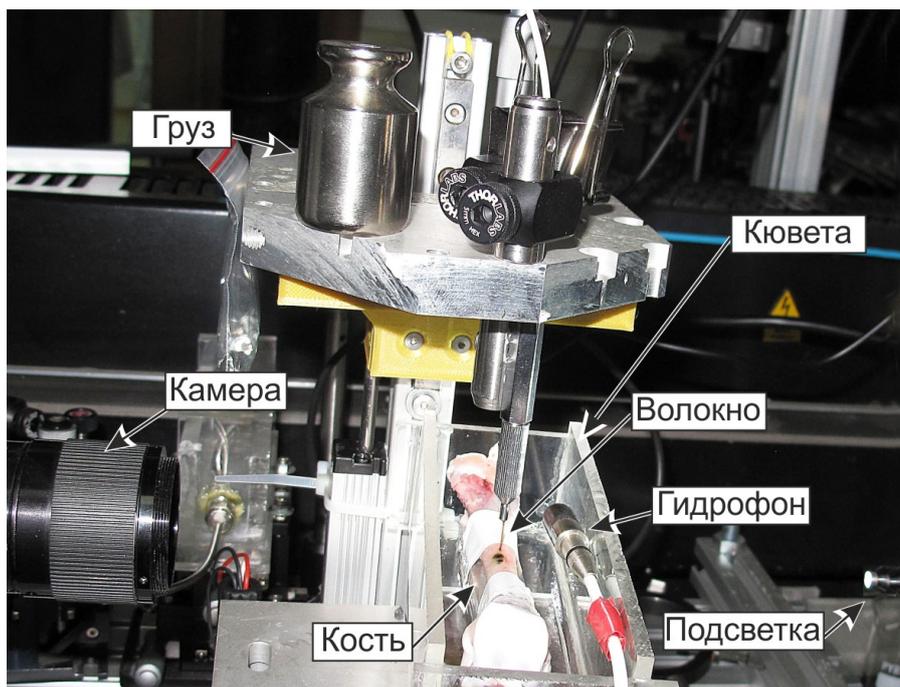


Рисунок 1 - Фотография части установки с подвижной платформой, скоростной видеокамерой и широкополосным гидрофоном

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.31.1>

Сила прижима волокна задавалась с помощью платформы с гирями, которая может свободно перемещаться в вертикальном направлении по миниатюрной линейной направляющей MGN-9 (HIWIN, Тайвань). К платформе подходит шток потенциометрического датчика линейных перемещений (10) ЛТР-50 (Sensor Systems Solutions, РФ), выход которого соединен через преобразователь сигнала с осциллографом или компьютером. Датчик позволяет определять положение торца волокна в биоткани с точностью 10 мкм в диапазоне перемещений 50 мм.

Для контроля динамических процессов в жидкости используется оптоакустический метод [15], [16], [20], [24]. В свободном объеме кюветы с рабочей жидкостью размещался широкополосный гидрофон 8103 (B&K, Denmark) с полосой частот 0.1 Гц–500 кГц (рис. 2а). Для регистрации быстропротекающих процессов под необходимым углом к месту контакта оптоволокну с биоматериалом устанавливался игольчатый гидрофон (Precision Acoustics, UK) диаметром 1 мм с шириной полосы 10 кГц–50 МГц (рис. 2б). Регистрация полученных акустических данных осуществлялась с помощью цифрового четырехканального запоминающего осциллографа GOS 72304 (GW Instek, Тайвань) с полосой дискретизации 300 МГц. Процессы, происходящие в кювете, регистрировались также с помощью скоростной камеры Fastcam SA3 (Photron, США) с фронтальной подсветкой (рис. 2в). Для получения изображений поверхности образцов применялся оптический 3D-микроскоп HRM-300 (Huvtz, Anyang, Республика Корея).

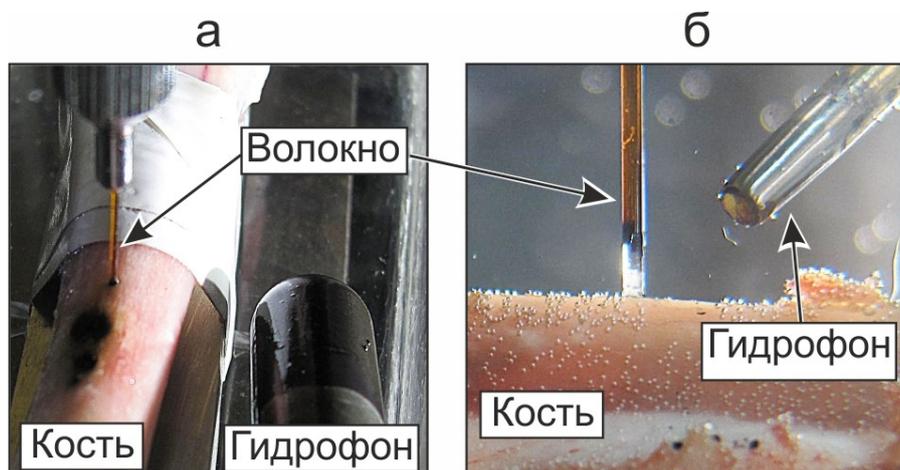


Рисунок 2 - Конфигурация при регистрации акустического сигнала с помощью широкополосного гидрофона (а) и игольчатого гидрофона (б)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.31.2>

### Результаты и обсуждение

На рис. 3а показаны два отверстия, сформированные в кости при продвижении оптического волокна. На поперечном сечении при сломе кости в области одного из таких отверстий (рис. 3б) видна карбонизация материала, как в области стенки, так и в полости кости. Микроструктура боковой поверхности сформированного отверстия хорошо просматривается на 3D снимках (рис. 3в). Здесь выделяется одна крупная полость с диаметром  $\sim 80$  мкм и множество неровностей с характерным размером  $\ll 100$  мкм.

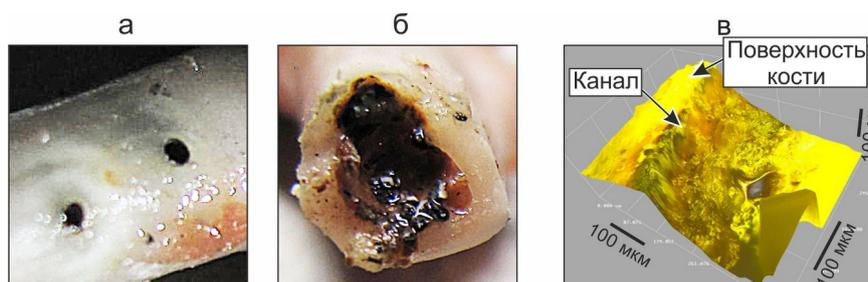


Рисунок 3 - Фотографии поверхности кости с двумя сформированными в ней отверстиями (а) и сечения кости после лазерной перфорации (б) и 3D изображение части входного отверстия (в)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.31.3>

Примечание:  $P=12$  Вт, нагрузка 200 г

Эксперименты показали, что скорость продвижения оптического волокна при формировании отверстия в кости значительно зависит как от материала, так и от наличия воды на поверхности кости (рис. 4). Без воды перфорация начинается с небольшой задержкой после включения лазерного излучения, однако ее скорость постепенно уменьшается и волокно останавливается на внутренней более прочной поверхности стенки кости. Когда торец волокна в начале перфорации находится в воде, то задержка резко возрастает, а скорость продвижения волокна увеличивается.

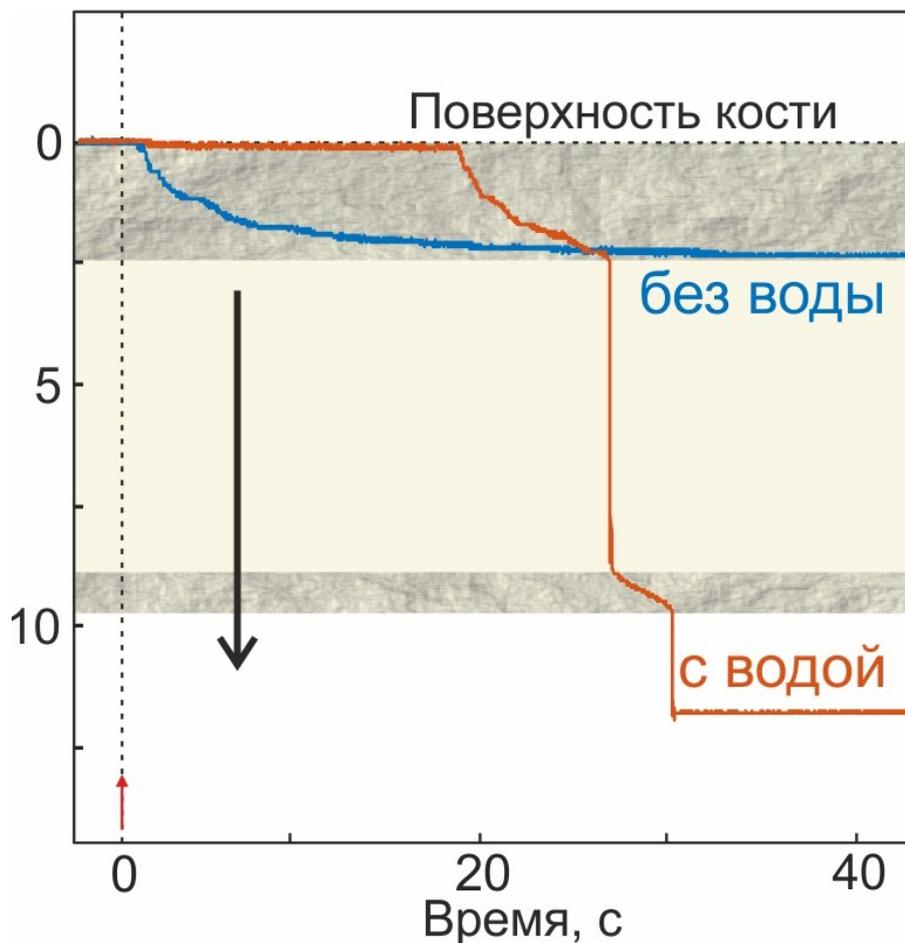


Рисунок 4 - Положение торца лазерного волокна при формировании канала в кости при наличии воды у поверхности кости и без нее

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.31.4>

*Примечание: показано расположение внешних и внутренних поверхностей стенки кости и костномозгового канала; P=16 Вт, нагрузка 300 г*

На кадрах скоростной съемки (рис. 5) видно, что в начале перфорации наружной стенки кости в воде вблизи волокна образуется большое количество пузырьков с диаметром порядка нескольких сот микрон. При этом происходит генерация широкополосного акустического сигнала, спектр которых значительно зависит от мощности лазерного излучения (рис. 6). Видно, что при увеличении мощности спектральные пики смещаются в более высокочастотную область (рис. 6). Они связаны с частотой генерации пузырьков, которая с увеличением мощности возрастает.

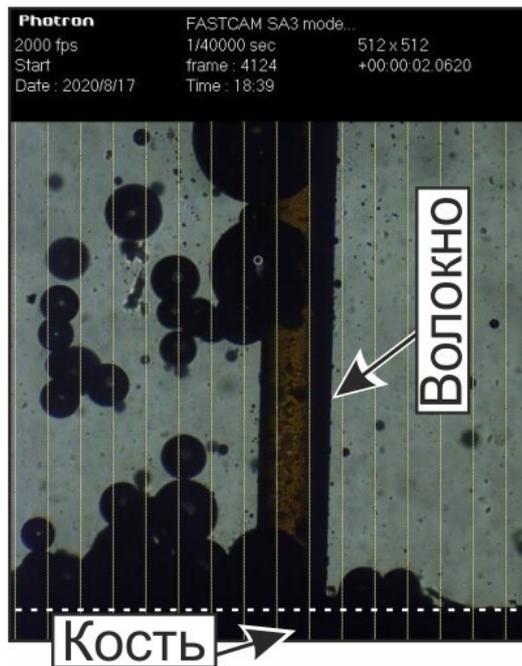


Рисунок 5 - Пример регистрации гидродинамических процессов при начале перфорации кости с помощью скоростной видеокамеры на скорости 2 кк/с с временем экспозиции 25 мкс  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.31.5>

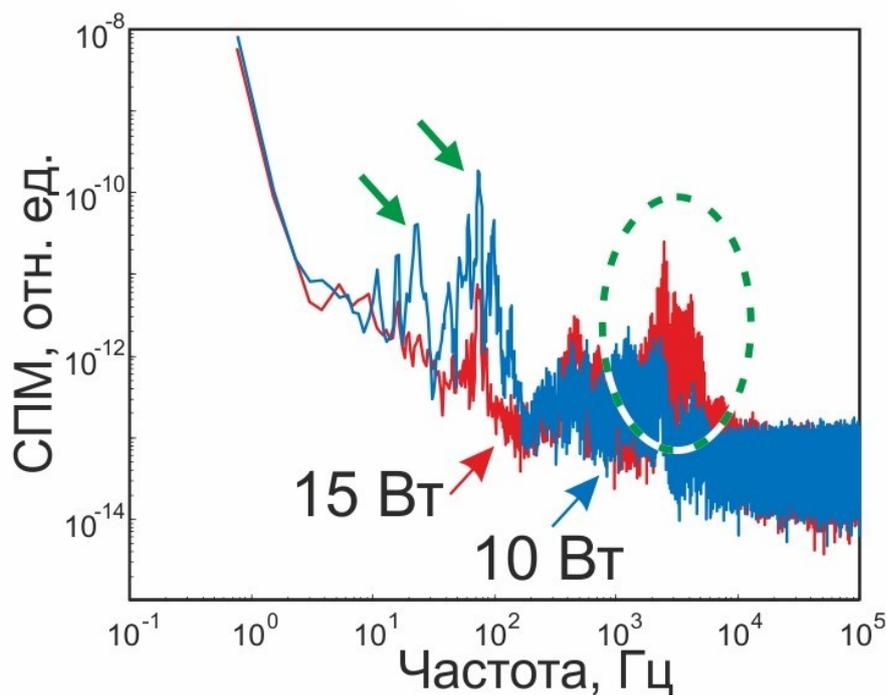


Рисунок 6 - спектры акустических сигналов, зарегистрированных при перфорации кости в присутствии воды при различных мощностях излучения с  $\lambda=0,98$  мкм  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.31.6>

Примечание: пунктирным эллипсом отмечен широкий пик для  $P=15$  Вт; зеленые стрелки показывают узкие пики для  $P=10$  Вт, величина нагрузки 200 г

Проведенные акустические исследования показали, что в используемых конфигурациях гидрофонов (рис. 2) сигнал с игольчатого гидрофона практически не дает дополнительной информации о месте нахождения торца лазерного волокна. Его основное достоинство связано с возможностью регистрации более высокочастотного по сравнению с широкополосным гидрофоном сигнала, что позволяет подробно изучать особенности сигнала в самом

начале взрывного кипения воды и в моменты кавитационного схлопывания пузырьков [25], [26]. При этом, акустические сигналы при перфорации можно эффективно регистрировать с использованием самых различных гидрофонов [27].

Оказалось, что максимальный акустический сигнал регистрируется в трех случаях:

1) в начальный момент в период между включением лазерного излучения и началом формирования канала в стенке кости;

2) Когда волокно выходит из внутренней поверхности стенки кости в костномозговой канал;

3) При достижении противоположной внутренней стенки кости (рис. 7).

При этом, оказалось, что в указанных случаях сигнал генерируется независимо от используемой длины волны лазерного излучения и нагрузки на волокно. Таким образом, можно заключить, что моменты генерации акустического сигнала являются важным индикатором происходящих процессов при формировании отверстия в кости.

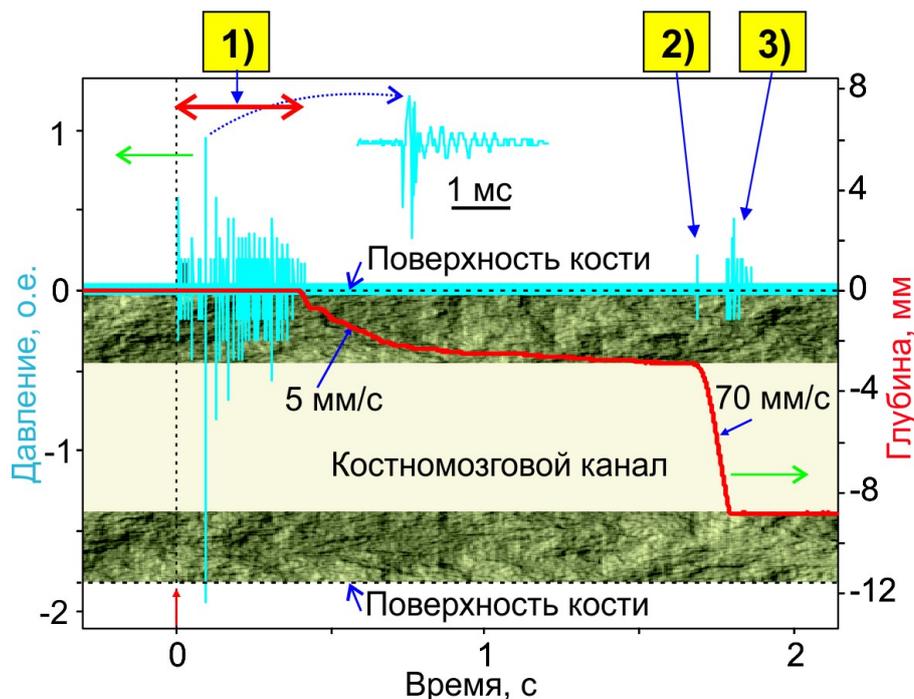


Рисунок 7 - Схема иллюстрирующая связь зарегистрированных акустических сигналов с положением торца оптоволокну в различные моменты времени при лазерной перфорации кости:

1-3 - три характерных случая генерации акустических сигналов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.31.7>

*Примечание: показано расположение внешних и внутренних поверхностей стенки кости и костномозгового канала; P=16 Вт, вес 200 г*

### Заклучение

Проведенные исследования показали, что акустический контроль за формированием отверстий в биоматериале на примере трубчатой кости может быть весьма эффективным. Являясь важным индикатором происходящих процессов при перфорации, акустический мониторинг позволяет определить моменты начала и окончания перфорации внешней стенки кости, а также момент достижения торцом волокна противоположной внешней стенки. При этом важно, что эти эффекты слабо зависят от используемой длины волны лазерного излучения и способов акустической регистрации. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения механизма действия лазерного излучения на биоткани и совершенствования лазерных медицинских технологий.

**Финансирование**

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

**Благодарности**

Автор выражает большую благодарность Никите Минаеву за помощь в проведении эксперимента.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Кузнецов П.С., Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, Москва, Российская Федерация  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.31.8>

**Funding**

The work was carried out within the state assignment of NRC “Kurchatov institute”.

**Acknowledgement**

The author is very grateful to Nikita Minaev for his help in conducting the experiment.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

Kuznetsov P.S., State Scientific Research Institute of Instrument Engineering, Moscow, Russian Federation  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.31.8>

**Список литературы / References**

1. Чудновский В.М. Лазероиндуцированное кипение биологических жидкостей в медицинских технологиях / В.М. Чудновский, В.И. Юсупов, А.В. Дыдыкин [и др.] // Квантовая электроника. — 2017. — Т. 47. — № 4. — С. 361. — DOI: 10.1070/QEL16298.
2. Минаев В.П. 2011–2021 – еще 10 лет развития лазерной медицинской техники и технологий / В.П. Минаев // Лазерная медицина. — 2021. — № 25 (2). — С. 63–74.
3. Странадко Е.Ф. Источники света для фотодинамической терапии / Е.Ф. Странадко, А.В. Армичев, А.В. Гейниц // Лазерная медицина. — 2011. — Т. 15. — № 3. — С. 63–69.
4. Shi W. Fiber lasers and their applications / W. Shi, Q. Fang, X. Zhu [et al.] // Applied Optics. — 2014. — № 53 (28). — P. 6554–6568.
5. Минаев В. Развитие лазерных медицинских технологий / В. Минаев // Фотоника. — 2010. — № 2. — С. 50–54
6. Минаев В.П. Современные лазерные аппараты для хирургии и силовой терапии как основа эффективных стационарозамещающих технологий / В.П. Минаев // Альманах клинической медицины. — 2008. — Т. 17. — № 2. — С. 116.
7. Чернеховская Н.Е. Лазеры в эндоскопии / Н.Е. Чернеховская, А.В. Гейниц, О.В. Ловачева [и др.]. — М. : МЕДпресс-информ, 2011. — 144 с.
8. Kamalski D.M. Capturing thermal, mechanical, and acoustic effects of the diode (980 nm) laser in stapedotomy / D.M. Kamalski, T. De Boorder, A.J. Bittermann [et al.] // Otolaryngology & Neurotology. — 2014. — № 35 (6). — P. 1070–1076.
9. Troedhan A. Cutting bone with drills, burs, lasers and piezotomes: a comprehensive systematic review and recommendations for the clinician / A. Troedhan, Z.T. Mahmoud, M. Wainwright [et al.] // International Journal of Oral and Craniofacial Science. — 2017. — № 3 (2). — P. 20–33.
10. Kronenberg P. The laser of the future: reality and expectations about the new thulium fiber laser — a systematic review / P. Kronenberg, O. Traxer // Translational Andrology and Urology. — 2019. — № 8(Suppl. 4). — P. S398.
11. Седова Ю.К. Перспективы использования импульсного лазера на Tm-активированном волокне для литотрипсии слонных камней / Ю.К. Седова, С.Е. Минаев, Е.О. Епифанов [и др.] // Квантовая электроника. — 2023. — № 53 (11). — С. 859–866.
12. Сандлер Б.И. Перспективы лечения дискогенных компрессионных форм пояснично-крестцовых радикулитов с помощью пункционных неэндоскопических лазерных операций / Б.И. Сандлер, Л.Н. Суляндзига, В.М. Чудновский [и др.]. — Владивосток: Дальнаука, 2004.
13. Хайдаров Н. Современные методы лечения невралгии тройничного нерва / Н. Хайдаров, М. Абдуллаева, Ф. Чориева // Медицина и инновации. — 2021. — Т. 19. — № 1(2). — С. 26–30.
14. Привалов В.А. Лазерная остеоперфорация в лечении воспалительных и деструктивных заболеваний костей / В.А. Привалов, И.В. Крочек, И.А. Абушкин [и др.] // Вестник экспериментальной и клинической хирургии. — 2009. — Т. 2. — № 1. — С. 19.
15. Карабутов А.А. Диагностика слоистых композитов с помощью лазерного оптико-акустического преобразователя / А.А. Карабутов, В.В. Мурашов, Н.Б. Подымова // Механика композитных сред. — 1999. — Т. 35. — № 1. — С. 125–134.
16. Kazakov V.V. Control of bubble formation at the optical fiber tip by analyzing ultrasound acoustic waves / V.V. Kazakov, V.I. Yusupov, V.N. Bagratashvili [et al.] // American Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2016. — Vol. 9. — № 4. — P. 921–927.
17. Омельченко А.И. Оптоакустический мониторинг лазерной коррекции формы уха / А.И. Омельченко, Э.Н. Соболев, А.П. Свиридов [и др.] // Квантовая электроника. — 2000. — № 30 (11). — С. 1031–103.
18. Кравчук Д.А. Применение оптоакустических методов в биомедицинских исследованиях / Д.А. Кравчук // Инженерный вестник Дона. — 2017. — № 47 (4(47)). — С. 40.
19. Минаев Н.В. Установка для лазерных волоконных перфораций биоматериалов / Н.В. Минаев, В.И. Юсупов // Приборы и техника эксперимента. — 2021. — № 2. — С. 128–131.
20. Карабутов А.А. Измерение оптических характеристик рассеивающих сред лазерным оптико-акустическим методом / А.А. Карабутов, И.М. Пеливанов, Н.Б. Подымова [и др.] // Квантовая электроника. — 1999. — Т. 29. — № 3. — С. 215–220.

21. Карабутов А.А. Лазерный оптоакустический метод индуцирования высокоэнергетических состояний и исследования фазовых переходов в металлах при высоких давлениях / А.А. Карабутов, А.Г. Капильный, А.Ю. Ивочкин // Теплофизика высоких температур. — 2007. — № 45 (5). — С. 680–687.
22. Юсупов В.И. Генерация акустических волн непрерывным лазерным излучением на торце оптического волокна в воде / В.И. Юсупов, А.Н. Коновалов, В.А. Ульянов [и др.] // Акустический журнал. — 2016. — Т. 62. — № 5. — С. 531. — DOI: 10.7868/S0320791916050191.
23. Минаев Н.В. Установка для изучения лазерно-индуцированных гидродинамических процессов в жидких средах / Н.В. Минаев, В.И. Юсупов, С.И. Цыпина [и др.] // ПТЭ. — 2019. — № 2. — С. 157. — DOI: 10.1134/S0032816219020137.
24. Юсупов В.И. Лазерная перфорация водонасыщенных материалов / В.И. Юсупов // Письма ЖТФ. — 2022. — Т. 48. — № 9. — С. 7–9. — DOI: 10.21883/PJTF.2022.09.52442.19155.
25. Юсупов В.И. Особенности лазероиндуцированной термокавитации воды / В.И. Юсупов // Акустический журнал. — 2024.
26. Yusupov V.I. Features of heat/mass transfer and explosive water boiling at the laser fiber tip / V.I. Yusupov, A.N. Konovalov // International Journal of Thermal Sciences. — 2024. — Vol. 203. — № 109131. — DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.109131.
27. Sviridov A.P. Excimer laser ablation of bone shock wave measurements and crater profiles / A.P. Sviridov, A.K. Dmitriev, A.D. Karoutis [et al.] // Lasers in Medical Science. — 1996. — № 11. — P. 37–44.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Chudnovskij V.M. Lazeroinducirovannoe kipenie biologicheskikh zhidkostej v medicinskih tehnologijah [Laser-induced boiling of biological fluids in medical technologies] / V.M. Chudnovskij, V.I. Jusupov, A.V. Dydykin [et al.] // Kvantovaja jelektronika [Quantum Electronics]. — 2017. — Vol. 47. — № 4. — P. 361. — DOI: 10.1070/QEL16298. [in Russian]
2. Minaev V.P. 2011–2021 – eshhe 10 let razvitiya lazernoj medicinskoj tehniki i tehnologij [2011-2021 – 10 more years of development of laser medical equipment and technologies] / V.P. Minaev // Lazernaja medicina [Laser Medicine]. — 2021. — № 25 (2). — P. 63–74. [in Russian]
3. Stranadko E.F. Istochniki sveta dlja fotodinamicheskoj terapii [Light sources for photodynamic therapy] / E.F. Stranadko, A.V. Arnichev, A.V. Gejnic // Lazernaja medicina [Laser Medicine]. — 2011. — Vol. 15. — № 3. — P. 63–69. [in Russian]
4. Shi W. Fiber lasers and their applications / W. Shi, Q. Fang, X. Zhu [et al.] // Applied Optics. — 2014. — № 53 (28). — P. 6554–6568.
5. Minaev V. Razvitie lazernyh medicinskih tehnologij [Development of laser medical technologies] / V. Minaev // Fotonika [Photonics]. — 2010. — № 2. — P. 50–54 [in Russian]
6. Minaev V.P. Sovremennye lazernye apparaty dlja hirurgii i silovoj terapii kak osnova jeffektivnyh stacionarozameshchajushhih tehnologij [Modern laser devices for surgery and force therapy as a basis for effective hospital-substituting technologies] / V.P. Minaev // Al'manah klinicheskoj mediciny [Almanac of Clinical Medicine]. — 2008. — Vol. 17. — № 2. — P. 116. [in Russian]
7. Chernehovskaja N.E. Lazery v jendoskopii [Lasers in endoscopy] / N.E. Chernehovskaja, A.V. Gejnic, O.V. Lovacheva [et al.]. — M. : MEDpress-inform, 2011. — 144 p. [in Russian]
8. Kamalski D.M. Capturing thermal, mechanical, and acoustic effects of the diode (980 nm) laser in stapedotomy / D.M. Kamalski, T. De Boorder, A.J. Bittermann [et al.] // Otology & Neurotology. — 2014. — № 35 (6). — P. 1070–1076.
9. Troedhan A. Cutting bone with drills, burs, lasers and piezotomes: a comprehensive systematic review and recommendations for the clinician / A. Troedhan, Z.T. Mahmoud, M. Wainwright [et al.] // International Journal of Oral and Craniofacial Science. — 2017. — № 3 (2). — P. 20–33.
10. Kronenberg P. The laser of the future: reality and expectations about the new thulium fiber laser — a systematic review / P. Kronenberg, O. Traxer // Translational Andrology and Urology. — 2019. — № 8(Suppl. 4). — P. S398.
11. Sedova Ju.K. Perspektivy ispol'zovaniya impul'snogo lazera na Tm-aktivirovannom volokne dlja litotripsii sljunnyh kamnej [Prospects of using a pulsed laser on Tm-activated fibre for lithotripsy of salivary stones] / Ju.K. Sedova, S.E. Minaev, E.O. Epifanov [et al.] // Kvantovaja jelektronika [Quantum Electronics]. — 2023. — № 53 (11). — P. 859–866. [in Russian]
12. Sandler B.I. Perspektivy lechenija diskogennyh kompressionnyh form pojasnichno-krestcovykh radikulitov s pomoshh'ju punkcionnyh nejendoskopicheskikh lazernyh operacij [Prospects of treatment of discogenic compression forms of lumbosacral radiculitis with puncture non-endoscopic laser surgeries] / B.I. Sandler, L.N. Suljandziga, V.M. Chudnovskij [et al.]. — Vladivostok: Dal'nauka, 2004. [in Russian]
13. Hajdarov N. Sovremennye metody lechenija nevralgii trojnichnogo nerva [Modern methods of treatment of trigeminal neuralgia] / N. Hajdarov, M. Abdullaeva, F. Chorieva // Medicina i innovacii [Medicine and Innovations]. — 2021. — Vol. 19. — № 1(2). — P. 26–30. [in Russian]
14. Privalov V.A. Lazernaja osteoperforacija v lechenii vospalitel'nyh i destruktivnyh zabolevanij kostej [Laser osteoperforation in the treatment of inflammatory and destructive bone diseases] / V.A. Privalov, I.V. Krochek, I.A. Abushkin [et al.] // Vestnik jeksperimental'noj i klinicheskoj hirurgii [Bulletin of Experimental and Clinical Surgery]. — 2009. — Vol. 2. — № 1. — P. 19. [in Russian]
15. Karabutov A.A. Diagnostika sloistyh kompozitov s pomoshh'ju lazernogo optiko-akusticheskogo preobrazovatelja [Diagnostics of laminated composites by means of the laser optical-acoustic transducer] / A.A. Karabutov, V.V. Murashov, N.B. Podymova // Mehanika kompozitnyh sred [Mechanics of Composite Media]. — 1999. — Vol. 35. — № 1. — P. 125–134. [in Russian]

16. Kazakov V.V. Control of bubble formation at the optical fiber tip by analyzing ultrasound acoustic waves / V.V. Kazakov, V.I. Yusupov, V.N. Bagratashvili [et al.] // American Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2016. — Vol. 9. — № 4. — P. 921–927.
17. Omel'chenko A.I. Optoakusticheskij monitoring lazernoj korrekcii formy uha [Optoacoustic monitoring of laser correction of ear shape] / A.I. Omel'chenko, Je.N. Sobol', A.P. Sviridov [et al.] // Kvantovaja jelektronika [Quantum Electronics]. — 2000. — № 30 (11). — P. 1031–103. [in Russian]
18. Kravchuk D.A. Primenenie optoakusticheskikh metodov v biomedicinskih issledovanijah [Application of optoacoustic methods in biomedical research] / D.A. Kravchuk // Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Bulletin of Don]. — 2017. — № 47 (4(47)). — P. 40. [in Russian]
19. Minaev N.V. Ustanovka dlja lazernyh volokonnyh perforacij biomaterialov [Installation for laser fibre perforations of biomaterials] / N.V. Minaev, V.I. Jusupov // Pribory i tehnika jeksperimenta [Instruments and Techniques of Experimentation]. — 2021. — № 2. — P. 128–131. [in Russian]
20. Karabutov A.A. Izmerenie opticheskikh harakteristik rasseivajushhijh sred lazernym optiko-akusticheskim metodom [Measurement of optical characteristics of scattering media by laser optical-acoustic method] / A.A. Karabutov, I.M. Pelivanov, N.B. Podymova [et al.] // Kvantovaja jelektronika [Quantum Electronics]. — 1999. — Vol. 29. — № 3. — P. 215–220. [in Russian]
21. Karabutov A.A. Lazernyj optoakusticheskij metod inducirovaniya vysokojenergeticheskikh sostojanij i issledovaniya fazovyh perehodov v metallah pri vysokih davlenijah [Laser optoacoustic method of inducing high-energy states and studying phase transitions in metals at high pressures] / A.A. Karabutov, A.G. Kaptil'nyj, A.Ju. Ivochkin // Teplofizika vysokih temperatur [Thermophysics of High Temperatures]. — 2007. — № 45 (5). — P. 680–687. [in Russian]
22. Jusupov V.I. Generacija akusticheskikh voln nepreryvnym lazernym izlucheniem na torce opticheskogo volokna v vode [Generation of acoustic waves by continuous laser radiation at the end of an optical fibre in water] / V.I. Jusupov, A.N. Konovalov, V.A. Ul'janov [et al.] // Akusticheskij zhurnal [Acoustic Journal]. — 2016. — Vol. 62. — № 5. — P. 531. — DOI: 10.7868/S0320791916050191. [in Russian]
23. Minaev N.V. Ustanovka dlja izuchenija lazerno-inducirovannyh gidrodinamicheskikh processov v zhidkih sredah [Installation for studying laser-induced hydrodynamic processes in liquid media] / N.V. Minaev, V.I. Jusupov, S.I. Cypina [et al.] // PTE. — 2019. — № 2. — P. 157. — DOI: 10.1134/S0032816219020137. [in Russian]
24. Jusupov V.I. Lazernaja perforacija vodonasyshennyh materialov [Laser perforation of water-saturated materials] / V.I. Jusupov // Pis'ma ZhTF [ZhTF Letters]. — 2022. — Vol. 48. — № 9. — P. 7–9. — DOI: 10.21883/PJTF.2022.09.52442.19155. [in Russian]
25. Jusupov V.I. Osobennosti lazeroinducirovannoj termokavitacii vody [Features of laser-induced thermocavitation of water] / V.I. Jusupov // Akusticheskij zhurnal [Acoustic Journal]. — 2024. [in Russian]
26. Yusupov V.I. Features of heat/mass transfer and explosive water boiling at the laser fiber tip / V.I. Yusupov, A.N. Konovalov // International Journal of Thermal Sciences. — 2024. — Vol. 203. — № 109131. — DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.109131.
27. Sviridov A.P. Excimer laser ablation of bone shock wave measurements and crater profiles / A.P. Sviridov, A.K. Dmitriev, A.D. Karoutis [et al.] // Lasers in Medical Science. — 1996. — № 11. — P. 37–44.