

Литература

1. Аверина Н.Г., Яронская Е.Б. Биосинтез тетрапирролов в растениях. – Мн.: Беларуская навука, С. 295 – 314.

ОБ АКЦЕПТОРАХ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЕГО РЕГУЛЯТОРНОЕ ДЕЙСТВИЕ НА ЗООПЛАНКТОН *ARTEMIA SALINA* L.

¹Плавский В.Ю., ²Барулин Н.В., ¹Грабчиков А.С., ¹Ходасевич И.А.,
¹Зусин Д.Г., ¹Плавская Л.Г., ¹Третьякова А.И., ¹Орлович В.А.

¹*Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
v.plavskii@ifanbel.bas-net.by*

²*Белорусская государственная сельскохозяйственная академия,
Горки, Беларусь*

При рассмотрении механизмов фотофизических процессов, определяющих регуляторное действие низкоинтенсивного лазерного излучения видимой области спектра, наличие фотобиологического эффекта, как правило, связывают с поглощением излучения либо белковыми макромолекулами, содержащими простетические группы (гемоглобин, цитохром-с-оксидаза, супероксиддисмутаза, каталаза и др.), либо с активацией светом эндогенных фотосенсибилизаторов (прежде всего порфириновой природы). Считается, что в первом случае воздействие излучения приводит к изменению кислородтранспортной функции гемоглобина и повышению локальной концентрации кислорода за счет фотодиссоциации его от оксигемоглобина, а также к изменению активности ферментных систем (цитохром-с-оксидазы, супероксиддисмутазы, каталазы). В случае определяющей роли сенсibilизированных реакций в механизме биологической активности лазерного излучения приоритетное значение отводят процессам изменения проницаемости клеточных мембран за счет реакций перекисного окисления липидов.

Вопрос о биологической активности оптического излучения низкой интенсивности ближней инфракрасной области спектра, а также о его возможных молекулах-акцепторах остается открытым.

Исследования, выполненные в настоящей работе, позволили впервые обнаружить способность излучения как красного диапазона, так и ближней инфракрасной области спектра, располагающейся вне полосы элек-

тронного поглощения основных хромофоров животной клетки, оказывать регуляторное действие на протекающие биохимические процессы, контролирующие выклев науплий жаброногого рачка *Artemia salina* L при облучении его цист (защитной оболочки). В качестве теста на действие лазерного излучения выбран процент выклева науплиусов из цист (γ , %) после активации яиц в соленой воде в условиях поддержания стабильного теплового режима. Воздействие на цисты осуществляли непрерывным излучением с длиной волны 632,8 нм (гелий-неоновый лазер); 808; 976 нм (полупроводниковые лазеры); 1064; 1342 нм (лазеры на кристаллах $Nd:YVO_4$ с диодной накачкой); 1176 нм (лазер с диодной накачкой и с последующим ВКР-преобразованием излучения 1064 нм) при плотности мощности $P = 3$ мВт/см².

С целью выявления оптимальных параметров излучения выполнены исследования зависимости фотобиологического эффекта от времени воздействия t (дозовые зависимости) на всех указанных длинах волн. Характерной особенностью полученных дозовых кривых является наличие ярко выраженных экстремумов в диапазоне $E = 0,09-1,8$ Дж/см², соответствующих максимальному стимулирующему или ингибирующему действию излучения (в зависимости от длины волны воздействующего излучения). При этом если воздействие излучения с длиной волны $\lambda = 632,8$; 976 и 1064 нм сопровождается ингибированием (по сравнению с контролем) процесса выклева науплий, то при облучении цист лазерным излучением с $\lambda = 808$; 1176 и 1342 нм наблюдается стимуляция указанного процесса. Регистрируемые эффекты не обусловлены фототермическим действием света и при оптимальных условиях характеризуются высокой степенью достоверности ($P < 0,01$).

Максимальное ингибирующее действие ($\gamma = 67$ %) отмечается для $\lambda = 632,8$ нм и наблюдается при времени облучения $t = 90$ с, $E = 0,27$ Дж/см². Снижение или увеличение энергетической нагрузки приводит к снижению фотобиологического эффекта. Максимальный эффект стимуляции процесса выклева артемий отмечается при воздействии излучения с длиной волны $\lambda = 1176$ нм. При облучении цист в течение $t = 300$ с, $E = 0,9$ Дж/см² процент выклева ($\gamma = 156,3$ %) более чем в 1,5 раза превышает соответствующую величину для необлученных особей. Как и при других длинах волн ($\lambda = 808$ и 1342 нм) увеличение или снижение дозовой нагрузки приводит к снижению эффекта стимуляции. Тот факт, что зависимость $\gamma = f(t)$ не описывается экспоненциальной (полиэкспоненциальной) функцией, указывает на регуляторный характер биологического действия низкоинтенсивного лазерного излучения.

Поскольку лазерное излучение с $\lambda = 808; 976; 1064; 1176; 1342$ нм находится вне полосы электронного поглощения порфириновых фотосенсибилизаторов, то возможную роль фотодинамических реакций с их участием следует исключить. Наличие выраженных фотобиологических реакций при воздействии излучения с $\lambda = 1176; 1342$ нм позволяет также исключить возможную роль прямых фотохимических процессов с участием макромолекул, содержащих простетические группы, поскольку согласно литературным данным электронное поглощение для них отсутствует при $\lambda > 1100$ нм. Кроме того, наличие точек экстремумов в спектре поглощения водных растворов указанных макромолекул в области $\lambda = 1100\text{--}2500$ нм практически полностью определяется растворителем.

Среди возможных акцепторов оптического излучения ближней инфракрасной области спектра (по крайней мере, на некоторых из указанных длин волн) может выступать молекулярный кислород, а наблюдаемое биологическое действие лазерного излучения может быть обусловлено прямым триплет-синглетным возбуждением молекулярного кислорода, растворенного в биотканях. Так, нами получены прямые подтверждения участия синглетного кислорода в фотохимических реакциях, определяющих фотолиз билирубина, при воздействии излучения с длиной волны $\lambda = 1064$ нм, соответствующей одному из максимумов в спектре поглощения синглетного кислорода. Согласно литературным данным, полученным при высоком давлении, полосы поглощения кислорода в жидких органических средах характеризуются наличием достаточно узких ($\Delta\nu \approx 120 \text{ см}^{-1}$) максимумов в области 1273, 1064, 920, 765, 630 нм. Молярный коэффициент экстинкции для кислорода на длине волны 1273 нм составляет $0.003 \text{ M}^{-1} \text{ см}^{-1}$, а в области 1064 нм еще в ≈ 10 раз меньше. Учитывая низкое значение коэффициента молярной экстинкции такого перехода и относительно низкую плотность мощности воздействующего излучения (3 мВт/см^2) концентрация синглетного кислорода в биологической системе достаточно низка, чтобы вызвать заметное деструктивное действие. Скорее всего, его образование в биологической системе способно играть сигнальную (триггерную) функцию, влияющую на протекание биохимических и физиологических процессов в организме, например, таких как запуск апоптоза. Возможно по этой причине при воздействии излучения $\lambda = 632,8$ и 1064 нм, соответствующего максимумам полос поглощения кислорода, отмечается ингибирование процесса выклева науплий. При сопоставимой дозовой нагрузке излучение с $\lambda = 808; 1176; 1342$ нм, находящееся вдали от максимумов полос поглощения

кислорода в органических растворах, оказывает стимулирующее действие.

Кроме молекулярного кислорода в качестве акцептора оптического излучения ближней инфракрасной области спектра могут выступать также молекулы воды, характеризующиеся наличием выраженных точек экстремумов в указанной области с максимумами при $\lambda = 755; 973; 1200; 1443$ нм и минимумами – при $\lambda = 813; 1070; 1266$ нм.

ОСОБЕННОСТИ ФОТОХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В МОЛЕКУЛАХ БИЛИРУБИНА С УЧАСТИЕМ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ЕГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

**Плавский В.Ю., Третьякова А.И., Плавская Л.Г., Микулич А.В.,
Сташевский А.С., Грабчиков А.С., Ходасевич И.А., Орлович В.А.**

*Институт физики НАН Беларуси,
Минск, Беларусь, v.plavskii@ifanbel.bas-net.by*

Исследование фотохимических процессов в молекулах *Z,Z*-билирубина IX α представляет не только чисто академический интерес, но и имеет высокую практическую значимость в силу их определяющей роли в снижении уровня билирубина при проведении фототерапии у новорожденных детей с синдромом гипербилирубинемии (желтухи). Принято считать, что воздействие света в полосу поглощения пигмента индуцирует протекание трех типов реакций: (а) конфигурационной *цис-транс*-изомеризации; (б) структурной циклизации с образованием водорастворимого люмирубина; (в) окислительных реакций, сопровождающихся накоплением бесцветных продуктов на основе моно- и дипиррольных фрагментов, а также биливердина, образующегося в результате окисления метиленового мостика и характеризующегося протяженной полосой поглощения с максимумом около $\lambda = 660\text{--}750$ нм (в зависимости от типа растворителя). Обычно полагают, что ведущая роль в процессах аутосенсibilизированной фотодеструкции билирубина принадлежит синглетному кислороду, генерацию которого, однако не удавалось зарегистрировать оптическими методами.

В настоящей работе впервые получены данные, свидетельствующие о сенсibilизированной *Z,Z*-билирубином IX α генерации синглетного кислорода в органических растворителях (четырёххлористый углерод), а также в водных растворах в составе комплекса с сывороточным альбу-