



# «Умные» лазерные скальпели для роботизированной хирургии

Дмитриев А.К.<sup>1</sup> • Коновалов А.Н.<sup>1</sup> • Кортунов В.Н.<sup>1</sup> • Ульянов В.А.<sup>1</sup>

**Актуальность.** Создание автоматизированных и роботизированных систем для обеспечения прецизионности и малотравматичности операции – одно из главных направлений современной хирургии. Концепция так называемых умных лазерных скальпелей представляется перспективным техническим решением в этом направлении. **Цель** – разработка принципов организации обратной связи для интеллектуальных лазерных хирургических установок на основе CO<sub>2</sub>- и волоконных лазеров. **Материал и методы.** В качестве лазерных источников использовали одномодовый волноводный CO<sub>2</sub>-лазер мощностью до 25 Вт с высокочастотной накачкой активной среды, длиной волны излучения 10,6 мкм, а также одномодовый волоконный эрбиевый лазер мощностью до 5 Вт, длиной волны излучения 1,54 мкм. Методом организации обратной связи в хирургической лазерной установке послужил автодинный метод контроля лазерного выпаривания биотканей. Объектами воздействия «умного»

лазерного скальпеля стали ткани свиньи *in vitro*. Осуществлено тестирование лазерных установок с обратной связью на здоровых и опухолевых тканях животных (белые крысы) *in vitro* и *in vivo*. Производилось тестирование возможности диагностики лазерного выпаривания опухолевых тканей человека. **Результаты.** На примере одномодового CO<sub>2</sub>-лазера и одномодового волоконного эрбиевого лазера показано, что автодинный сигнал, возникающий при выпаривании разных биологических тканей, имеет разные спектральные характеристики. Это создает основу для организации обратной связи в хирургических установках, работающих по принципу «умного» скальпеля. Разработаны «интеллектуальная» хирургическая установка с обратной связью на основе CO<sub>2</sub>-лазера и макет «интеллектуальной» хирургической установки на основе волоконного эрбиевого лазера. Выполнены исследования возможностей дифференциальной диагностики типа испаряемой биологической ткани *in vitro* с использованием

данных лазерных скальпелей. Проведены доклинические испытания на биологических тканях *in vivo* «интеллектуальной» хирургической установки на основе CO<sub>2</sub>-лазера. Испытания показали, что такой «умный» лазерный скальпель позволяет оперативно отличать здоровую ткань от опухолевой, благодаря чему можно реализовать принципы малотравматичной операции. **Заключение.** С помощью метода автодинной диагностики лазерного испарения биологических тканей можно создавать хирургические установки, работающие по принципу «умного» скальпеля, который в режиме реального времени позволяет дифференцировать разные типы ткани, а также отличать здоровую ткань от опухолевой.

**Ключевые слова:** хирургический интеллектуальный лазер, «умный» лазерный скальпель, роботизированная хирургия

doi: 10.18786/2072-0505-2016-44-2-172-178

Современной тенденцией развития и совершенствования медицинских технологий является создание и применение в хирургии автоматизированных и роботизированных систем [1, 2]. Такой подход обеспечивает высокую точность проведения операций, минимальную инвазивность, контроль за ходом хирургического вмешательства в режиме реального времени, снижает риски

человеческого фактора и в итоге способствует быстрой послеоперационной реабилитации пациентов. Как правило, в подобных хирургических установках (например, хирургический комплекс Да Винчи [3]) можно выделить три основные компоненты: хирургические инструменты для проведения хирургических манипуляций, механизированную робототехническую систему для осуществления прецизионного



манипулирования этими инструментами, а также систему визуального наблюдения, с помощью которой на монитор выводится четкое изображение операционного поля.

Подобного рода системам присуща одна ключевая особенность, а именно: хирург, манипулируя инструментами дистанционно, посредством джойстиков, теряет контакт с реальной тканью, и единственным источником информации о хирургическом вмешательстве становится визуальное наблюдение. В связи с этим остро встает вопрос о разработке разного рода сенсоров, которые бы позволили хирургу «чувствовать» объект воздействия. Помимо этого сигналы с таких сенсоров могут использоваться для организации обратной связи. При определенных условиях хирургического вмешательства в автоматизированном режиме в реальном времени она формирует сигналы для системы управления хирургическим инструментом. Благодаря оперативному управлению инструментом в автоматизированном режиме с обратной связью можно минимизировать травматизацию здоровых тканей или вовсе ее избежать.

Одним из широко используемых хирургических инструментов является лазерное излучение [4]. Лазерные хирургические вмешательства характеризуются высокими локальностью и скоростью, минимальной травматизацией здоровых тканей.

Среди различных типов лазерных хирургических систем наибольшее распространение в медицинской практике получили установки на основе одноименных CO<sub>2</sub>-лазеров, генерирующих инфракрасное излучение с длиной волны 10,6 мкм [5, 6]. К существенным преимуществам этих хирургических систем относят высокий коэффициент поглощения такого излучения в воде (860 см<sup>-1</sup>), что дает возможность эффективно производить рез и испарение мягких тканей. К недостаткам – относительно высокую стоимость, большие габариты, а также то обстоятельство, что доставка излучения в операционное поле производится главным образом с помощью зеркально-шарнирного манипулятора, вследствие чего резко ограничивается их применение в широком спектре задач полостных хирургических вмешательств. Сегодня ограничение, связанное с доставкой излучения CO<sub>2</sub>-лазеров, частично преодолено в результате разработки гибких полых и кристаллических волноводов, позволяющих эффективно передавать операционное излучение в труднодоступные места человеческого тела [6].

**Дмитриев Александр Константинович** – науч. сотр.<sup>1</sup>

**Коновалов Алексей Николаевич** – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.<sup>1</sup>  
 ✉ 142190,  
 г. Москва, г. Троицк,  
 ул. Пионерская, 2.  
 Тел.: +7 (496) 751 09 92.  
 E-mail: alex\_konov@mail.ru

**Кортунов Владимир Николаевич** – науч. сотр.<sup>1</sup>

**Ульянов Валерий Андреевич** – канд. техн. наук, заместитель директора<sup>1</sup>

В лазерной хирургии широкое применение получили также волоконные лазеры. Благодаря гибкости и малым поперечным размерам оптоволокон эти установки стали широко использоваться для внутрисполостных операций вместе с современной эндоскопической техникой [7]. По сравнению с CO<sub>2</sub>-лазерами волоконные лазеры компактны и дешевы. Однако они имеют небольшой коэффициент поглощения (от 0,1 до 70 см<sup>-1</sup>) в воде на длинах волн, которые генерируют данные источники (от 0,9 до 2 мкм).

В ИПЛИТ РАН ведутся исследования и разработки так называемых умных лазерных скальпелей. Такие системы подразумевают организацию обратной связи, когда в режиме реального времени можно получать информацию о ходе процесса хирургического вмешательства и принимать оперативно в автоматизированном режиме решение об изменении условий воздействия на биологическую ткань [8, 9]. Такая концепция позволяет более эффективно реализовывать принципы малотравматичной и органосохраняющей хирургии.

Для организации обратной связи авторы предлагают использовать эффект самогетеродинамирования (автодинный эффект), возникающий в одномодовых лазерах при воздействии излучения на конденсированные среды, в частности на биологические ткани [10, 11]. Данный эффект заключается в том, что обратно рассеянное от внешнего движущегося объекта излучение попадает в резонатор лазера и инициирует модуляцию выходной мощности (автодинный сигнал) на доплеровской частоте. Автодинный сигнал может служить оперативным источником информации о ходе лазерного выпаривания биологических тканей и тем самым становится своего рода сенсором для организации обратной связи в «интеллектуальных» хирургических установках.

В статье представлены результаты работ по созданию хирургических установок с обратной связью на основе одномодовых CO<sub>2</sub>-лазеров и одномодовых волоконных лазеров.

## Методы и материал

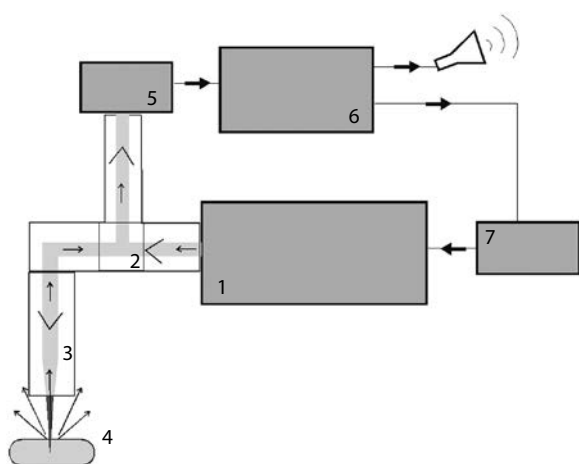
Метод организации обратной связи в «умном» лазерном скальпеле

Для создания оптико-информационного канала обратной связи использовался разработанный в ИПЛИТ РАН метод доплеровской диагностики лазерного испарения биологических тканей, основанный на самогетеродинамировании (прием на резонатор лазера) обратно рассеянного из зоны воздействия излучения [10, 11]. Оперативная

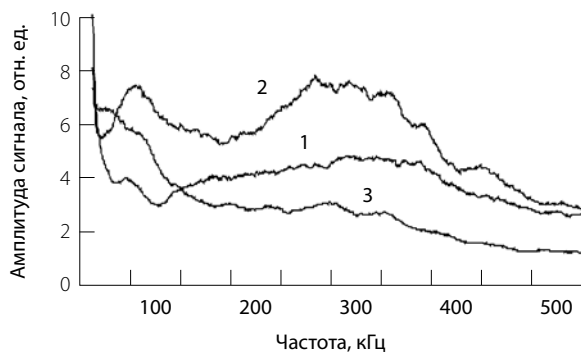
<sup>1</sup> ФГБУН «Институт проблем лазерных и информационных технологий» РАН; 140700, Московская область, г. Шатура, ул. Святоозерская, 1, Российская Федерация

диагностика процессов лазерного рассеяния, перфорации или испарения биологических тканей по автодинному сигналу и его производным (доплеровский спектр, площадь спектра, его средневзвешенная частота) состоит в выявлении различий и характерных особенностей амплитудно-частотных характеристик сигнала для различных типов испаряемых биологических тканей и коррекции параметров подаваемого излучения.

Ключевыми элементами (рис. 1) оптико-информационного канала обратной связи на основе метода самогетеродинамирования являются: одномодовый лазер (1) как источник и операционного, и диагностического излучения; фотоприемник



**Рис. 1.** Принципиальная схема оптико-информационного канала обратной связи на основе метода самогетеродинамирования в «умном» хирургическом лазерном скальпеле: 1 – одномодовый лазер, 2 – оптическая система отвлечения излучения, 3 – система доставки излучения, 4 – биоткань, 5 – фотоприемник, 6 – блок анализа-управления процессом лазерного испарения биотканей, 7 – блок управления лазера



**Рис. 2.** Усредненные спектры автодинного сигнала, возникающего в одномодовом  $\text{CO}_2$ -лазере при рассеянии биотканей различного типа при интенсивности  $10 \text{ кВт/см}^2$ : 1 – кость, 2 – жир, 3 – мышца

лазерного излучения (5); система доставки (3) лазерного излучения в операционное поле; программно-аппаратное обеспечение оперативной диагностики и управления процессом лазерного испарения биологической ткани (6 и 7).

Диагностика процесса лазерного испарения биологической ткани осуществляется следующим образом. Обратное рассеянное излучение с доплеровским сдвигом частоты попадает в резонатор лазера, в результате чего происходит модуляция его выходного излучения. Часть излучения лазера отводится и направляется на приемник лазерного излучения. Сигнал с фотоприемника обрабатывается и анализируется в блоке анализа-управления. Контроль и управление процессом испарения биологической ткани в режиме реального времени основываются на динамике изменения величины средневзвешенной частоты сигнала  $f(t)$  и мощности сигнала  $W(t)$  в заранее выбранном диапазоне частот. При достижении заранее задаваемых условий блок анализа-управления может подавать или звуковой сигнал, информирующий хирурга, или сигнал на блок управления лазера для изменения условий воздействия на биологическую ткань (например, экстренное выключение генерации излучения).

#### Лазерные источники

В качестве лазерных источников использовались одномодовый волоконный  $\text{CO}_2$ -лазер мощностью до 25 Вт с высокочастотной накачкой активной среды, длиной волны излучения 10,6 мкм, а также одномодовый волоконный эрбиевый лазер мощностью до 5 Вт, длиной волны излучения 1,54 мкм.

#### Объекты воздействия и способы воздействия

В качестве объектов воздействия служили ткани свиньи *in vitro*. При использовании тканей моделировался процесс хирургического вмешательства, при котором происходит переход воздействия излучения лазера с одной ткани на другую.

В случае  $\text{CO}_2$ -лазера производился рез тканей путем перемещения манипулятора лазерной установки и фокусировки излучения на поверхность ткани. При использовании волоконного эрбиевого лазера моделировался процесс хирургического вмешательства в режиме контактного воздействия. При этом осуществлялась перфорация отверстий путем перемещения дистального конца волокна лазера вглубь образцов тканей.

Исследования возможностей «умного» лазерного скальпеля проводились в ФГБУ



«МНИОИ им. П.А. Герцена» Минздрава России, ФГБУ «Государственный научный центр лазерной медицины ФМБА РФ», ФГБУ «РОНЦ им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, ГУЗ ТО «Тульская областная клиническая больница» (отделение нейрохирургии).

Для изучения возможностей дифференциации здоровой и опухолевой тканей человека в процессе лазерной операции использовались образцы тканей *in vitro* и *in vivo*. В случае *in vitro* образцы ткани злокачественной и доброкачественной опухолей молочной железы вместе с участками здоровой ткани изымались после проведения операций мастэктомии в ФГБУ «РОНЦ им. Н.Н. Блохина» Минздрава России. Размеры образцов не превышали объема 1–2 см<sup>3</sup>. Использовались образцы трех видов: целиком состоящие из опухолевой ткани, целиком состоящие из здоровой ткани (как правило, из жировой клетчатки) и образцы, содержащие как участки здоровой ткани, так и опухолевой. В первых двух случаях, чтобы обеспечить прохождение лазерного излучения через границу раздела биологических тканей, оба образца вплотную прижимались друг к другу. Образцы рассекались с захватом здоровых и патологических участков ткани сфокусированным лучом CO<sub>2</sub>-лазера мощностью 5 Вт.

В случае *in vivo* производился полный мониторинг операции, который включал в себя запись автодинного сигнала в процессе хирургического вмешательства с одновременной видеосъемкой всех манипуляций хирурга в оперируемой области. Это позволило в дальнейшем однозначно сопоставлять временные трансформации доплеровских спектров и, соответственно, изменения их параметров с конкретными изменениями, происходящими в операционной зоне: переходом лазерного пучка с одной ткани на другую, в том числе пересечением мелких кровеносных сосудов, жировых, иных включений и т.п.

## Результаты

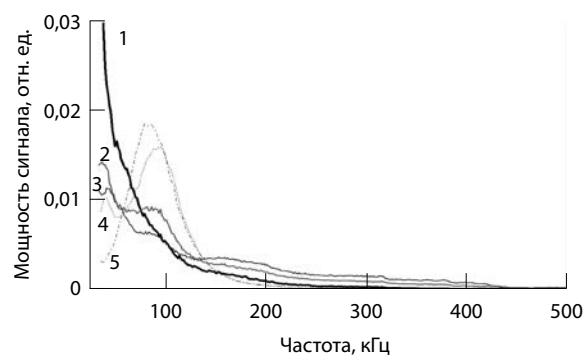
На рис. 2 приведены спектры автодинного сигнала, возникающего в одномодовом CO<sub>2</sub>-лазере при рассечении биологических тканей различного типа излучением интенсивностью 10 кВт/см<sup>2</sup>. При этом биологические ткани перемещались относительно сфокусированного пучка одномодового CO<sub>2</sub>-лазера со скоростью 0,5 мм/с. Как видно из рисунков, спектры, полученные при воздействии CO<sub>2</sub>-лазера на разные биологические ткани, имеют явные различия как по форме, так и по амплитуде. Это создает базу для



**Рис. 3.** «Интеллектуальная» лазерная установка с обратной связью на основе CO<sub>2</sub>-лазера

организации обратной связи в хирургических установках, работающих по принципу «умного» скальпеля.

На основе одномодового волноводного CO<sub>2</sub>-лазера была создана «интеллектуальная» хирургическая установка (рис. 3) с обратной связью. Приведем ее основные характеристики: длина волны излучения – 10,6 мкм, мощность выходного излучения – до 20 Вт, доставка излучения до операционного поля – шарнирно-зеркальный манипулятор. Из функциональных возможностей оперативной диагностики «умного» скальпеля на основе CO<sub>2</sub>-лазера выделим следующие: протоколирование лазерной операции в режиме реального времени – для последующего анализа данных; возможность задания «критических» параметров работы системы обратной связи, по которым определяется переход от испарения одной



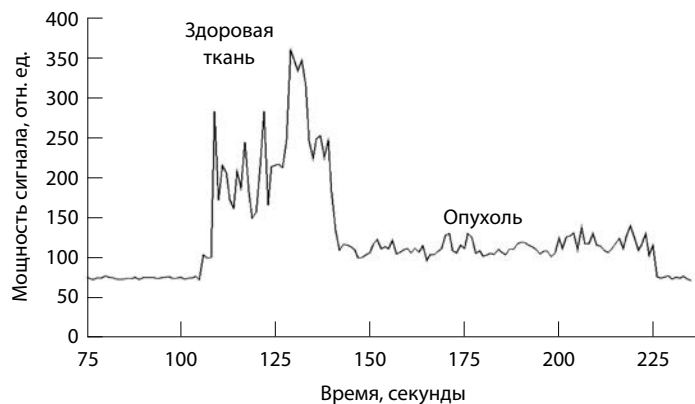
**Рис. 4.** Нормированные спектры мощности сигнала обратного рассеяния, возникающего при контактном выпаривании биомоделей волоконным эрбиевым лазером: 1 – жир, 2 – кожа, 3 – миокард, 4 – почка, 5 – мускул



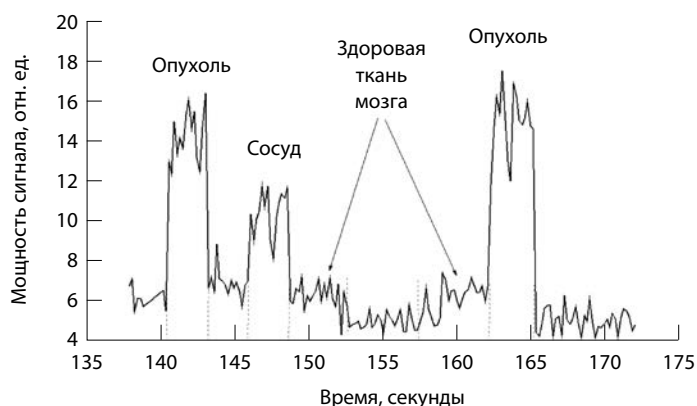
**Рис. 5.** Макет «интеллектуальной» хирургической установки с обратной связью на основе одномодового волоконного эрбиевого лазера



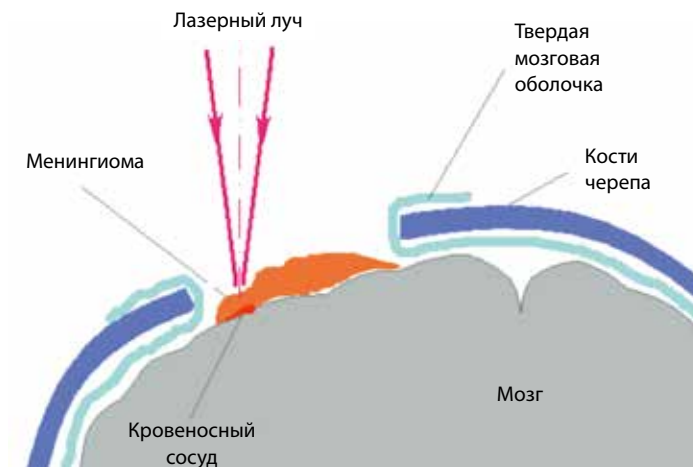
**Рис. 6.** Зависимость мощности автодинного сигнала от времени при удалении рака гортани человека



**Рис. 7.** Зависимость мощности автодинного сигнала от времени при выпаривании излучением CO<sub>2</sub>-лазера здоровой и опухолевой тканей молочной железы



**Рис. 8.** Зависимость мощности автодинного сигнала от времени при удалении злокачественной опухоли головного мозга излучением CO<sub>2</sub>-лазера (Тульская областная больница, отделение нейрохирургии)



**Рис. 9.** Схематическое изображение операции по удалению менингиомы «умным» скальпелем на основе CO<sub>2</sub>-лазера

биологической ткани к другой; подача предупреждающего звукового сигнала при начале воздействия на здоровую ткань; подача управляющих сигналов на блок управления лазера при заранее определяемых условиях для оперативного изменения режима воздействия на ткань (понижение мощности, экстренное выключение).

На рис. 4 даны усредненные нормированные спектры обратного рассеяния, возникающего для разных биологических тканей при их перфорации дистальным концом выходного волокна волоконного эрбиевого лазера. В качестве выходного волокна использовалось многомодовое волокно диаметром 400 мкм. Мощность излучения на выходе волокна составляла 3,7 Вт, а интенсивность – 2,9 кВт/см<sup>2</sup>. Скорость перемещения

волокна относительно биологической ткани – 1,4 мм/с.

Так же, как и в случае бесконтактного рассеяния биологических тканей излучением CO<sub>2</sub>-лазера, видны явные различия в спектрах автодинного сигнала, возникающего в волоконном эрбиевом лазере в режиме перфорации. На основе одномодового волоконного эрбиевого лазера мы создали макет «интеллектуальной» хирургической установки с обратной связью (рис. 5) со следующими основными техническими характеристиками: длина волны излучения – 1,54 мкм, мощность выходного излучения – до 5 Вт, доставка излучения до операционного поля – многомодовое волокно, режим генерации – непрерывный. «Умный» скальпель на основе волоконного



лазера обладает такими функциональными возможностями оперативной диагностики, как протоколирование лазерной операции в режиме реального времени – для последующего анализа данных, а также подача предупреждающего звукового сигнала при переходе от воздействия от одной ткани к другой.

На рис. 6 продемонстрирована зависимость мощности автодинного сигнала от времени при удалении рака гортани человека излучением «умного» скальпеля на основе CO<sub>2</sub>-лазера. Плоскоклеточный рак (мужчина, 45 лет) был локализован в нижнем отделе гортани. Опухоль в виде вытянутого вдоль гортани эллипса  $\frac{2}{5}$  см закрывала  $\frac{2}{3}$  площади сечения гортанного прохода. Операция заключалась в радикальном удалении пораженного участка гортани.

На рис. 7 изображен фрагмент динамики автодинного сигнала при прохождении излучения CO<sub>2</sub>-лазера через здоровую и опухолевую ткани молочной железы (*in vitro*).

На рис. 8 показан фрагмент динамики автодинного сигнала при выпаривании опухолевой ткани в мозге человека (*in vivo*) излучением CO<sub>2</sub>-лазера. Менингососудистая злокачественная опухоль левого доминантного полушария (женщина, 26 лет) была локализована вблизи синуса. Опухоль капсулирована, жидкой консистенции, размером 3–4 см в диаметре, частично проросла в твердую мозговую оболочку. Удаление опухоли проводилось как путем отсоса жидкой фракции, так и с помощью лазерного выпаривания, особенно в местах инфильтрации опухоли в мозговую оболочку (рис. 9).

Как видно из приведенных рисунков, мощность автодинного сигнала испытывает резкое изменение при пересечении лазерным пучком границы раздела разных тканей. Это создает основу для осуществления оперативной дифференциальной диагностики типа испаряемой биологической ткани и реализации принципа «умного» лазерного скальпеля в роботизированных хирургических установках.

## Заключение

Предложена концепция организации обратной связи для «умных» лазерных скальпелей, с помощью которых в режиме реального времени можно контролировать процесс хирургического вмешательства и изменять условия воздействия на биологическую ткань в целях минимизации травмирующего воздействия на здоровые ткани.

На примере одномодового CO<sub>2</sub>-лазера и одномодового волоконного эрбиевого лазера показано, что автодинный сигнал, возникающий при выпаривании разных биологических тканей, имеет разные спектральные характеристики. Этот принцип может быть использован для организации обратной связи в хирургических установках типа «умного» скальпеля.

На основе одномодового волноводного CO<sub>2</sub>-лазера была создана «интеллектуальная» хирургическая установка с обратной связью и проведены ее доклинические испытания. Их результаты показали, что такой «умный» лазерный скальпель позволяет оперативно отличать здоровую ткань от опухолевой, что дает возможность реализовать принципы малотравматичной операции. ©

## Финансирование

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 13-08-12121 офи\_м.

## Литература

- Ota T, Degani A, Schwartzman D, Zubiato B, McGarvey J, Choset H, Zenati MA. A highly articulated robotic surgical system for minimally invasive surgery. *Ann Thorac Surg*. 2009;87(4):1253–6. doi: 10.1016/j.athoracsur.2008.10.026.
- Rivera-Serrano CM, Johnson P, Zubiato B, Kuenzler R, Choset H, Zenati M, Tully S, Duvvuri U. A transoral highly flexible robot: Novel technology and application. *Laryngoscope*. 2012;122(5):1067–71. doi: 10.1002/lary.23237.
- Краевский СВ, Рогаткин ДА. Медицинская робототехника: первые шаги медицинских роботов. *Технологии живых систем*. 2010;7(4):3–14.
- Неворотин АИ. Введение в лазерную хирургию. СПб.: СпецЛит; 2000. 176 с.
- Минаев ВП. Лазерные аппараты для хирургии и силовой терапии: вчера, сегодня, завтра. *Лазерная медицина*. 2012;16(3): 57–65.
- Urich A, Maier RRJ, Fei Yu, Knight JC, Hand DP, Shephard JD. Silica hollow core microstructured fibres for mid-infrared surgical applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2013;377:236–9. doi: 10.1016/j.jnoncrsol.2013.01.055.
- Минаев ВП, Жилин КМ. Современные лазерные аппараты для хирургии и силовой терапии на основе полупроводниковых и волоконных лазеров. М.: Издатель И.В. Балабанов; 2009. 48 с.
- Кортунов ВН, Дмитриев АК, Коновалов АН, Ульянов ВА. Интеллектуальные CO<sub>2</sub> лазерные хирургические системы для прецизионного удаления новообразований. *Онкохирургия*. 2010;2(1):187–8.
- Дмитриев АК, Коновалов АН, Панченко ВЯ, Ульянов ВА, Варев ГА, Гейниц АВ, Маторин ОВ, Решетов ИВ, Самошенков ГС. Новые подходы к прецизионному и малотравматичному испарению биотканей на основе интеллектуальных лазерных хирургических систем. *Лазерная медицина*. 2013;17(1):4–10.
- Гордиенко ВМ, Коновалов АН, Ульянов ВА. Самогетеродинамирование обратно рассеянного излучения в одномодовых CO<sub>2</sub>-лазерах. *Квантовая электроника*. 2011;41(5): 433–40.
- Дмитриев АК, Коновалов АН, Ульянов ВА. Самогетеродинамирование обратнорассеянного излучения в одномодовом волоконном эрбиевом лазере для задач доплеровской спектроскопии и измерения скоростей. *Квантовая электроника*. 2014;44(4):309–13.



## References

- Ota T, Degani A, Schwartzman D, Zubiato B, McGarvey J, Choset H, Zenati MA. A highly articulated robotic surgical system for minimally invasive surgery. *Ann Thorac Surg*. 2009;87(4):1253–6. doi: 10.1016/j.athoracsur.2008.10.026.
- Rivera-Serrano CM, Johnson P, Zubiato B, Kuenzler R, Choset H, Zenati M, Tully S, Duvvuri U. A transoral highly flexible robot: Novel technology and application. *Laryngoscope*. 2012;122(5):1067–71. doi: 10.1002/lary.23237.
- Kraevskiy SV, Rogatkin DA. Meditsinskaya robototekhnika: pervye shagi meditsinskikh robotov [Medical robotics: the first steps of medical robots]. *Tekhnologii zhivyykh sistem* [Technologies of Living Systems]. 2010;7(4):3–14 (in Russian).
- Nevorotin AI. Vvedenie v lazernuyu khirurgiyu [Introduction to laser surgery]. Saint Petersburg: SpetsLit; 2000. 176 p. (in Russian).
- Minaev VP. Lazernye apparaty dlya khirurgii i silovoy terapii: vchera, segodnya, zavtra [Laser devices for surgery and power therapy: yesterday, today and tomorrow]. *Lazernaya meditsina* [Laser Medicine]. 2012;16(3):57–65 (in Russian).
- Urich A, Maier RRJ, Fei Yu, Knight JC, Hand DP, Shephard JD. Silica hollow core microstructured fibres for mid-infrared surgical applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2013;377:236–9. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2013.01.055.
- Minaev VP, Zhilin KM. Sovremennye lazernye apparaty dlya khirurgii i silovoy terapii na osnove poluprovodnikovykh i volokonnykh lazеров [Modern laser apparatus for surgery and force therapy based on semiconductor and fiber lasers]. Moscow: Publisher I.V. Balabanov; 2009. 48 p. (in Russian).
- Kortunov VN, Dmitriev AK, Konovalov AN, Ul'yanov VA. Intellektual'nye CO<sub>2</sub> lazernye khirurgicheskie sistemy dlya pretsizionnogo udaleniya novoobrazovaniy [Smart CO<sub>2</sub> laser surgical system for precise removal of tumors]. *Onkokhirurgiya* [Oncosurgery]. 2010;2(1):187–8 (in Russian).
- Dmitriev AK, Konovalov AN, Panchenko VYa, Ul'yanov VA, Varev GA, Geynits AV, Matorin OV, Reshetov IV, Samoshenkov GS. Novye podkhody k pretsizionnomu i malotravmatichnomu isparenuyu biotkaney na osnove intellektual'nykh lazernykh khirurgicheskikh sistem [New approaches to precision and small-traumatic biotissue evaporation using intellectual laser surgical systems]. *Lazernaya meditsina* [Laser Medicine]. 2013;17(1):4–10 (in Russian).
- Gordienko VM, Konovalov AN, Ul'yanov VA. Self-heterodyne detection of backscattered radiation in single-mode CO<sub>2</sub> lasers. *Quantum Electronics*. 2011;41(5):433–40. doi: 10.1070/QE2011v041n05ABEH014517.
- Dmitriev AK, Konovalov AN, Ul'yanov VA. Self-mixing detection of backscattered radiation in a single-mode erbium fibre laser for Doppler spectroscopy and velocity measurements. *Quantum Electronics*. 2014;44(4):309–13. doi: 10.1070/QE2014v044n04ABEH015316.

# “Smart” laser scalpels for robotic surgery

Dmitriev A.K.<sup>1</sup> • Konovalov A.N.<sup>1</sup> • Kortunov V.N.<sup>1</sup> • Ul'yanov V.A.<sup>1</sup>

**Background:** Elaboration of automatized and robotic systems for precision and minimally traumatic surgery is one of the main areas of modern surgery. The concept of the so-called “smart” laser scalpels seems a promising technical solution in this field. **Aim:** To develop organizational principles of a feedback smart surgical laser devices based on CO<sub>2</sub> and fiber lasers. **Materials and methods:** As laser sources, we used a one mode wave CO<sub>2</sub> laser with a power of up to 25 W, high frequency pumping of the active media and radiation wavelength of 10.6 mcm, as well as a one mode fiber Er laser with a power of up to 5 W and radiation wavelength of 1.54 mcm. The laser device feedback was organized with an autodynic control of laser evaporation of biological tissues. The “smart” laser scalpel effects were studied in the porcine tissues *in vitro*. The feedback laser devices were tested on normal and tumor animal tissues (white rats) *in vitro* and *in vivo*. Also, we tested the possibility of diagnostics of laser evaporation on human tumor tissues. **Results:** Taking the one mode CO<sub>2</sub> laser and one mode fiber Er laser as examples, it was shown that an autodynic signal arising during evaporation of various biological

tissues has different spectral characteristics. This makes the bases for organization of a feedback in surgical devices functioning as a “smart” scalpel. A “smart” surgical feedback device based on CO<sub>2</sub> laser and a decoy of a “smart” surgical device based on a fiber Er laser were developed. We studied the possibilities of differential diagnostics of a type of a tissue being evaporated *in vitro* with the use of the data from laser scalpels. Also, pre-clinical trials of a CO<sub>2</sub> laser-based “smart” surgical device on biological tissues were performed. The trials showed that such a “smart” laser scalpel allows for intra-operative differentiation between normal and tumor tissues that would give the possibility to implement minimally traumatic surgery principles. **Conclusion:** The method of autodynic diagnostics of laser evaporation of biological tissues allows for development of surgical devices functioning as a “smart” laser. It gives the possibility of a real-time differentiation of various types of tissues, including normal and tumor ones.

**Key words:** smart surgical laser, “smart” laser scalpel, robotic surgery

doi: 10.18786/2072-0505-2016-44-2-172-178

**Dmitriev Aleksandr K.** – Research Fellow<sup>1</sup>

**Konovalov Aleksey N.** – PhD (in Physics and Mathematics), Senior Research Fellow<sup>1</sup>

✉ 2 Pionerskaya ul., Troitsk, Moscow, 142190, Russian Federation. Tel.: +7 (496) 751 09 92. E-mail: alex\_konov@mail.ru

**Kortunov Vladimir N.** – Research Fellow<sup>1</sup>

**Ul'yanov Valeriy A.** – PhD (in Engineering), Deputy Director<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Laser and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences; 1 Svyatoozerskaya ul., Shatura, Moskovskaya oblast', 140700, Russian Federation