

УДК 621.373.826:616.62-003.7

## Особенности использования твердотельных лазеров при лечении мочекаменной болезни<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Чернега В. С., <sup>2</sup> Еременко А. Н.

<sup>1</sup> Севастопольский государственный университет  
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация  
vs\_chernega@mail.ru

<sup>2</sup> Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского,  
Клинический медицинский многопрофильный центр Святителя Луки  
бульвар Ленина 5/7, 295051, Симферополь, Россия  
medicalyug@gmail.com

Получено: 17 ноября 2020 г.

Отрецензировано: 2 декабря 2020 г.

Принято к публикации: 8 декабря 2020 г.

**Аннотация:** Приведены параметры твердотельного гольмиевого лазера, применяемого при лечении мочекаменной болезни. Представлены результаты экспериментальных исследований величины удельной потери массы мочевых камней при воздействии на конкремент импульсов гольмиевого лазера, излучающего импульсы с длиной волны 2,1 мкм, частотой от 8 до 12 Гц и энергией от 0,6 до 1,6 Дж. Получены значения удельной потери массы при локализации камней в различных сегментах мочеточников и чашечно-лоханочной системы почек, которая изменялась от  $0,383 \pm 0,087$  мг/Дж до  $0,487 \pm 0,083$  мг/Дж, в зависимости от пола больного и места локализации конкремента. Показано, что эта величина позволяет оценить длительность полного разрушения конкремента и прогнозировать длительность проведения операции литотрипсии.

**Ключевые слова:** гольмиевый лазер, удельная потеря массы камней, длительность разрушения конкремента, литотрипсия.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Чернега В. С., Еременко А. Н. Особенности использования твердотельных лазеров при лечении мочекаменной болезни // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 3. С. 287—295.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011):** Чернега, В. С. Особенности использования твердотельных лазеров при лечении мочекаменной болезни / В. С. Чернега, А. Н. Еременко // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 3. — С. 287—295.

---

<sup>1</sup> Статья является расширенной версией доклада, представленного на 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2020 (Севастополь, РФ, 6—12 сентября 2020 г.).

# Features of use of solid state lasers in the treatment of urolithiasis

V. S. Chernega<sup>1</sup> and A. N. Eremenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sevastopol State University  
33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation  
v\_chernega@rambler.ru

<sup>2</sup>V. I. Vernadsky Crimean Federal University  
St. Luke's Clinical Medical Multidisciplinary Center  
5/7, Lenina Boulevard, Simferopol, 295007, Russian Federation  
medicalyug@gmail.com

Received: November 17, 2020

Peer-reviewed: December 2, 2020

Accepted: December 8, 2020

**Abstract:** *The parameters of a solid-state holmium laser used in the treatment of urolithiasis are presented. The results of experimental studies of the value of the specific mass loss of urinary stones when the calculus is exposed to pulses of a holmium laser emitting pulses with a wavelength of 2.1  $\mu\text{m}$ , a frequency of 8 to 12 Hz, and an energy of 0.6 to 1.6 J mass with localization of stones in various segments of the ureters and the renal calyceal system, which varied from  $0.383 \pm 0.087$  mg/J to  $0.487 \pm 0.083$  mg/J, depending on the gender of the patient and the location of the calculus. It was shown that this value makes it possible to estimate the duration of the complete destruction of the calculus and to predict the duration of the lithotripsy operation.*

**Keywords:** *holmium laser, specific stone loss, duration of calculus destruction, lithotripsy.*

**For citation (IEEE):** V. S. Chernega et al. "Features of use of Solid State Lasers in the treatment of urolithiasis", *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 287–295, 2020. (In Russ.).

## 1. Введение

Мочекаменная болезнь (МКБ) характеризуется наличием твердых минеральных конкрементов (камней) в мочевыводящей системе человека: почках, мочеточниках, мочевом пузыре, образующихся в процессе его жизнедеятельности. МКБ встречается не менее чем у 3 % населения нашей страны. Проблема МКБ в Крыму и Севастополе дополнительно усугубляется в связи с высоким уровнем минерализации питьевой воды. 30—40 % урологических больных, находящихся на стационарном излечении в боль-

ницах, составляют люди, страдающие мочекаменной болезнью. Если не удастся излечить больного консервативными методами, врачи вынуждены осуществлять оперативное вмешательство. В настоящее время для удаления мочевых камней открытые операции проводятся редко. На смену им пришла малоинвазивная литотрипсия — способ дробления камней путем воздействия на него ультразвуковых ударных волн или лазерного излучения, генерируемых специальным устройством — литотриптером. Наиболее перспективным способом дробления мочевых конкрементов является лазерная литотрипсия с использованием литотриптера на основе твердотельного гольмиевого лазера, который является «золотым стандартом» контактной литотрипсии [1]. Гольмиевый лазер выполняется на основе кристалла искусственного рубина  $Al_2O_3$ , легированного ионами хрома  $Cr^{+3}$  и гольмия  $Ho^{+3}$ . Такой лазер получил обозначение Ho:YAG (Holmium: Yttrium-Aluminum-Garnet). В качестве генератора накачки применяется ксеноновая лампа-вспышка. Зарубежной и отечественной промышленностью выпускается несколько типов гольмиевых литотриптеров. Типовыми параметрами гольмиевого лазера являются: длина волны оптических колебаний 2100 нм; максимальная мощность излучения 30 Вт; энергия импульсов может регулироваться от 0,2 до 4 Дж; частота импульсов может устанавливаться от 3 до 25 Гц, а длительность импульсов — от 150 до 850 мкс. Преимуществом гольмиевого литотриптера является высокое поглощение излучения в биоткани и малая глубина проникновения в биоткань (до 0,4 мм), что позволяет локализовать область воздействия на конкремент без повреждения окружающей слизистой оболочки.

При трансуретральной контактной лазерной литотрипсии оптический зонд проводится хирургом через естественное физиологическое отверстие, уретру, мочевой пузырь и мочеточник до его непосредственного контакта с камнем. Затем по оптическому волокну подаются импульсы лазера, под действием которых происходит разрушение мочевого конкремента. Механизм разрушения мочевых конкрементов под действием лазерных импульсов достаточно подробно освещен в [2].

Одним из важнейших параметров литотрипсии является время полной фрагментации конкрементов, от которого зависит вероятность осложнений как во время операции, так и в послеоперационный период [3]. Кроме этого, длительность операции оказывает существенное влияние на ее стоимость. Поэтому оценка длительности предстоящей операции является весьма актуальной задачей.

Продолжительность всей операции по удалению мочевых конкрементов, состоящей из ряда этапов, в значительной степени определяется

длительностью собственно дробления (фрагментации) камней. Время фрагментации мочевого камня зависит от его объема, плотности, места локализации, параметров лазерных импульсов, пола и анатомических особенностей больного, а также некоторых других факторов. В урологической практике при диагностировании мочекаменной болезни для указания размера мочевого конкремента до сих пор используется один или два линейных размера [4]. При этом не учитывается форма камня, что приводит к существенной погрешности оценки его объема. Использование компьютерной томографии (КТ) при предоперационном обследовании позволяет оценить не только объем конкремента, но и его рентгенологическую плотность. При наличии таких данных авторами [5] было предложено вместо линейных размеров или объема конкремента использовать массу камня, которая учитывает как объем, так и плотность камня.

Для прогнозирования времени полной фрагментации мочевого камня при воздействии на него лазерных импульсов необходимо знать зависимость изменения массы камня от параметров лазерного излучения [2]. На настоящее время в отечественных и зарубежных литературных источниках, за исключением [1], практически отсутствуют сведения об интенсивности изменения массы мочевых камней при проведении контактной гольмиевой литотрипсии. Однако в статье [1] приведены данные об удельном расходе массы камней при дроблении лазерными импульсами *in vitro*, полученными без учета места локализации конкрементов и пола пациентов.

Целью работы является получение статистических параметров величины интенсивности потери массы мочевых конкрементов *in vivo*, локализованных в различных сегментах мочевыделительной системы (МВС) человека и с учетом пола больного при проведении трансуретральной контактной лазерной литотрипсии гольмиевым литотриптером.

## 2. Объекты исследований и методика эксперимента

Объектами исследований являлись искусственные мочевые камни, выполненные из стоматологического сверхпрочного гипса типа VegoStone с рентгенологической плотностью 2534 и 1400 единиц Хаунсфилда (HU), а также мочевые камни, локализованные в различных частях левого и правого мочеточников и чашечно-лоханочной системы (ЧЛС) человека. Масса конкрементов, находящихся в организме человека (*in vivo*), определялась косвенным образом на основе измеренных с помощью компьютерной томографии (КТ) объема и рентгенологической плотности. Масса камней, подвергавшихся дроблению, варьировалась от 0,0375 г до 4,98 г, а средняя рентгенологическая плотность камней находилась в диапазоне от 390 до

2400 HU. Доступ к конкрементам *in vivo* осуществлялся трансуретральным способом с помощью полуригидного или гибкого уретероскопов. Разрушение искусственных образцов выполнялось в лабораторных условиях (*in vitro*) гольмиевым лазером (Ho:YAG) типа Auriga (Германия) [1], а дробление мочевого камня — *in vivo* гольмиевым лазером отечественного производства типа Triple. Фрагментация камней *in vivo* производилась импульсами длительностью 500 мкс с энергией от 0,6 до 1,8 Дж и частотой от 8 до 12 Гц. Передача лазерных импульсов от излучателя до камня осуществлялась по оптическим волокнам диаметром от 270 до 600 мкм. Наблюдение за процессом дробления происходило посредством эндовидеокамеры типа ENDOCAM® Performance HD с выводом изображения на хирургический монитор и одновременной записью процесса литотрипсии на электронный носитель. В процессе дробления камня *in vivo* фиксировались возраст и пол больного, место локализации камня, фамилия хирурга, а также энергия и частота лазерных импульсов, диаметр оптического волокна. Дробление выполнялось до полной фрагментации камня. При этом фиксировалось число импульсов лазера, затраченных на фрагментацию камня. Образовавшиеся осколки транспортировались в мочевой пузырь с помощью урологической корзинки. Для обработки экспериментальных данных использовался программный пакет «Анализ данных» системы Excel.

### 3. Оценка удельной величины потери массы при воздействии лазерных импульсов

Среднее значение массы мочевого конкремента, локализованного в МВС пациента, вычислялась на основе объема и рентгенологической плотности камня, определенных с помощью обработки данных КТ программой отечественной разработки Inobitec DICOM Viewer Professional, по формуле [5]:

$$m = (1,539 + 0,000485 HU)V,$$

где  $V$  — объем конкремента в  $\text{см}^3$ ;  $HU$  — средняя рентгенологическая плотность конкремента, измеренная в единицах Хаунсфилда.

Действительное значение массы конкремента является случайной величиной, характер которой определяется погрешностями определения объема и рентгенологической плотности камня. Время разрушения камня при контактной лазерной литотрипсии зависит не только от массы камня, но и от суммарной энергии импульсов лазера  $E_{\text{сум}}$ , затраченной на полную фрагментацию камня. Поэтому для учета энергетических затрат на фрагментацию конкремента предлагается ввести относительную единицу из-

мерения  $\gamma$  — коэффициент удельной величины потери массы камня на 1 джоуль затраченной энергии, определяемый отношением начальной массы камня  $m$  к суммарной энергии импульсов  $E_{\text{сум}}$ , затраченной на полную его фрагментацию:

$$\gamma = m / E_{\text{сум}} \text{ [мг/Дж]}. \quad (1)$$

Значение коэффициента  $\gamma$ , рассчитываемого по формуле (1), является случайной величиной. Это связано как с погрешностью определения объема и рентгенологической плотности конкрементов при КТ, так и с погрешностью измерения суммарной энергии лазерных импульсов, затраченной на полную фрагментацию камней. Для исследования статистических характеристик коэффициента удельной величины потери массы вначале выполнялась проверка его распределения на нормальность. Были рассчитаны для выборки данных коэффициента удельной потери массы  $\gamma$  его среднее значения, медиана и мода распределения, а также ряд других показателей. Расчет выполнялся в системе Excel с использованием функции «Описательная статистика». Результаты расчетов экспериментальных данных, измеренных при проведении трансуретральной контактной лазерной литотрипсии конкрементов, расположенных в различных сегментах мочеточников и чашечно-лоханочной системы почек мужчин и женщин приведены в таблице 1.

Таблица 1. Статистические данные коэффициента удельной величины потери массы камня на 1 джоуль затраченной энергии.

Table 1. Statistical data of the coefficient of the specific value of the stone mass loss per 1 joule of energy expended

	А	В
1	<i>Столбец1</i>	
2		
3	Среднее	0,398681416
4	Стандартная ошибка	0,008403278
5	Медиана	0,397
6	Мода	0,388
7	Стандартное отклонение	0,089328074
8	Дисперсия выборки	0,007979505
9	Экссесс	0,164851954
10	Асимметричность	0,032292577
11	Интервал	0,443
12	Минимум	0,155
13	Максимум	0,598
14	Сумма	45,051
15	Счет	113

Как видно из приведенных данных расчета, среднее значение, медиана и мода распределения отличаются между собой на величину менее одного процента (примерно 0,75 %). Эксцесс и асимметричность близки к нулю. Из этого следует вывод, что можно предполагать, что выборочные данные коэффициента  $\gamma$  подчиняются нормальному закону распределения.

Средние значения и другие параметры распределений коэффициента  $\gamma$  при дроблении конкрементов в мочеточниках и ЧЛС несколько различаются между собой, однако, как показали статистические расчеты, различия среднего значения, медианы и моды для каждого из этих распределений остаются несущественными.

На основе экспериментальных данных установлено, что величина  $\gamma$  распределена по нормальному закону, а среднее значение удельной величины потери массы камня на единицу затраченной энергии при фрагментации *in vivo* гольмиевым лазером искусственных камней составило:

0,383  $\pm$  0,087 мг/Дж — при локализации камня в чашечно-лоханочной системе почек;

0,429  $\pm$  0,014 мг/Дж — при локализации камня различных сегментах мочеточников.

При этом выявлено, что средняя величина  $\gamma$  при дроблении камней в мочеточниках у мужчин и у женщин заметно различаются: (0,406 $\pm$ 0,069 у мужчин и 0,487 $\pm$ 0,083 у женщин), что объясняется анатомическими особенностями строения нижних отделов МВС у различных полов (более длинная мужская уретра, наличие простаты обуславливают меньшую подвижность и свободу манипуляций уретерореноскопом). Среднее значение  $\gamma$  при дроблении камней в чашечно-лоханочной системе не зависит от пола больного и составляет 0,382 $\pm$ 0,087 мг/Дж.

Расчет удельной величины потери массы конкремента, выполненный на основе результатов экспериментальных исследований *in vitro*, приведенных в [1], показал, эта величина сопоставима с данными, полученными авторами данной статьи. Так, при дроблении искусственных мочевых камней в лабораторных условиях величина  $\gamma$  оказалась равной 0,442 $\pm$ 0,083 мг/Дж. Более высокое значение  $\gamma$  объясняется тем, что дробление проходило в лабораторных, практически идеальных условиях.

В процессе экспериментальных исследований установлено, что, несмотря на то, что величина  $\gamma$  также является случайной величиной, среднее значение этого параметра может служить оценкой удельной величины потери массы конкремента при лазерной контактной фрагментации кам-

ней, локализованных в различных сегментах мочевыделительной системы человека.

Величина удельной потери массы конкрементов является базовой при прогнозировании времени собственно дробления. Ожидаемое время «чистого» дробления камня, при заданных энергии и частоте импульсов гольмиевого литотриптера, можно вычислить на основе формулы [5]

$$T_p = m / (\gamma_i \times F_i \times E_i),$$

где  $m$  — масса камня в миллиграммах;  $E_i$  — значение энергии импульса в джоулях (Дж),  $F_i$  — частота следования импульсов лазера с  $E_i$  энергией в герцах (Гц);  $\gamma$  — удельная величина потери массы камня на единицу энергии при заданной области локализации конкремента и пола больного.

#### 4. Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований в реальных условиях показано, что для оценки длительности дробления целесообразно использовать предложенный авторами параметр удельной скорости потери массы камня, представляющий собой отношение общей массы камня к суммарной энергии лазерного излучения, затраченной на его полное разрушение.

Полученные экспериментальные значения величины удельной потери массы мочевых конкрементов при контактной лазерной литотрипсии позволяют на основании результатов предоперационного обследования пациентов и устанавливаемых параметров излучения лазерного литотриптера оценить время собственно дробления камня, так и операции литотрипсии в целом.

#### Список литературы

1. Мартов А. Г., Диамант В. М., Борисик А. В. и др. Сравнительное исследование эффективности электроимпульсного и лазерного литотриптеров *in vitro* // Урология. 2013. №2. С.61—70.
2. Chernega V, Tlukhovskaya-Stepanenko N., Eremenko A. The prediction of urinary calculi fragmentation duration under the holmium laser pulses // ITM Web of Conferences. 2019. Т. 30, 13002. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf\\_crimico2019\\_13002.pdf](https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf_crimico2019_13002.pdf) (дата обращения: 12.11.2020).
3. Song Fan, Binbin Gong, Zongyao Hao et al. Risk factors of infectious complications following flexible ureteroscopy with a holmium laser : a retrospective study // Int J. Clin. Exp. Med. 2015, vol. 8(7), pp. 11252–11259.

4. Мочекаменная болезнь/Tiselius H-G., Alken P., Buck C. и др. Перевод с англ. Научн. ред. А. Г. Мартов. Европейская ассоциация урологов.EAU 2010. 106 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docplayer.ru/34954305-Mochekamennaya-bolezn-h-g-tiselius-p-alken-c-buck-m-gallucci-c-seitz-m-straub-o-traxer.html> (дата обращения: 12.11.2020).
5. Чернега В. С., Тлуховская-Степаненко Н. П., Еременко А. Н., Еременко С. Н. Оценка скорости фрагментации мочевого камня при контактной литотрипсии гольмиевым лазером // Урология. 2018. № 5. С. 37—40.

### Информация об авторах

**Чернега Виктор Степанович**, к. т. н., доц., доцент кафедры «Информационные системы» Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-5054-0396.

**Еременко Алексей Николаевич**, врач-уролог, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Клинический медицинский многопрофильный центр Святителя Луки, г. Симферополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-5318-6561.

### Information about the authors

**Viktor S. Chernega**, Associate Professor on Department of Information Systems. Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0001-5054-0396.

**Alexey N. Eremenko**, urologist, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, St. Luke's Clinical Medical Multidisciplinary Center, Simferopol, Russian Federation. ORCID 0000-0002-5318-6561.