

ВЗРЫВНАЯ АБЛЯЦИЯ ТКАНЕЙ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ С  $\lambda = 2,79$  МКМ

В.И. Конов, А.М. Прохоров, А.С. Силенок, А.Ф. Умысков, И.А. Щербаков

*Продемонстрирована высокая эффективность и взрывной характер удаления биологических водосодержащих тканей излучением импульсного Er:ИСГГ лазера. Проводится сравнение порогов и удельных энергозатрат на абляцию тканей импульсным излучением разных длин волн.*

Интерес к использованию эрбиевых лазеров в хирургии [1] обусловлен тем, что длина волны  $\lambda$  их излучения близка к максимуму пика поглощения воды, составляющей основную часть большинства биотканей, и в силу этого, поглощаясь в тонком слое, оно способно оказывать локальное хирургическое действие. В настоящей работе определяются пороги и эффективность абляции излучением Er:ИСГГ лазера ( $\lambda = 2,79$  мкм) ряда тканей и изучается возможность его применения в задачах лазерной хирургии.

Эксперименты проводились в двух режимах работы лазера: в свободной генерации (импульс длительностью  $\tau \cong 150$  мкс по уровню 0,1) и при модулированной добротности (цуг из  $\cong 10$  эквивалентных пиков длительности  $\cong 500$  нс, отстоящих друг от друга на 6–8 мкс). Энергия  $Q$  импульса (цуга импульсов) не превышала 0,2 Дж, частота их следования составляла 2 Гц. Излучение фокусировалось на поверхность образцов из картофеля, жировой ткани или мела линзой с фокусным расстоянием 10 см. Плотность энергии  $E$  на образцах варьировалась смещением их вдоль каустики линзы.

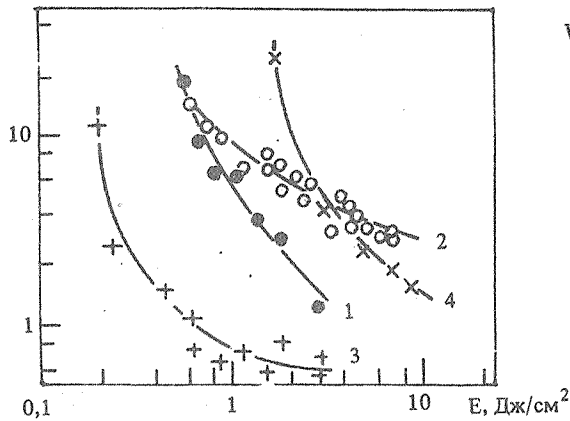
Для описания эффективности хирургического действия излучения на ткань использовалась величина  $W = Q/m$ , равная энергозатратам на удаление 1 г вещества. Определение массы  $m$ , потерянной вследствие лазерной абляции, осуществлялось взвешиванием образцов и с учетом их естественного высыхания за время эксперимента. Точность метода была удовлетворительной при  $W \leq 10$  кДж/г.

Феноменологически процесс удаления ткани можно описать, введя некоторую минимальную плотность энергии  $q$ , которую надо выделить в веществе, чтобы осуществить его разрушение и абляцию [2]. (В случае термической абляции, например, воды, величина  $q$  равна сумме внутренней теплоты испарения и энергии, необходимой для нагрева воды до температуры кипения:  $q \cong 2,7$  кДж/г.) В отсутствие теплопроводности и экранировки мишени разлетающимися парами величины  $q$ ,  $E$  и глубина поглощения излучения в ткани  $l$  полностью определяют значение  $W$ , которое оказывается в таких условиях не зависящим явно от длительности лазерного импульса  $\tau$  [2]. Зависимость от  $\tau$  может возникнуть лишь постольку, поскольку от  $\tau$ , при нетермическом механизме удаления ткани, может зависеть величина  $q$ . При существенном превышении порога абляции и выполнении вышеуказанных ограничений величина энергии  $Q_1$ , остающейся в ткани ( $Q_1 = Q - m_1q = mW - m_1q$ ), мала по сравнению с  $Q$  и, следовательно, выполняется соотношение  $W \cong q$ . Поэтому по зависимостям  $W = W(E, \tau)$  можно судить о величине  $q$  и о механизме удаления ткани. Например, если величина  $W$  оказывается зависящей от длительности импульса, это однозначно свидетельствует о зависимости от длительности импульса величины  $q$  и, следовательно, о нетермическом механизме удаления.

Экспериментальные зависимости  $W(E)$  для картофеля и жировой ткани представлены на рис. 1. Поскольку характерное значение температуропроводности для мягких тканей составляет  $\chi \cong 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с [3], то при  $\tau \leq 150$  мкс отводом тепла из зоны поглощения, глубина которой для воды при  $\lambda = 2,79$  мкм составляет  $l \cong 4$  мкм [1] (для картофеля и жировой ткани несколько больше), можно пренебречь. Поскольку в отсутствие теплопроводности и при прочих равных условиях уменьшение длительности лазерного импульса приводит к уменьшению  $W$ , механизм удаления ткани не является чисто термическим.

Наблюдаемый эффект мы связываем с взрывным механизмом удаления ткани импульсным излучением. Чем короче лазерный импульс, тем эффективнее должен проходить процесс лазерной взрывной абляции, при которой вынос основной массы ткани осуществляется вследствие испарения только части ее материала.

W, кДж/г



W, кДж/г

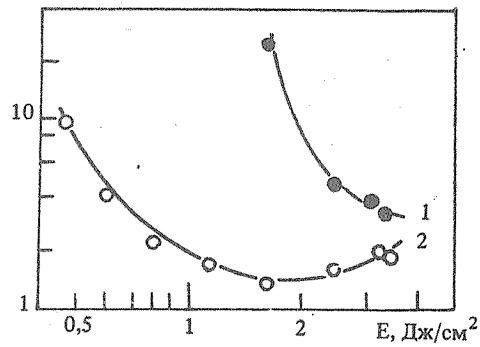


Рис. 1. Зависимости  $W(E)$  для картофеля (1, 2) и жировой ткани (3, 4), полученные для импульса свободной генерации (2, 4) и модулированной добротности (1, 3).

Рис. 2. Зависимости  $W(E)$  для сухого мела (1) и мела, содержащего  $\approx 50\%$  воды (2), в режиме модуляции добротности.

h, см

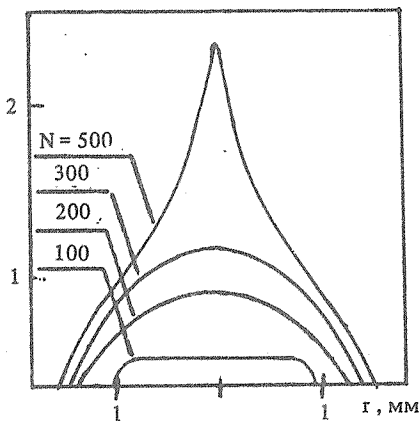


Рис. 3. Изменение профиля канала при низкой плотности энергии  $E \approx 2$  Дж/см<sup>2</sup> в импульсе свободной генерации по мере увеличения числа импульсов  $N$ ,  $r$  – радиус канала.

Особенно ярко снижение  $W$  наблюдается в случае жировой ткани (кривые 3, 4). Выброс материала при этом происходит главным образом в жидкой фазе, что подтверждается анализом продуктов абляции. Энергозатраты  $W$  в случае цуга импульсов при увеличении  $E$  снижаются до  $\approx 0,5$  кДж/г, что близко к энергозатратам, необходимым для нагрева жира до температуры кипения.

Остановимся на некоторых особенностях поведения зависимостей  $W(E)$  в случае картофеля (кривые 1, 2 рис. 1). Картофель характеризуется высоким содержанием воды, слабо связанной с органическим материалом. Удаляется картофель без плавления: в газовой фазе при термической деструкции или в мелкодисперсной – при взрывном разрушении. Явно взрывной характер удаления материала наблюдался при действии цуга импульсов (кривая 1 рис. 1). Об этом свидетельствуют отсутствие во всем диапазоне изменения  $E$  термической деструкции в продуктах абляции и низкие (меньше необходимых для чисто термического удаления воды) значения  $W$  при  $E \gtrsim 2$  Дж/см<sup>2</sup>. Термически неразложившиеся продукты абляции регистрируются также и при действии длинного импульса с  $E \gtrsim 1-2$  Дж/см<sup>2</sup> (кривая 2 рис. 1). Лишь при  $E < 1-2$  Дж/см<sup>2</sup> наблюдается термический или близкий к нему характер воздействия: после действия на фиксированный участок поверхности определенного числа импульсов  $N$  ( $N \approx 100$  при  $E \approx 1$  Дж/см<sup>2</sup>) на нем формируется углеродная пленка – продукт термического распада органической ткани.

Укорочение импульса, приводящее к снижению  $q$ , должно приводить к снижению и минимальной плотности энергии  $E_{th}$ , при которой наблюдается эффект абляции, так как  $E_{th}$  связана с  $q$  соотношением  $E_{th} \sim q!$ . Это явление наблюдается для жировой ткани (рис. 1). Не обсуждая здесь причин сближения

при малых  $E$  зависимостей  $W(E)$  для картофеля (кривые 1, 2 рис. 1), подчеркнем, что и в этом случае указанный процесс имеет место: как уже отмечалось, порог взрывного удаления органического материала картофеля длинным импульсом составляет  $1-2 \text{ Дж/см}^2$ , т.е. выше, чем при коротком.

Представляет несомненный интерес сравнить данные по  $E_{th}$  и  $W$ , полученные при облучении картофеля импульсами излучения с  $\lambda = 2,79 \text{ мкм}$  с результатами измерений этих же параметров на других типах лазеров. Сразу же отметим, что в полном объеме такое сравнение затруднено отсутствием экспериментов, проведенных в строго сопоставимых условиях — с импульсами одинаковой длительности и формы, при идентичном распределении энергии в пятне, с одинаковым типом ткани.

Сравнение с результатами экспериментов с излучением импульсных  $\text{CO}_2$  лазеров с  $\tau = 3-40 \text{ мкс}$  /4/, для которых абляция ткани происходит также вследствие поглощения света в воде ( $l \cong 10 \text{ мкм}$ ), а теплоотвод из зоны поглощения малосущественен, показывает, что порог абляции ведет себя в соответствии с соотношением  $E_{th} \cong \rho q l$ , где  $\rho$  и  $q$  — плотность и удельная теплота абляции ткани. При одинаковых значениях  $E/E_{th}$  значения  $W$  при  $\lambda = 2,79$  и  $10,6 \text{ мкм}$  оказываются близкими. Совпадающие с определенными нами в пределах погрешности измерений значения  $E_{th}$  и  $W$  получены также в экспериментах /1, 5/ для  $\lambda = 2,94 \text{ мкм}$ . Переход к излучению с  $\lambda = 308 \text{ нм}$  /2/, для которого вода прозрачна и излучение поглощается на длинах  $l \cong 5 \text{ мкм}$  /1/ непосредственно органическим веществом (связями С-С, С-Н), не приводит к значительным изменениям  $E_{th}$  и  $W$ . И наконец, для излучения неодимового лазера и его второй гармоники, т.е. для больших значений  $l$  ( $100-200 \text{ мкм}$ ), отмечаются высокие значения  $E_{th} \cong 100 \text{ Дж/см}^2$  /5/.

Излучение с  $\lambda = 2,79 \text{ мкм}$  способно эффективно удалять также и неорганические материалы. Содержание воды в них заметно влияет на значения  $E_{th}$  и  $W$ : как видно из зависимостей  $W(E)$  на рис. 2, насыщение мела водой до  $\cong 50\%$  приводит к пятикратному снижению порога.

Подчеркнем, что во всех режимах облучения и для всех материалов при определенном превышении порога абляции значения  $W$  снижаются до уровня  $1-2 \text{ кДж/г}$ , что сравнимо с энергозатратами при использовании наиболее перспективных типов лазеров.

Дополнительную информацию о возможности хирургических применений  $\text{Er:ISGG}$  лазера дают опыты по прохождению каналов в образцах из картофеля. При работе в режиме модулированной добротности форма образуемых каналов близка к цилиндрической (повторяет каустику линзы), термические повреждения на стенках отсутствуют. Вместе с тем, скорость  $V$  роста глубины канала  $h$  падает по мере ее увеличения. Например, при  $E \cong 3,2 \text{ Дж/см}^2$  и  $h = 0$  величина  $V$  составляла  $\cong 60 \text{ мкм/имп}$ , но снижалась до  $5 \text{ мкм/имп}$  на глубине  $h \cong 9 \text{ мм}$  после действия 500 импульсов. Снижение связано, на наш взгляд, с экранировкой парами, разлет которых ограничен, и с дополнительным поступлением воды в канал из термически неповрежденной окружающей ткани. При длинном импульсе стенки каналов гладкие, но слабое изменение их цвета указывает на некоторое термическое повреждение, объяснимое тем, что плотность энергии на боковой поверхности меньше  $E_{th}$ . Глубина  $h$  при  $N = 100-400$  растет практически линейно с увеличением  $N$  и описывается эмпирической зависимостью  $h [\text{мкм}] = 1,6N(E [\text{Дж/см}^2])^{1,7}$ . Профиль кратера меняется по мере увеличения  $N$  (рис. 3) и при больших  $N$  приобретает форму, близкую к конической. Отношение длины канала к его диаметру на входе может достигать  $\cong 10$  при  $E \geq E_{th}$ .

Таким образом, проведенные исследования показали высокую эффективность абляции и прохождения каналов в органических и неорганических водосодержащих материалах излучением  $\text{Er:ISGG}$  лазера ( $\lambda = 2,79 \text{ мкм}$ ), особенно в режиме с модулированной добротностью. В задачах лазерной хирургии этот тип лазера конкурентоспособен как с эксимерными, так и с импульсными  $\text{CO}_2$  лазерами, обладая при этом всеми преимуществами твердотельных лазеров. Широкое его применение в настоящее время сдерживается отсутствием гибких световодов.

Авторы выражают благодарность С.П. Калитину за выращенные кристаллы  $\text{Er:ISGG}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Esterowitz L. et al. Proc. SPIE., 605, Optical and Laser Technology in Medicine, 1986, p. 32.
2. Артюшенко В. Г. и др. Препринт ИОФАН № 167, М., 1987.
3. Van Gemert M.J.C. et al. Seminars in interventional radiology, 3, N 1, 27 (1986).
4. Алимпиёв С. С. и др. Препринт ИОФАН № 249, М., 1987.
5. Muller G. H.-P. Berlien In: Lasers in cardiovascular diseases, Proc. of 1 Int. Symp., Baden-Viena, 1986, p. 9.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 12 мая 1988 г.