

- tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii: Sb. dokladov* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation "Computer and Information Technologies in Science, Engineering and Management: Collection of Reports]. Taganrog, 2017, pp. 8-12.
15. *Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A., Markelov E.B.* Nekotorye tendentsii razvitiya informatsionnykh tekhnologiy dlya sistem setetsentricheskogo upravleniya [Some trends in the development of information technologies for network-centric control systems], *Vooruzhenie i ekonomika* [Armament and Economics], 2021, No. 3.
 16. *Saati T.L.* Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy [Making decisions. Hierarchy analysis method]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 340 p.
 17. *Saati T.L.* Prinyatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh. Analiticheskie seti [Decision making under dependencies and feedbacks. Analytical networks]. Moscow: LIBROKOM, 2009, 358 p.
 18. *Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Benderskiy G.P., Belevtsev A.A.* Analiz napravleniy razvitiya nano-IT-tekhnologiy dlya postroeniya spetsializirovannykh setevykh kommuni-katsionnykh sistem novogo pokoleniya [Analysis of the directions of development of nano-and IT-technologies for the construction of specialized network communication systems of a new generation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 3.
 19. *Belevtsev A.M., Sadreev F.G., Pakhomov S.N.* Organizatsiya parallel'nogo monitoringa napravleniy razvitiya nauki, tekhniki i tekhnologiy v otkrytykh istochnikakh informatsii [Organization of parallel monitoring of directions of development of science, technology and technology in open sources of information], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 5, pp. 86-95.
 20. *Kim Y., Tian Y., Jeong Y., Jihee R., & Myaeng S.-H.* Automatic discovery of technology trends from patent text, *Proceedings of the 2009 ACM symposium on applied computing*, 2009, pp. 1480-1487.
 21. *Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A.* Metodika otsenki vremeni i stoimosti realizatsii tekhnologicheskikh trendov v usloviyakh neopredelennosti i nepolnoty informatsii [Methodology for estimating the time and cost of implementing technological trends in conditions of uncertainty and incompleteness of information], *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2019, No. 5.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

Белевцев Андрей Андреевич – ПАО«Сбербанк»; e-mail: andrey.belevtsev@gmail.com; г. Москва, Россия; старший вице-президент.

Белевцев Андрей Михайлович – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79037691788; д.т.н.; профессор.

Балыбердин Валерий Алексеевич – 3 Центральный научно-исследовательский институт МО РФ; e-mail: balyberdinvaleri@yandex.ru; г. Москва, Россия; д.т.н.; профессор; заслуженный деятель науки РФ; в.н.с.

Belevtsev Andrey Andrevich – PJSC "Sberbank"; e-mail: andrey.belevtsev@gmail.com; Moscow, Russia; senior vice president.

Belevtsev Andrey Mikhaylovich – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79037691788; dr. of eng. sc.; professor.

Balyberdin Valeriy Alexeevich – 3 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: balyberdinvaleri@yandex.ru; Moscow, Russia; dr. of eng. sc.; professor; Honored Scientist of the Russian Federation; leading researcher.

УДК 004.93'1

DOI 10.18522/2311-3103-2024-2-278-289

А.В. Руденко, М.А. Руденко

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕДУРЫ ЛАЗЕРНОЙ ЛИТОТРИПСИИ

При подготовке к проведению процедуры лазерной литотрипсии, выбирая параметры лазерной установки, врач учитывает множество факторов, таких как масса и плотность обнаруженных в почке конкрементов, расположение камней в почке, близость кровеносных сосудов. Также важным

параметром является время воздействия на камень лазерным лучом до разрушения камня. При этом расчет времени разрушения камня – достаточно трудоемкая процедура, время разрушения зависит от массы камня и параметров энергии лазера и его частоты. Поэтому актуальным является создание системы по поддержке принятия врачебных решений при проведении процедуры лазерной литотрипсии, позволяющей выполнить расчет времени разрушения камней и осуществить выбор значений параметров лазера. В статье предлагается алгоритм поддержки выбора врачом-урологом режима работы лазера во время проведения процедуры лазерной литотрипсии при лечении мочекаменной болезни человека, являющейся частью системы поддержки принятия врачебного решения в хирургии и урологии с использованием технологий компьютерного зрения. Предложенный алгоритм нечеткой оценки параметров лазера при выборе его режима работы в зависимости от массы камня и выбранного времени разрушения камня и других факторов (распределение плотности камня, расположение камня в почке, близость стенок и сосудов) осуществляет формирование рекомендаций по установлению параметров работы лазера. Система поддержки принятия врачебного решения позволила сократить время на принятие решения врачом, избежать ошибок при выборе параметров работы лазерной установки по дроблению камней в почках.

Поддержка принятия решения; нечеткая оценка; лазерная литотрипсия; масса камня; время разрушения; параметры лазера.

A.V. Rudenko, M.A. Rudenko

SUPPORT FOR MEDICAL DECISION-MAKING WHEN PLANNING THE LASER LITHOTRIPSY PROCEDURE

When preparing for the laser lithotripsy procedure, choosing the parameters of the laser installation, the doctor considers many factors, such as the mass and density of concretions found in the kidney, the location of kidney stones, and the proximity of blood vessels. Another important parameter is the time of exposure to the stone with a laser beam before the stone is destroyed. At the same time, calculating the time of destruction of a stone is a rather time-consuming procedure, the time of destruction depends on the mass of the stone and the parameters of the laser energy and its frequency. Therefore, it is relevant to create a system to support medical decision-making during the laser lithotripsy procedure, which allows you to calculate the time of stone destruction and select the values of laser parameters. The article proposes an algorithm to support the choice of the laser operating mode by a urologist during the laser lithotripsy procedure in the treatment of human urolithiasis, which is part of the medical decision support system in surgery and urology using computer vision technologies. The proposed algorithm for fuzzy estimation of laser parameters when choosing its operating mode, depending on the mass of the stone and the selected time of destruction of the stone and other factors (distribution of stone density, location of the stone in the kidney, proximity of walls and vessels) generates recommendations for setting the parameters of the laser. The medical decision support system made it possible to reduce the time for a doctor to decide, to avoid mistakes when choosing the parameters of the laser installation for crushing kidney stones.

Fuzzy estimation; laser lithotripsy; stone mass; destruction time; laser energy; laser frequency.

Введение. Врачам при работе с пациентами во время постановки диагноза и выбора правильного лечения или планирования хирургического вмешательства приходится учитывать большое число факторов. В помощь приходят информационные компьютерные технологии в виде различных систем поддержки принятия решений.

Под системой поддержки принятия врачебных решений (СППВР) понимается программное обеспечение, позволяющее собирать, анализировать информацию, влиять на выбор врачом решения при постановке диагноза, выбора лечения с целью снижения ошибок и повышения качества оказываемой медицинской помощи [1]. СППВР может представлять собой сложный программный комплекс, использующий математические модели, компьютерное зрение, искусственный интеллект, базы данных.

На настоящий момент разработано и внедряется в медицинскую практику достаточно большое число разнообразных систем ППВР. В большинстве своем – это справочные системы, системы ведения медицинской документации, системы поддержки диагностики отдельных заболеваний.

Целью исследования являлась разработка СППВР при планировании хирургического вмешательства при лечении мочекаменной болезни (МКБ). Авторами был проведен анализ публикаций по теме СППВР в медицине по лечению МКБ, был сделан вывод о том, что СППВР в данном направлении медицины в большинстве своем находятся в стадии разработки и проектирования [2–13]. В настоящий момент отсутствуют системы, которые бы помогали врачу-урологу в планировании хирургического вмешательства с применением лазерной литотрипсии для удаления камней в почках при МКБ.

Лазерная литотрипсия - дробление камня почки или мочеточника с использованием различных видов энергии, является современным методом лечения мочекаменной болезни, лазер эффективно удаляет камни во всех участках мочевыводящей системы, позволяет вылечить пациентов при значительно небольшой травматичности самой операции [8, 9, 11, 14]. В ходе процедуры лазерные импульсы генерируют ударную волну, которые на фоне локального повышения температуры разрушают камни потенциально до мелких частиц [10, 11, 15–18].

До проведения процедуры лазерного дробления камней при лечении МКБ врачам необходимо знать массу найденного камня, распределение плотности камня от центра к периферии, расположение камня в почке, определить параметры энергии и частоты работы лазера, которые зависят от времени разрушения камня, которое, в свою очередь, зависит от перечисленных выше факторов. Правильное определение параметров работы лазера определяет безопасность пациента во время операции. Поэтому существует необходимость разработки системы поддержки принятия врачебного решения для выбора оптимального и безопасного воздействия лазером на камень, находящийся внутри почки, чтобы его разрушение происходило за минимально короткое время, при этом исключалась возможность нанесения травм внутренним органам пациента.

Описание метода. Выбор режима работы лазера при проведении процедуры лазерной литотрипсии определяется следующими факторами: временем, в течение которого произойдет разрушение камня, расположением камня внутри почки, его формой, значением плотности и распределением плотности по объему камня, близостью кровеносных сосудов, близостью тонких стенок внутренних органов.

Для определения величин энергии и частоты работы лазера, а также для формирования рекомендаций по выбору режимов работы при проведении операции лазерной литотрипсии, режимы работы лазерной установки можно условно распределить на следующие категории: режим для дробления осколков камней – характеризуется низким значением величины энергии лазера и низкой частотой; режим работы для камней с низкой плотностью – характеризуется низким значением величины энергии лазера и более высокими применяемыми частотами; режим работы при неудобных подходах инструмента к камню – характеризуется значением величины энергии лазера чуть ниже среднего и средними и чуть выше частотами работы лазера; оптимальный режим работы – применяется в большинстве процедур дробления камней и характеризуется средними значениями величин энергии лазера и частоты работы лазера; режим работы в зоне высокой плотности камня – характеризуется значением энергии лазера выше среднего, значения частоты лазера находятся в диапазоне средних и чуть выше средних; режим работы с высоким риском нанесения травмы – характеризуется значениями энергии лазера выше среднего и гораздо выше среднего, частотами работы лазера выше среднего.

Для формирования рекомендаций по выбору режима дробления камней в почках и установлению величин энергии и частоты работы лазерной установки в данном исследовании был использован нечеткий логический вывод. Данный метод формирования рекомендаций был выбран из-за неоднозначности определения режима работы лазерной установки врачом, который при установлении величин энергии и частоты работы лазера отталкивается не только от времени разрушения камня, зависящего от массы камня, но и от расположения камня внутри почки, близостью кровеносных сосудов, расположением самой почки в теле пациента, размерами камней и их количеством, а также диапазонами значений энергии лазера и частоты его работы. Поэтому однозначно установить величину энергии лазера и частоты его работы по рассчитанной массе камня не представляется возможным.

Алгоритм формирования рекомендаций по нечеткому выбору категории режима работы лазера из указанных выше и установлению величин энергии и частоты его работы использует нечеткий вывод, который определяется функциями принадлежности двух переменных: энергия лазера и частота. Были определены следующие наборы градаций для указанных переменных.

Для энергии лазера: очень высокая – 0,8–0,9 от максимальной; нормальная – 0,6–0,8 от максимальной; щадящая – 0,45–0,6 от максимальной; низкая – ниже 0,45 от максимальной.

Для частоты: очень высокая – 0,9–1 от максимальной; высокая – 0,75–0,9 от максимальной; нормальная – 0,5–0,75 от максимальной; щадящая 0,35–0,5; низкая – ниже 0,35 от максимальной.

Время разрушения камня зависит от массы камня, выбранной энергии и частоты работы лазера. Расчет времени разрушения камня лазером выполняется по следующей формуле [19]:

$$t_{\text{разр}} = \frac{m_{\text{камня}}}{(\gamma * E * F)}, \quad (1)$$

где $m_{\text{камня}}$ – масса камня, грамм; γ – коэффициент гамма, равный 0,4; E – энергия лазера, Дж, задается в диапазоне от 0,6 до 2,4; F – частота излучения лазера, Гц, задается в диапазоне от 8 до 15.

Каждому из режимов работы лазера соответствует определенное значение времени разрушения камня.

Априорное правило является нечетким описанием в n -мерном пространстве факторов \vec{y} , последовательность правил является нечеткой меткой класса из множества R режимов проведения операций [20]:

$$\vec{y} = [y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n], j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Здесь n обозначает количество факторов, определяющих выбор режима, которые формируют \vec{y} - входной вектор.

Степень активации i -го правила из множества R вычисляется как:

$$\beta_i(\vec{y}) = \prod_{j=1}^n B_{ij}(y_j), i = 1, 2, \dots, R, \quad (3)$$

где B_{ij} – функции принадлежности нечетких множеств, которые являются нечеткими отношениями вывода i -го правила (режима) и входного вектора \vec{y} .

Вывод классификатора определяет режим, который имеет наивысшую степень активации β_i :

$$z = v(i^*), \quad i^* = \arg \max_{1 \leq i \leq R} \beta_i. \quad (4)$$

Степень уверенности в выбранном режиме задается нормализованной степенью запуска правила:

$$Conf_{i^*} = \frac{\beta_{i^*}}{\sum_{i=1}^R \beta_i}. \quad (5)$$

Данные для проведения исследований и расчётов предоставлены Клиническим медицинским многопрофильным центром имени Святителя Луки г. Симферополь (КММЦ), который обладает современной базой радиологии и уникальными методиками лечения МКБ.

В соответствии с приведенной формулой (1) и данными, полученными от медицинских экспертов, была разработана таблица расчета времени разрушения камней в зависимости от частоты и энергии лазера. Были проведены экспериментальные расчеты с помощью MS Excel.

Исходные данные для расчетов: величина гамма-излучения лазера – 0,4; частота лазера, Гц – изменяется в диапазоне от 8 до 15 с шагом 1; энергия лазера, Дж – изменяется в диапазоне от 0,6 до 2,4 с шагом 0,1.

На рис. 1–3 приведены результаты расчетов времени для камней с массой до 1 грамма, до 10 грамм, свыше 20 грамм (мелкий, средний и крупный камни).

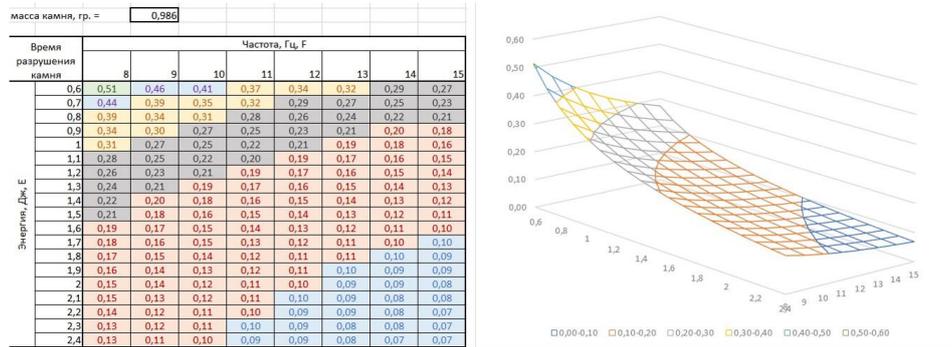


Рис. 1. Расчет времени разрушения камня массой 0,98 грамм во время лазерной литотрипсии при различных режимах работы лазера

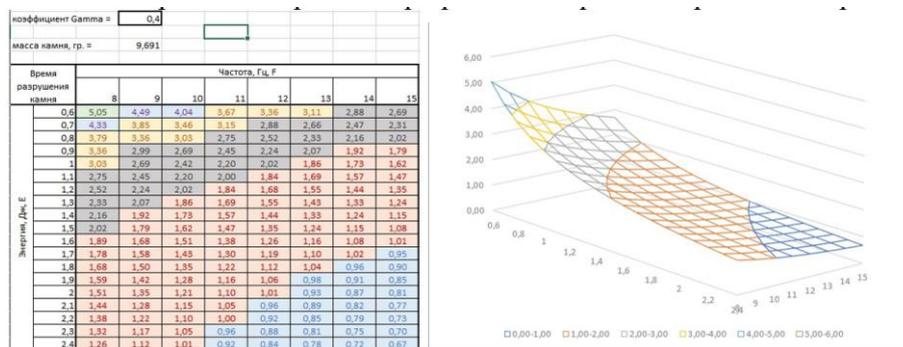


Рис. 2. Расчет времени разрушения камня массой 9,7 грамма во время лазерной литотрипсии при различных режимах работы лазера

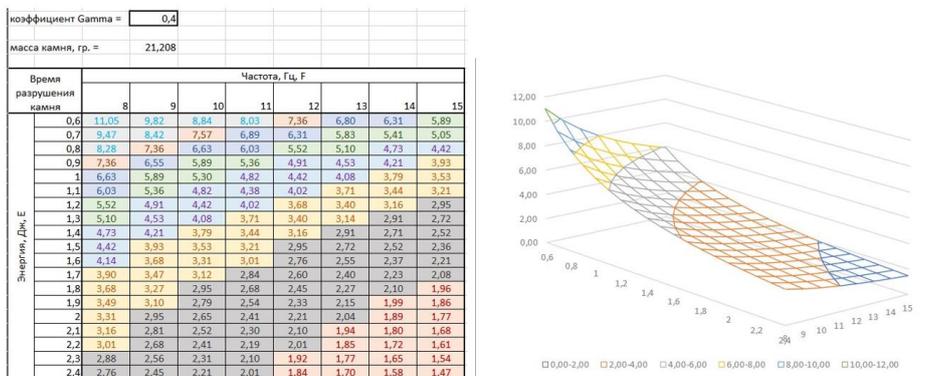


Рис. 3. Расчет времени разрушения камня массой 21,2 грамма во время лазерной литотрипсии при различных режимах работы лазера

Как видно на рисунках, диапазоны значения времени разрушения камней и значения величин энергии лазера и его частоты окрашены в различные цвета, что соответствует установленным ранее режимам работы лазера. Подбирая время разрушения камня, и руководствуясь данными пациента, врач сможет выбрать соответствующий режим работы лазера и установить значения величин энергии и частоты работы на лазерном аппарате.

Результаты. Расчет времени разрушения камня в зависимости от его массы и параметров работы лазера, а также нечеткие рекомендации по подбору режима работы лазерной установки для воздействия на камень в почке были реализованы в программном мо-

дуле поддержки принятия врачебных решений в прототипе системы поддержки принятия врачебных решений в хирургии и урологии с использованием технологий компьютерного зрения. В процессе работы модуля поддержки принятия врачебных решений прототипа системы производится расчет времени разрушения камня в зависимости от его массы и установленных по умолчанию диапазонов параметров работы лазера – значений энергии и частоты, а также в зависимости от величины шагов изменения этих величин и установленной величины гамма для лазера. После проведения расчетов производится формирование таблицы с результатами расчетов.

Для определения массы камня необходимо было вычислить плотность и объем камня.

Для определения плотности камня была использована следующая формула расчета физической плотности камней [20]:

$$\rho_{\text{камень}} = HU_{\text{камень}} * 0,000485 + 1,539, \quad (6)$$

где $HU_{\text{камень}}$ – значение светимости камня по Хаунсфилду (HU), по данным компьютерной томографии.

Значение плотности вычислялось для каждого вокселя, принадлежащего объёму камня.

Объем одного вокселя вычислялся в соответствии с параметрами проведения процедуры компьютерной томографии, сохраненных в DICOM файлах, как произведение толщины среза по координатам X и Y на расстояние между срезами по координате Z:

$$V_{\text{vox}} = x_{\text{thin}} * y_{\text{thin}} * z_{\text{thin}}, \quad (7)$$

где V_{vox} – значение объема одного вокселя, $x_{\text{thin}}, y_{\text{thin}}$ – толщины среза по координатам X и Y, z_{thin} – расстояние между срезами по координате Z.

Объем камня вычислялся путем суммирования объемов всех вокселей в камне:

$$V = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J \sum_{k=0}^K V_{\text{vox}}, \quad (8)$$

где I, J, K – количество вокселей по осям x, y, z соответственно.

Масса камня рассчитывалась как произведение объема одного вокселя на сумму плотностей всех вокселей, принадлежащих объёму камня:

$$m = V_{\text{vox}} * \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J \sum_{k=0}^K \rho_{ijk}, \quad (9)$$

где m – масса камня, ρ_{ijk} – значение плотности текущего вокселя в объеме камня.

После расчета массы камня производится расчет времени его разрушения в соответствии с формулой (1). Расчет времени выполняется для каждого значения энергии лазера и частоты из задаваемого диапазона значений и соответствующего шага изменения каждой из этих величин. Таким образом, для одного и того же камня получается матрица значений времени его разрушения.

Далее производится нечеткий анализ диапазонов значений величин энергии лазера и его частоты в соответствии с установленными градациями значений.

На основании заданных видов режимов работы лазера, применяемых при проведении процедуры литотрипсии, рассчитанной массы камня, значением плотностей его частей выполняется формирование рекомендаций по подбору величин энергии лазера и его частоты. С целью предоставления полной информации для планирования операционного воздействия модулем формируется вывод для всех допустимых режимов работы лазера со значениями настроек энергии и частоты в виде таблицы значений времени разрушения камня. Для наглядности представления ячейки таблицы окрашиваются определенным цветом, характеризующим каждый из режимов работы лазера в соответствии с установленной цветовой гаммой (табл. 1).

Таблица 1

Цвета окрашивания ячеек в таблице расчета времени разрушения камней

Название режима	Цвет
Режим для дробления осколков камней	
Режим работы для камней с низкой плотностью	
Режим работы при неудобных подходах инструмента	
Оптимальный режим работы	
Режим работы в зоне высокой плотности камня	
Режим работы с высоким риском нанесения травмы	
Малозффективный режим работы	
Малозффективный режим работы – не рекомендовано к применению	

В результате хирург, планирующий операцию, может видеть рекомендуемые режимы работы лазерной установки, время разрушения камня, величины энергии и частоты, характерных для различных режимов работы лазера.

Интерфейс модуля поддержки принятия врачебных решений при выборе режима воздействия лазером на камень представляет собой окно с полями ввода диапазонов значений величин энергии, частоты лазера и шага изменения данных величин и кнопок, выполняющих действия по расчету и сохранению данных (рис. 4). По умолчанию установлены следующие значения параметров лазера: - величина гамма-излучения – 0,4; частота – в диапазоне от 8 до 15, шаг изменения 1; энергия – в диапазоне от 0,6 до 2,4, шаг изменения 0,1.

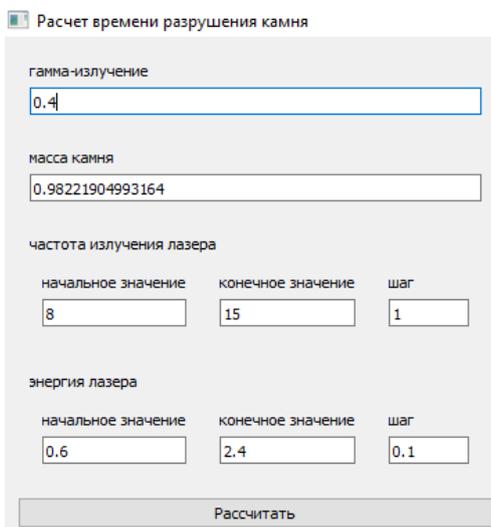


Рис. 4. Окно ввода параметров и расчета времени разрушения камней

Рис. 4. Окно ввода параметров и расчета времени разрушения камней

В интерфейсе модуля также присутствует таблица с уже рассчитанными из заданных по умолчанию диапазонов значений энергии и частоты лазера времени разрушения для конкретного камня (рис. 5).

	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0
0.6	0.51	0.45	0.41	0.37	0.34	0.31	0.29	0.27
0.7	0.44	0.39	0.35	0.32	0.29	0.27	0.25	0.23
0.8	0.38	0.34	0.31	0.28	0.26	0.24	0.22	0.2
0.9	0.34	0.3	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.18
1.0	0.31	0.27	0.25	0.22	0.2	0.19	0.18	0.16
1.1	0.28	0.25	0.22	0.2	0.19	0.17	0.16	0.15
1.2	0.26	0.23	0.2	0.19	0.17	0.16	0.15	0.14
1.3	0.24	0.21	0.19	0.17	0.16	0.15	0.13	0.13
1.4	0.22	0.19	0.18	0.16	0.15	0.13	0.13	0.12
1.5	0.2	0.18	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11
1.6	0.19	0.17	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.1
1.7	0.18	0.16	0.14	0.13	0.12	0.11	0.1	0.1
1.8	0.17	0.15	0.14	0.12	0.11	0.1	0.1	0.09
1.9	0.16	0.14	0.13	0.12	0.11	0.1	0.09	0.09
2.0	0.15	0.14	0.12	0.11	0.1	0.09	0.09	0.08
2.1	0.15	0.13	0.12	0.11	0.1	0.09	0.08	0.08
2.2	0.14	0.12	0.11	0.1	0.09	0.09	0.08	0.07
2.3	0.13	0.12	0.11	0.1	0.09	0.08	0.08	0.07

Рис. 5. Таблица с рассчитанными значениями времени разрушения камня

Ячейки таблицы раскрашены в соответствии с цветами режимов работы лазера, рекомендованных для использования при проведении операции литотрипсии. Под таблицей располагается визуализация рассчитанных величин времени разрушения камня и рекомендации по выбору режима работы лазера. Диапазоны значений времени разрушения камня окрашены в соответствии с значением градации нечеткой переменной «режим лазера» (рис. 6).

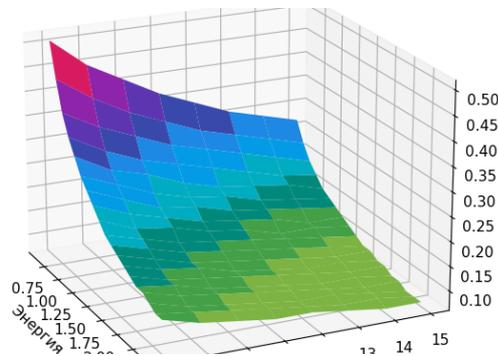


Рис. 6. Рекомендации по выбору режима работы лазера

Врач, осуществляя подготовку операции лазерной литотрипсии, анализирует параметры ранее найденных системой камня в почке: масса, значения плотности по НУ и физической плотности камня, по трехмерной визуализации оценивает расположение камня внутри почки, выбирает оптимальный или иной режим работы лазерной установки в зависимости от данных пациента и предлагаемой цветовой таблицы, по времени разрушения камня из ячейки он получает из данной таблицы величины энергии лазера и частоту его работы, которую необходимо установить на лазерном аппарате. Дополнительно врач может изменить начальные значения параметров лазера и выполнить расчет времени разрушения с новыми параметрами. Модуль выполнит перерасчет времени, осуществит формирование рекомендаций по выбору режима в соответствии с введенными значениями энергии лазера и частоты.

Таким образом осуществляется поддержка врачебного решения при осуществлении выбора режима работы лазера, сокращается время, затрачиваемое врачом, на выбор частоты и энергии лазера, уменьшается риск нанесения травм внутренних органов от неправильной установки частоты или энергии лазерного воздействия на камень.

Заключение. В данной статье предложен алгоритм нечеткой оценки параметров лазера при выборе режима работы лазерной установки для проведения процедуры лазерной литотрипсии. В алгоритме использован механизм нечеткого логического вывода из-за неоднозначности выбора режима работы лазерной установки, связанной с оценкой врачом не только времени разрушения камня, но и субъективных факторов. В процессе работы алгоритма производится вычисление времени разрушения камня в зависимости от его массы, диапазонов изменения значений энергии и частоты лазера, формируется матрица значений времени разрушения. Далее формируются рекомендации в виде таблицы значений времени разрушения и окраски диапазонов этих значений в цвета, которые соответствуют заданным режимам разрушения камней.

Алгоритм был реализован в виде программного модуля и был интегрирован в прототип системы поддержки принятия врачебных решений в хирургии и урологии с использованием технологий компьютерного зрения, проведено тестирование на базе КММЦ им. Святителя Луки г. Симферополь. Разработанный алгоритм и его программная реализация позволили сократить время на принятие решения врачом по выбору параметров лазера, снизить риски нанесения повреждений внутренним органам пациента при проведении хирургической процедуры лазерной литотрипсии. Данный алгоритм может быть использован при создании других подобных систем поддержки принятия решений в медицине.

Благодарности. Данные исследования выполнены при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере», программа «Старт», конкурс «Старт-Искусственный интеллект-1» (I очередь), заявка С1ИИ-112266, договор № 27ГС1ИИС12-D7/71365.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев А.В., Зарубина Т.В. Поддержка принятия врачебных решений в медицинских информационных системах медицинской организации // Врач и информационные технологии. – 2017. – № 2. – С. 60-72.
2. Омирова Н.И., Тишков А.В. Система поддержки принятия решений врача-уролога в биотехнической системе диагностики мочекаменной болезни // Биотехносфера. – 2020. – № 5(65). – С. 43-48. – DOI: 10.25960/bts.2020.5.43.
3. Щамхалова К.К., Меринов Д.С., Артемов А.В. и др. Искусственный интеллект и нейронные сети в урологии // Экспериментальная и клиническая урология. – 2023. – Т. 16, № 2. – С. 32-37. – DOI: 10.29188/2222-8543-2023-16-2-32-37.
4. Галченков А.С., Новицкий В.О., Кондратьев Е.А. Сервисы поддержки принятия решений по диагностике и лечению заболеваний и их практическое применение на примере ХБП 5Д // Врач и информационные технологии. – 2020. – № 1. – С. 45-51. – DOI: 10.37690/1811-0193-2020-1-45-51.
5. Левенков К.О., Коровин Е.Н., Новикова Е.И. Нейросетевое моделирование процесса выбора схемы лечения пациентов с хроническим пиелонефритом и мочекаменной болезнью // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – Т. 6, № 4(23). – С. 61-71. – DOI: 10.26102/2310-6018/2018.23.4.005.
6. Коцарь А.Г. Математическое моделирование и алгоритмизация прогнозирования, диагностики, профилактики и лечения мочекаменной болезни: дисс. ... д-ра мед. наук. – 2014. – 302 с.
7. Зубарев Д.А., Корневская С.Н., Коцарь А.Г. и др. Использование нечетких математических моделей при ведении больных с мочекаменной болезнью // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2017. – Т. 16, № 2. – С. 345-350.
8. Чернега В.С., Глуховская-Степаненко Н.П., Еременко А. и др. Оценка скорости фрагментации мочевых камней при контактной литотрипсии гольмиевым лазером // Урология. – 2018. – № 5. – С. 69-73. – DOI: 10.18565/urology.2018.5.69-72.
9. Коробков Д.М., Мосина Л.М., Степанов Н.Ю. Применение дистанционной ударно-волновой литотрипсии при мочекаменной болезни // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 2-3 (104). – С. 31-33. – DOI: 10.23670/IRJ.2021.103.2.067.

10. Степанов Н.Ю., Дуваров З.А., Бояркин Е.В. и др. Применение экстракорпоральной ударно-волновой литотрипсии и контактной уретеролитотрипсии при лечении конкрементов в дистальном отделе мочеточника // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 6 (98). – С 116-118.
11. Чернега В.С., Глуховская-Степаненко Н.П., Еременко С.Н. и др. Сетевая модель для оценки длительности медицинского технологического процесса лазерной контактной литотрипсии // Врач и информационные технологии. – 2018. – № 4. – С. 75-82.
12. Борисов Д.Д., Кульнев С.В., Севрюков В.В. Применение искусственного интеллекта при организации лечебно-диагностических мероприятий // Известия российской военно-медицинской академии. – 2019. – 38 (4). – С. 122-125. – URL: https://journals.eco-vector.com/RMMAreP/article/view/26037/20184/ru_RU.
13. Fitri L.A., Haryanto F., Arimura H., YunHao C., Ninomiya K., Nakano R. Automated classification of urinary stones based on microcomputed tomography images using convolutional neural network // *Physica Medica*. – 2020. – 78. – P. 201-208. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.09.007>.
14. Parakh A., Lee H., Lee J.H., Eisner B.H., Sahani D.V., Do S. Urinary Stone Detection on CT Images Using Deep Convolutional Neural Networks: Evaluation of Model Performance and Generalization // *Radiol Artif Intell*. – 2019 Jul 24. – 1(4):e180066. – URL: <https://doi.org/10.1148/ryai.2019180066>.
15. Пранович А.А., Исмаилов А.К., Карельская Н.А. и др. Искусственный интеллект в диагностике и лечении мочекаменной болезни // Российский журнал телемедицины и электронного здравоохранения. – 2022. – 8 (1). – С. 42-57. – URL: <https://doi.org/10.29188/2712-9217-2022-8-1-42-57>.
16. Jendeborg J., Thunberg P., Lide n M. Differentiation of distal ureteral stones and pelvic phleboliths using a convolutional neural network // *Urolithiasis*. – 2020. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00240-020-01180-z>.
17. Nithya A., Appathurai A., Venkatadri N., Ramji D.R., Anna Palagan C. Kidney disease detection and segmentation using artificial neural network and multi-kernel k-means clustering for ultrasound images // *Meas J Int Meas Confed*. – 2020. – 149. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106952>.
18. Кудряш В.Л., Маршев С.В., Габлия М.Ю. и др. Практические аспекты применения дистанционной литотрипсии у больных мочекаменной болезнью // Урология. – 2013. – № 2. – С. 12-17.
19. Чернега В.С., Еременко С.Н., Еременко А.Н. и др. Прогнозирование времени трансуретральной гольмиевой литотрипсии в лечении уролитиаза // Врач и информационные технологии. – 2020. – № 2. – С. 72-80. – DOI: 10.37690/1811-0193-2020-2-72-80.
20. Руденко М.А., Руденко А.В. Нечеткая модель классификации медицинских изображений на основе нейронных сетей // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2021. – Т. 1. – С. 336-339.

REFERENCES

1. Gusev A.V., Zarubina T.V. Podderzhka prinyatiya vrachebnykh resheniy v meditsinskikh informatsionnykh sistemakh meditsinskoy organizatsii [Support for medical decision-making in medical information systems of a medical organization], *Vrach i informatsionnye tekhnologii* [Doctor and information technologies], 2017, No. 2, pp. 60-72.
2. Omirova N.I., Tishkov A.V. Sistema podderzhki prinyatiya resheniy vracha-urologa v biotekhnicheskoy sisteme diagnostiki mochekamennoy bolezni [Decision support system of a urologist in a biotechnical system for diagnosing urolithiasis], *Biotekhnosfera* [Biotechnosphere], 2020, No. 5(65), pp. 43-48. DOI: 10.25960/bts.2020.5.43.
3. Shchamkhalova K.K., Merinov D.S., Artemov A.V. i dr. Iskusstvennyy intellekt i neyronnye seti v urologii [Artificial intelligence and neural networks in urology], *Eksperimental'naya i klinicheskaya urologiya* [Experimental and clinical urology], 2023, Vol. 16, No. 2, pp. 32-37. DOI: 10.29188/2222-8543-2023-16-2-32-37.
4. Galchenkov A.S., Novitskiy V.O., Kondrat'ev E.A. Servisy podderzhki prinyatiya resheniy po diagnostike i lecheniyu zabolevaniy i ikh prakticheskoe primeneniye na primere KhBP 5D [Decision support services for the diagnosis and treatment of diseases and their practical application on the example of CKD 5D], *Vrach i informatsionnye tekhnologii* [Doctor and information technology], 2020, No. 1, pp. 45-51. DOI: 10.37690/1811-0193-2020-1-45-51.
5. Levenkov K.O., Korovin E.N., Novikova E.I. Neyrosetevoye modelirovaniye protsessa vybora skhemy lecheniya patsientov s khronicheskim pielonefritom i mochekamennoy boleznyu [Neural network modeling of the process of choosing a treatment regimen for patients with chronic pyelonephritis and urolithiasis], *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technology], 2018, Vol. 6, No. 4 (23), pp. 61-71. – DOI: 10.26102/2310-6018/2018.23.4.005.

6. Kotsar' A.G. Matematicheskoe modelirovanie i algoritimizatsiya prognozirovaniya, diagnostiki, profilaktiki i lecheniya mochekamennoy bolezni: diss. ... d-ra med. nauk [Mathematical modeling and algorithmization of forecasting, diagnosis, prevention and treatment of urolithiasis: dr. of med. sc. diss.], 2014, 302 p.
7. Zubarev D.A., Korenevskaya S.N., Kotsar' A.G. i dr. Ispol'zovanie nechetkikh matematicheskikh modeley pri vedenii bol'nykh s mochekamennoy boleznyu [The use of fuzzy mathematical models in the management of patients with urolithiasis], *Sistemnyy analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh* [System analysis and management in biomedical systems], 2017, Vol. 16, No. 2, pp. 345-350.
8. Chernega V.S., Tlukhovskaya-Stepanenko N.P., Eremenko A. i dr. Otsenka skorosti fragmentatsii mochevykh kamney pri kontaktnoy litotripsii gol'mievym lazerom [Assessment of the rate of fragmentation of urinary stones during contact lithotripsy with a holmium laser], *Urologiya* [Urology], 2018, No. 5, pp. 69-73. DOI: 10.18565/urology.2018.5.69-72.
9. Korobkov D.M., Mosina L.M., Stepanov N.Yu. Primenenie distantsionnoy udarno-volnovoy litotripsii pri mochekamennoy bolezni [The use of remote shock wave lithotripsy in urolithiasis], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Scientific Research Journal], 2021, No. 2-3 (104), pp. 31-33. DOI: 10.23670/IRJ.2021.103.2.067.
10. Stepanov N.Yu. Duvayarov Z.A., Boyarkin E.V. i dr. Primenenie ekstrakorporal'noy udarno-volnovoy litotripsii i kontaktnoy ureterolitotripsii pri lechenii konkrementov v distal'nom otdel' mochetochnika [The use of extracorporeal shock wave lithotripsy and contact ureterolithotripsy in the treatment of concretions in the distal ureter], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Scientific Research Journal], 2020, No. 6 (98), pp 116-118.
11. Chernega V.S., Tlukhovskaya-Stepanenko N.P., Eremenko S.N. i dr. Setevaya model' dlya otsenki dlitel'nosti meditsinskogo tekhnologicheskogo protsessa lazernoy kontaktnoy litotripsii [A network model for estimating the duration of the medical technological process of laser contact lithotripsy], *Vrach i informatsionnye tekhnologii* [Doctor and Information Technologies], 2018, No. 4, pp. 75-82.
12. Borisov D.D., Kul'nev S.V., Sevryukov V.V. Primenenie iskusstvennogo intellekta pri organizatsii lechebno-diagnosticheskikh meropriyatiy [The use of artificial intelligence in the organization of therapeutic and diagnostic measures], *Izvestiya rossiyskoy voenno-meditsinskoy akademii* [Proceedings of the Russian Military Medical Academy], 2019, 38 (4), pp 122-125. Available at: https://journals.eco-vector.com/RMMAREp/article/view/26037/20184/ru_RU.
13. Fitri L.A., Haryanto F., Arimura H., YunHao C., Ninomiya K., Nakano R. Automated classification of urinary stones based on microcomputed tomography images using convolutional neural network, *Physica Medica*, 2020, 78, pp. 201-208. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.09.007>.
14. Parakh A., Lee H., Lee J.H., Eisner B.H., Sahani D.V., Do S. Urinary Stone Detection on CT Images Using Deep Convolutional Neural Networks: Evaluation of Model Performance and Generalization, *Radiol Artif Intell.*, 2019 Jul 24, 1(4):e180066. Available at: <https://doi.org/10.1148/ryai.2019180066>.
15. Pranovich A.A., Ismailov A.K., Karel'skaya N.A. i dr. Iskusstvennyy intellekt v diagnostike i lechenii mochekamennoy bolezni [Artificial intelligence in the diagnosis and treatment of urolithiasis], *Rossiyskiy zhurnal telemeditsiny i elektronnoy zdravookhraneniya* [Russian Journal of Telemedicine and E-Health], 2022, 8 (1), pp. 42-57. Available at: <https://doi.org/10.29188/2712-9217-2022-8-1-42-57>.
16. Jendeborg J., Thunberg P., Lide n M. Differentiation of distal ureteral stones and pelvic phleboliths using a convolutional neural network, *Urolithiasis*, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00240-020-01180-z>.
17. Nithya A., Appathurai A., Venkatadri N., Ramji D.R., Anna Palagan C. Kidney disease detection and segmentation using artificial neural network and multi-kernel k-means clustering for ultrasound images, *Meas J Int Meas Confed.*, 2020, 149. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106952>.
18. Kudryash V.L., Marshev S.V., Gabliya M.Yu i dr. Prakticheskie aspekty primeneniya distantsionnoy litotripsii u bol'nykh mochekamennoy boleznyu [Practical aspects of the use of remote lithotripsy in patients with urolithiasis], *Urologiya* [Urology], 2013, No. 2, pp. 12-17.
19. Chernega V.S., Eremenko S.N., Eremenko A.N. i dr. Prognozirovanie vremeni transuretral'noy gol'mievoy litotripsii v lechenii urolitiaza [Predicting the time of transurethral holmium lithotripsy in the treatment of urolithiasis], *Vrach i informatsionnye tekhnologii* [Doctor and Information Technologies], 2020, No. 2, pp. 72-80. DOI: 10.37690/1811-0193-2020-2-72-80.
20. Rudenko M.A., Rudenko A.V. Nechetkaya model' klassifikatsii meditsinskikh izobrazheniy na osnove neyronnykh setey [Fuzzy model of classification of medical images based on neural networks], *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [International Conference on Soft Computing and Measurements], 2021, Vol. 1, pp. 336-339.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор И.Л. Каширина.

Руденко Андрей Владимирович – Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; e-mail: rudenkoandre@mail.ru; г. Симферополь, Россия; преподаватель; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6297-2742>.

Руденко Марина Анатольевна – e-mail: rudenko.ma@cfuv.ru; к.т.н.; доцент кафедры компьютерной инженерии и моделирования Физико-технического института; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8334-8453>.

Rudenko Andrei Vladimirovich – V.I. Vernadsky Crimean Federal University; e-mail: rudenkoandre@mail.ru; Simferopol, Russia; assistant; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6297-2742>.

Rudenko Marina Anatol'evna – e-mail: rudenko.ma@cfuv.ru; cand. of eng. sc.; associate professor of the department of computer engineering and modeling of the Institute of Physics and Technology; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8334-8453>.