

07

© 1990

ВОЗДЕЙСТВИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОТКАНИ

О.Ю. Воронина, М.А. Каплан,
В.А. Степанов

В настоящее время надежно установлено, что лазерное излучение с плотностью потока $10^{-3}-10^0$ Вт/см² оказывает стимулирующее действие на различные процессы в биотканях. Практика лазерной терапии показывает, что излучение в диапазоне длин волн 0.4–1 мкм приводит к активации иммунной системы, регенерационных процессов, клеток фагоцитарной системы, увеличению гемоглобина в крови, улучшению свойств клеточных мембран и т.д. [1]. Одним из наиболее возможных механизмов действия лазерного излучения на биообъекты принято считать механизм активации фотопроцессов. Исследования в этом направлении связаны с поиском молекулярных соединений – светоакцепторов при различных длинах волн излучения, в результате которых происходит инициирование биохимических реакций (см., например, [2, 3]). В таком рассмотрении непонятно, как самые различные фотопроцессы приводят к одинаковому стимулирующему воздействию лазерного излучения в диапазоне 0.4–0.6 мкм. Трудности также возникают при объяснении биостимуляции излучением в диапазоне 0.8–1.0 мкм, в котором в биотканях отсутствует резонансное поглощение.

Предлагаемый в данной работе подход базируется на том, что воздействие лазерного излучения приводит к неоднородности температурного поля в биотканях вследствие неравномерного распределения поглощающих центров (биологических мембран, белков и ионов в растворе). Характер такой температурной неоднородности в значительной степени зависит от длины волны и спектральной плотности излучения. Покажем, что такая температурная неравномерность может приводить к существенным деформациям клеточных мембран.

Плазматические мембраны являются не только механическими перегородками клеток от внешней среды, но и высокоизбирательными фильтрами, поддерживающими разницу концентраций ионов, в частности калия и натрия по обе стороны мембраны. При этом концентрация ионов внутри и вне клетки составляет $n \sim 140$ моль/м³ [4]. Нарушение равенства концентраций или температур по обе стороны мембраны приводит к возникновению осмотического давления на мембрану:

$$\Delta p = nRT \left(\frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta n}{n} \right). \quad (1)$$

Отметим, что давление Δp возникает вследствие различной проницаемости мембран для воды (характерное время диффузии через мембрану $\tau_b \sim 10^{-4}$ с) и для ионов ($\tau_u \sim 10^0 - 10^2$ с) [4]. В том случае, когда область изменения температуры и концентрации вблизи мембраны ограничена размером d , давление приводит к поперечному смещению мембраны на

$$x \approx \Delta p \frac{d^2}{hF},$$

где h - толщина мембраны (~ 10 нм), F - модуль Юнга сдвиговой деформации ($\sim 10^5$ н/м²). Полагая $\varepsilon = x/l$ (l - размер клетки) и используя (1), запишем уравнение движения мембраны на временах, меньших τ_u :

$$\dot{\varepsilon} = \left[a \left(\frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta T}{T} \right) - \varepsilon \right] \tau_b^{-1}, \quad (2)$$

где $a = \frac{nRTd^2}{h\ell F}$. Изменение температуры ΔT связано с различием коэффициентов поглощения по разные стороны мембраны и описывается уравнением:

$$\Delta \dot{T} = b I(t) - \frac{\Delta T}{\tau_T}, \quad (3)$$

где $b = \frac{\alpha}{c\rho}$, α - разница коэффициентов поглощения в области d и вне ее, c и ρ - теплоемкость и плотность воды, $I(t)$ - плотность потока лазерного излучения, τ_T - время температурной релаксации - $\tau_T = d^2/\kappa$ (κ - температуропроводность). Диффузия ионов натрия и калия из внешних областей (не через мембрану), а также смещение мембраны, сопровождающееся диффузией через нее воды, приводит в условиях неравномерного нагрева к изменению разности концентраций по обе стороны мембраны:

$$\Delta \dot{n} = -2n \dot{\varepsilon} - \frac{\Delta n}{\tau_D}, \quad (4)$$

где τ_D - характерное время диффузии ионов в воде ($\tau_D \sim d^2/D_{Na,K}$). В случае непрерывного воздействия лазерного излучения при предположении $\tau_D \gg \tau_T$ ($\tau_D/\tau_T \sim 10^2$) на больших временах решение системы (2), (3), (4) дает

$$\varepsilon \approx \frac{abI\tau_T}{T}.$$

В реальных условиях терапии He-Ne-лазером ($I \sim 1$ Вт/см², $d \sim 10^4$ см⁻¹) с учетом размера оптических неоднородностей $d = 1-10$ мкм (клеточные структуры) деформация клеток составляет $\varepsilon \sim 10^{-2} - 10^{-1}$. Можно предположить, что биологическое действие низкоинтенсивного лазерного излучения заключается в изменении обменных процессов в тканях и клетках за счет микродеформации мембран. Эффективность такого стимулирования, по-

видимому, должна быть выше в случае импульсного лазерного воздействия. Для оценки зависимости \mathcal{E} от частоты посылки лазерных импульсов положим $I(t) = I_0(1 - \sin \omega t)$. Решение системы (2), (3), (4) при больших временах:

$$\mathcal{E} \approx \frac{abI_0}{T} \left\{ \tau_T \frac{\tau_T \tau_D \omega \sin(\omega t + \arctg \frac{1 - \omega^2 \tau_D (\tau_T + \tau_D)}{\tau_D \omega (1 - \omega^2 \tau_T \tau_D)})}{[(1 - \tau_D^2 \omega^2 (\tau_D + \tau_T)) + \omega^2 \tau_D^2 (1 - \omega^2 \tau_T \tau_D)^2]^{1/2}} \right\}. \quad (5)$$

Частота, при которой реализуется наибольшая амплитуда колебаний, находится из условия $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \omega} = 0$.

$$\omega_{max} \approx \frac{1}{(\tau_D \tau_D \tau_T)^{1/2} (\tau_D^{-2} + \tau_T^{-2})^{1/4}}. \quad (6)$$

Важным является то обстоятельство, что ω_{max} зависит от размера d оптических неоднородностей, т.е. от структуры биоткани. Из (6) с учетом зависимостей τ_D и τ_T от d получим соотношение, позволяющее оценивать оптимальные частоты посылки лазерных импульсов:

$$\omega_{max} = \frac{10^4}{d(\text{мкм})(d^4(\text{мкм}^4) + 10^2)^{1/4}} (\Gamma_4). \quad (7)$$

Лечебное действие лазерного излучения связано, как показали эксперименты по изучению морфологии облученных тканей крыс, с существенным увеличением числа функционирующих капилляров. Характерные размеры капилляров сердечной мышцы человека соответствуют оценке $d \sim 10$ мкм, сделанной из (7) при условии $\omega_{max} = 10^2$ Гц. Из (5) была получена оценка $\mathcal{E}_{max} \sim 10^{-2}$. Отметим, что для лазерной терапии в соответствии с изложенным можно использовать нерезонансно поглощаемое лазерное излучение. В этом случае лечение внутренних органов может осуществляться облучением непосредственно через кожу (глубина проникновения в ткани излучения лазера на $Ga-As$ - до 4-7 см).

Рассмотренные колебания мембран клеток не являются единственным следствием лазерного воздействия. Нарушение равенства концентраций ионов внутри и вне клетки приводит к изменению электрического потенциала на мембране. Действительно, изменение потенциала определяется из соотношения (см., например, [5]):

$\Delta\varphi \approx \frac{RT}{F} \frac{\Delta n}{n}$, где F - число Фарадея. Из (5) и (4) нетрудно получить, что для $d \sim 1-10$ мкм, $\Delta\varphi \sim 10^{-3}-10^2$ мВ. Предположение о возможности изменения потенциала, но за счет термодиффузионных потоков при лазерном воздействии, сделано в [6].

- [1] Г а м а л е я Н.Ф., С т а д н и к В.Я. // Врачебное дело. 1988. № 9. С. 67-70.
- [2] Г а м а л е я Н.Ф., Ш и ш к о Е.Д., Я н и ш Ю.В. // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1986. Т. 50. № 5. С. 1027-1032.
- [3] К а р у Т.Й., К а л е н д о Г.С., Л о б к о В.В. // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1983. Т. 47. № 10. С. 2017-2022.
- [4] А л б е р т с Б., Б р е й Д., Л ь ю и с Дж. и др. Молекулярная биология клетки. М.: Мир, 1986. т. 2, 312 с.
- [5] Р у б и н А.Б. Биофизика. Книга 2. Биофизика клеточных процессов. М.: Высшая школа, 1987. 303 с.
- [6] В u n k i n F.V., L u k ' a n s h u k B.S., S h a f e e v G.A. // Proc. of SPIE. The Int. Soc. for Opt. Engineering. 1984. V. 473. P. 31-38.

Поступило в Редакцию
28 декабря 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 6

16 марта 1990 г.

04; 05.2

© 1990

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ПРОБОЙ МОНОКРИСТАЛЛОВ LiH И LiD В НАНОСЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ

Ю.Н. В е р ш и н и н, Р.В. Е м л и н,
С.О. Ч о л а х, В.Г. Ш п а к,
В.А. Б е л о г л а з о в

Кубические кристаллы гидрида и дейтерида лития представляют большой практический и научный интерес [1], в частности перспективным является использование их в качестве источника ионов в различных электрофизических установках.

В данной работе представлены результаты исследования пробоя монокристаллов LiH и LiD при 300 К импульсами положительной полярности длительностью 2,5 - 4 нс амплитудой 220 кВ, создаваемыми генератором РАДАН [2]. Фронты импульса не превышали 0,5 нс. Монокристаллы LiH и LiD были выращены методом Чохральского из расплава. Дополнительному отжигу в атмосфере водорода образцы не подвергались. Для экспериментов использовались образцы сечением 10×10 мм² толщиной от 1 до 20 мм, выкальвываемые непосредственно перед испытаниями.