

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭРИТРОЦИТЫ НА ДЛИНАХ ВОЛН 1,26 И 0,63 МКМ

С.Д. Захаров, Б.В. Еремеев, С.Н. Перов

На основании детального спектра биологического действия лазерного излучения вблизи 1,26 мкм идентифицирован первичный механизм фотовозбуждения O_2 ${}^3\Sigma_g^- \rightarrow {}^1\Delta_g$. Из сравнения с биоэффектом на 0,63 мкм сделан вывод о преобладании на этой длине волны фотогенерации аналогичного продукта 1O_2 по механизму ${}^3\Sigma_g^- + {}^3\Sigma_g^- \rightarrow {}^1\Delta_g + {}^1\Delta_g$.

В работе /1/ показано, что биологический эффект, вызываемый воздействием низкоинтенсивного лазерного излучения на эритроциты в районе длинноволновой части полосы ${}^3\Sigma_g^-(v=0) \rightarrow {}^1\Delta_g(v=0)$, качественно согласуется с представлением о механизме прямого фотовозбуждения молекулярного кислорода в электронно-возбужденное синглетное состояние 1O_2 /2/. В настоящем сообщении приведены результаты более полных измерений по всей полосе ${}^3\Sigma_g^- \rightarrow {}^1\Delta_g$, дополнительно подтверждающие выводы /1/. На основании этих данных оказывается возможным поставить вопрос о проявлении биоэффекта по механизму фотогенерации 1O_2 в других полосах поглощения 1O_2 , например, в полосе $2{}^3\Sigma_g^- \rightarrow 2{}^1\Delta_g$ с максимумом вблизи $\lambda = 0,633$ мкм. Указанная длина волны с точки зрения биоэффекта представляет особый интерес, т.к. совпадает с длиной волны He-Ne лазера, излучение которого используется в терапевтических целях /3/. В то же время, существуют экспериментальные указания на то, что в эритроцитах могут присутствовать иные хромофоры, в частности, протопорфирин IX, полоса поглощения которого лежит в данной области /4/. Сравнительные измерения могут прояснить природу первичных мишеней излучения He-Ne лазера.

Схема экспериментов и способ приготовления эритроцитов были аналогичны описанным в /1/. Длина волны излучения плавно перестраивалась в пределах 1,255 – 1,290 мкм путем изменения температуры полупроводникового инжекционного лазера от -119 до $+27$ °С, при этом ширина линии излучения составляла в среднем 1 нм. Мощность лазера выбиралась в пределах от 0,5 до 2 мВт и в процессе измерений поддерживалась постоянной ($\pm 5\%$). Излучение в виде коллимированного пучка диаметром 2,0 см направлялось в проточный смеситель диаметром 2,0 и высотой 1,5 см. Времена облучения клеток в смесителе, проходя их к области регистрации и пребывания вне зоны облучения составляли соответственно 70, 5 и 20 с. Среднее напряжение сдвига в кювете составляло 7 Дж/см². В /5/ отмечено, что способность клеток деформироваться в сдвиговом течении является одной из важнейших характеристик их жизнедеятельности. Измеряемым параметром являлось время t_m^* достижения эритроцитами максимума деформируемости /1/. Предварительно снимались зависимости t_m^* от плотности потока облучения q , на которых определялся линейный участок.

Эксперименты с облучением на $\lambda_2 = 0,633$ мкм выполнялись с помощью серийного лазера ЛГ-38 мощностью 50 мВт. При измерениях лазерный пучок расфокусировался до $\bar{q} \approx 15$ мВт/см², клетки облучались в тех же условиях.

На рис. 1 показаны спектры биологического действия для образцов клеток от двух различных доноров, снятые в пределах доз $qt_m \leq q^* t_m^*$, где q^* – предельное значение q на линейном участке $t_m^*(q)$, а $t_m^* \equiv t_m(q^*)$. В максимуме полосы $\lambda_1 = 1,264$ мкм $t_m = 1$ мин при средней плотности потока излучения в смесителе $\bar{q} = 180$ мВт/см² (с учетом поглощения в воде). На длине волны λ_2 $t_m = 7$ мин. На рис. 1 также показаны соответствующие спектры поглощения O_2 растворенного во фреоне $C_2Cl_2F_3$ /6/. Отметим совпадение положения максимума, ширины и формы линии на λ_1 .

Определим отношение эффективности биодействия на λ_1 и λ_2 как $\eta_{12} = \bar{q}_2 t_2 / \bar{q}_1 t_1$. Тогда имеем $\eta_{12} \approx 600$. Поскольку λ_2 попадает в полосу ${}^3\Sigma_g^- + {}^3\Sigma_g^- \rightarrow {}^1\Delta_g + {}^1\Delta_g$ вблизи максимума, то на этой длине волны должна быть и генерация 1O_2 . Будем считать интенсивность B биологического воздействия в обоих

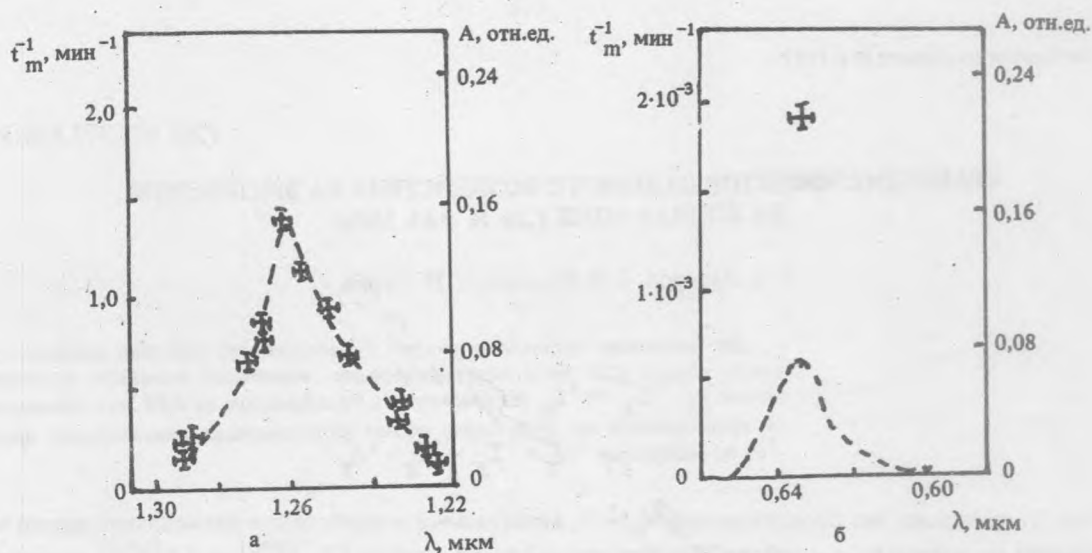


Рис. 1. Экспериментальная зависимость биологического отклика эритроцитов t_m^{-1} от длины волны λ в области переходов растворенного O_2 ${}^3\Sigma_g^- \rightarrow {}^1\Delta_g$ (а) и ${}^3\Sigma_g^- + {}^3\Sigma_g^- \rightarrow {}^1\Delta_g + {}^1\Delta_g$ (б). Для сравнения пунктиром приведены спектры поглощения O_2 в $C_2Cl_2F_2 I/6/$ для двух указанных переходов.

случаях пропорциональной скорости генерации 1O_2 : $V = bN$, b — коэффициент пропорциональности. Поэтому $V_2/V_1 = q_2 A_2 / q_1 A_1$, где $A = 1 - \exp(-KX)$, K — коэффициент поглощения, X — характерная длина. Коэффициент $\xi = V_2 t_{m2} / V_1 t_{m1}$ есть мера конкуренции хромофоров: $\xi \cong 1$ в случае преобладания механизма фотогенерации 1O_2 и $\xi \ll 1$ в противоположном случае. Учтем зависимость поглощения от парциального давления P кислорода: $A_1 = a_1 P + a_2 P^2$, $A_2 = \beta_1 P + \beta_2 P^2$ /7/. В наших условиях ожидается $a_2 P^2 \ll a_1 P$ и $\beta_1 = 0$, отсюда $A_2/A_1 = \chi P$ и $\xi_{\text{экср}} = \eta_{12} A_2/A_1 = 0,35$.

Приведенная оценка свидетельствует о преимущественном вкладе механизма ${}^3\Sigma_g^- + {}^3\Sigma_g^- \rightarrow {}^1\Delta_g + {}^1\Delta_g$. Окончательным подтверждением этого вывода было бы снятие зависимости биоэффекта от P . Отклонение этой зависимости от квадратичной показало бы вклад дополнительных хромофоров.

В заключение отметим основные допущения, при которых выполнены оценки. На основании совпадения полученного спектра действия вблизи 1,26 мкм при $P = 0,2$ атм с линией поглощения O_2 при $P = 124$ атм /6/ считается, что форма линии 0,633 мкм, $P = 124$ атм /6/ сохраняется неизменной при $P = 0,2$ атм. Кроме того, предполагается, что коэффициенты поглощения O_2 растворенного в различных фреонах на $\lambda_1 = 1,26$ и $\lambda_2 = 0,633$ мкм не отличаются по порядку величины /6, 7/. Ошибка в оценке ξ может быть также связана с рядом других принятых допущений, например: более сильной чем в $V \propto N$ зависимостью эффекта для бимолекулярной реакции, различиями в значениях χ для нашего случая и /7/, погрешностью определения t_m для λ_2 .

Авторы благодарны Р.В. Амбарцумяну за обсуждение материалов статьи, Н.А. Панасенко и С.П. Чертанову за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амбарцумян Р. В. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 10, 35 (1987).
2. Ambartzumian R. V. Proc. of SPIE EKOOSA-86, Florence, 1987, p. 341.
3. Крюк А. С. и др. Терапевтическая эффективность низкоинтенсивного лазерного излучения. Наука и техника, Минск, 1986.
4. Захаров С. Д., Звиневич Ю. В., Чудновский В. М. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 7, 49 (1988).
5. Захаров С. Д. О деформируемости эритроцитов. В сб. Физика живого, № 10, Знание, М., 1985, с. 41.
6. Long C., Kearns D. R. J. Chem. Phys., 59, 5729 (1973).
7. Matheson I.B.C., Lee J. Chem. Phys. Lett., 8, 173 (1971).

Поступила в редакцию 27 июля 1988 г.