

07

© 1991

НИЗКОПороговое свечение биотканей
под действием импульсов неодимового лазераГ.Б. А л ь т ш у л е р, А.В. Б е л и к о в,
А.В. Е р о ф е е в

При изучении взаимодействия мощного лазерного излучения с биотканями обычно основное внимание уделяется их лазерному разрушению [1, 2]. Однако при интенсивностях предшествующих разрушению биоткани могут проявляться нелинейные оптические свойства. Изучение их имеет принципиальное значение и может представлять большой интерес прежде всего для диагностики различных заболеваний.

В данной работе мы сообщаем об обнаружении и первом экспериментальном исследовании нелинейного свечения различных биотканей, наблюдаемого при их облучении лазерными импульсами ближнего ИК-диапазона с субмиллисекундной длительностью. Свечение наблюдалось нами при воздействии на эпидермис, мышечную ткань, мякоть яблока и другие биоткани импульсов неодимового ($\lambda = 1047, 1054, 1064$ нм) и гольмиевого (2088 нм) лазеров в режиме свободной генерации с длительностью 200–300 мкс.

Типичные спектры свечения эпидермиса человека и мякоти яблока в видимой области показаны на рис. 1. Спектры свечения для различных биотканей подобны. Характерная их черта – наличие двух максимумов и одного минимума. Минимум лежит в области 400 нм и может соответствовать полосе поглощения каротиноидов (полоса Соре) [3].

Свечение имеет существенно нелинейный характер по интенсивности возбуждающего излучения. На рис. 2 представлена зависимость интенсивности свечения от плотности энергии возбуждающего излучения. Данная кривая получена для мякоти яблока, но она имеет сходный характер и для других исследованных биотканей. Измерение интенсивности свечения проводилось на длине волны 500 нм, и каждый раз в новой точке образца. Важно отметить, что свечение имеет четко выраженный пороговый характер. После достижения порога зависимость быстро выходит на насыщение и остается постоянной вплоть до порога разрушения. Порог возникновения свечения на 2–3 порядка ниже порога разрушения биоткани. На участке насыщения интенсивность свечения постоянна при изменении мощности возбуждения почти в 100 раз.

Еще одна особенность этого свечения – эффект „старения“. Обнаружено, что интенсивность свечения монотонно уменьшается

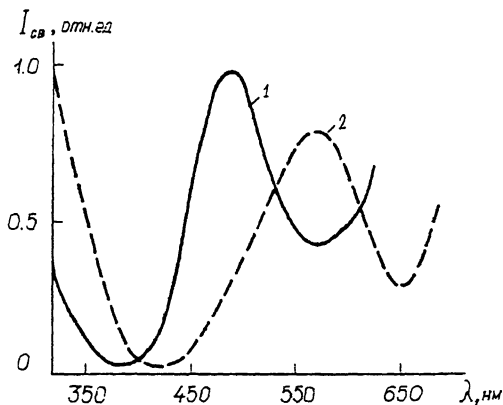


Рис. 1. Спектр свечения (1 – эпидермис, 2 – мякоть яблока).

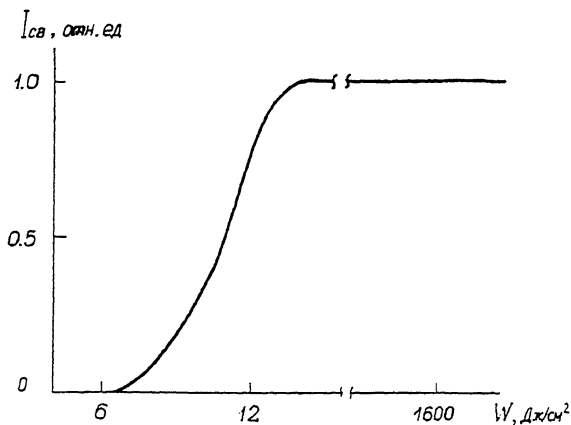


Рис. 2. Зависимость интенсивности свечения от плотности энергии возбуждающего излучения.

при многократном облучении одной точки образца, т.е. зависит от экспозиции возбуждающего излучения. На рис. 3 показана эта зависимость для мякоти яблока на длине волны 400 нм (кривая 1) и на 600 нм (кривая 2). В обоих случаях плотность энергии возбуждения одинакова и равна 6 Дж/см². Таким образом, постоянная времени деградации для различных спектральных компонент различна.

В свечении может проявляться анизотропия строения биотканей. При исследовании биологических образцов с ориентированной структурой, например мякоти яблока, обнаружена зависимость интенсивности свечения от ориентации структур ткани. Следует обратить внимание на то, что интенсивность свечения образца с коллинеарной

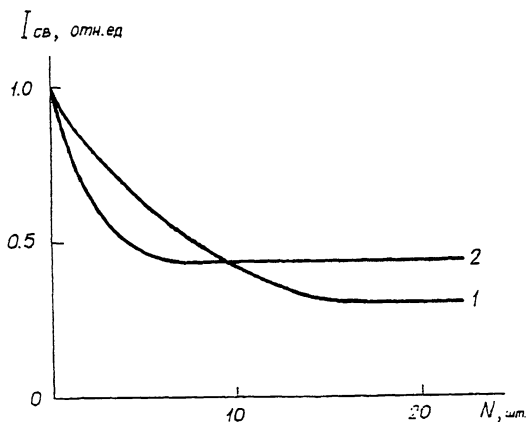


Рис. 3. Зависимость интенсивности свечения от экспозиции возбуждающего излучения (N – количество вспышек).

Т а б л и ц а 1

Пороги свечения и разрушения для различных биотканей

Ткань	Порог возникновения свечения, Дж/см ²	Порог разрушения биоткани, кДж/см ²
Мякоть яблока	1.1	1.6
Кожура яблока	0.3	0.4
Картофель	1.0	1.3
Эпидермис	0.2	-
Мышечная ткань	3.2	1.4

оси лазерного луча структурой в 3–4 раза выше, чем в случае ортогональной ориентации.

Описанные свойства характерны для всех исследованных биотканей. Однако между ними имеются отличия в порогах возбуждения свечения и порогах разрушения. Эти характеристики приведены в табл. 1. Видно, что наименьший порог возбуждения наблюдается у эпидермиса, а наибольший у мышечной ткани.

Порог возникновения свечения сильно зависит от длины волны возбуждающего излучения. Эпидермис облучался излучением 1047, 1054, 1064, 2088 нм. В табл. 2 представлены значения порогов возникновения свечения. Мы видим, что наблюдается сильный рост порога при переходе от длины волны 1047 к длине волны 1054 нм. Эта зависимость может указывать на резонансный характер взаимодействия. Однако в этом спектральном диапазоне сильные полосы поглощения у данных биотканей отсутствуют.

Т а б л и ц а 2

Пороги свечения при различной длине волны возбуждающего излучения

Длина волны возбуждающего излучения, нм	Порог возникновения свечения, Дж/см ²
1047	20
1054	0.2
1064	0.3
2088	Не наблюдается

По-видимому, данный эффект является универсальным для различных биотканей. Однако его механизм пока остается неясным. Мы четко знаем, что это свечение не сопровождается разрушением биотканей. Если бы подобные эффекты наблюдались при возбуждении ультрафиолетовым излучением, попадающим в полосу поглощения ряда биотканей, то можно было бы подобрать подходящую интерпретацию. В данном случае не ясно, как излучение, не попадающее ни в одну из сильных полос поглощения, может вызвать столь интенсивное антистоксовое свечение. Можно было предположить нелинейный характер возбуждения: 3–4 фотонное поглощение, многоступенчатое поглощение, генерацию гармоник лазерного излучения и их последующее поглощение. Однако при интенсивностях возбуждающего лазерного излучения порядка 150 кВт/см² эти процессы маловероятны.

Низкопороговое свечение биотканей, обнаруженное в настоящей работе, помимо принципиального интереса может иметь важное значение для диагностики состояния биоткани и определения предельно допустимых уровней лазерного излучения.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] F i n e S., K l e i n E. // *Advanc. Biol. Med. Phys.* 1965. V. 10. P. 149–226.
- [2] G o d m a n L. *Developments of laser in medicine and surgery* // *Laser. Bologna.* 1986. P. 17–20.
- [3] R o s e n c w a i g A. *Photoacoustics and photoacoustic spectroscopy.* N.Y.: Wiley, 1980.

Поступило в Редакцию
5 мая 1991 г.