

Необходимо отметить, что спиновой ловушке TIRON характерна высокая константа скорости взаимодействия с супероксидными анион-радикалами, сравнимая с супероксиддисмутазой. $\text{CoQ}_{10}\text{-H}_2$ расходуется, вступая в реакцию с супероксидом, и в результате происходит появление и возрастание сигнала ЭПР TIRON в суспензии митохондрий через несколько минут после начала записи спектров (см. рисунок 1 и 2) в зависимости от концентрации вводимого препарата. Следовательно, $\text{CoQ}_{10}\text{-H}_2$ должен иметь сравнимую или даже более высокую константу скорости взаимодействия с супероксидом, чем TIRON.

Полученные результаты позволяют заключить, что в изолированных митохондриях сердца водорастворимая форма убихинола-10 ($\text{CoQ}_{10}\text{-H}_2$) при разных значениях концентрации эффективно взаимодействует с образовавшимися в III комплексе супероксидными радикалами, проявляя антиоксидантный эффект, сравнимый с супероксиддисмутазой.

Работа выполнена при поддержке Государственного контракта № 14411.2049999.19.068 от 20.08.2014 г. и гранта РФФИ 15-04-05211.

Литература

1. Коркина, О.В. Генерация супероксидных радикалов митохондриями сердца: исследование методом спиновых ловушек в условиях непрерывной оксигенации / О.В. Коркина, Э.К. Рууге // Биофизика. – 2000. – Т. 45. – С. 695-699.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН ВОЛН

Залеская Г.А.¹, Ласкина О.В.²

¹*Институт физики им. Б.И. Степанова*

Национальной Академии Наук Беларуси, Минск, Беларусь,

²*Белорусский государственный медуниверситет, Минск, Беларусь*

Среди современных технологий лазерной медицины важное место занимает фотогемотерапия (ФГТ) – внутривенное (ВОК) и надвенное воздействие оптического излучения на кровь. Выбор оптимальных режимов для ФГТ возможен на основе количественных оценок: проникающей способности излучения различных длин волн λ в кровь и кожные

ткани, а также ослабления излучения кожными тканями. Цель настоящей работы – определение спектральных условий, позволяющих обеспечить эффективное образование O_2 в крови при фотодиссоциации оксигемоглобина (оксиHb); анализ физических причин, вызывающих изменения характеристик оксигенации и содержания продуктов метаболизма при ФГТ излучением различных длин волн.

Методы исследования. Для оценок эффективности воздействия оптического излучения с разными λ в условиях многократного рассеяния использовалась модель, в которой зависимость ослабления излучения $I(z)/I_0$ от глубины проникновения в биоткани представлялась как экспоненциальная функция расстояния z от облучаемой поверхности и эффективного коэффициента ослабления излучения $\mu_{эф}$. Эффективность воздействия излучения различных λ на кровь сопоставлялась по количеству молекул кислорода $N(\lambda)$, образовавшихся при фотодиссоциации оксиHb в облучаемом слое крови в единицу времени. С учетом оптических характеристик крови оценивались эффективные спектральные показатели поглощения крови $K_{эф}(\lambda, z)$, в наибольшей степени зависящие от отношения $\mu_a/\mu_{эф}$. При одной и той же интенсивности I_0 и одинаковых исходных биофизических характеристиках крови отношение $K_{эф}(\lambda_1, z)/K_{эф}(\lambda_2)$ показывает, во сколько раз фотодиссоциация оксиHb при поглощении излучения λ_1 окажется эффективнее, чем при λ_2 .

Влияние курсов: НЛОК ($\lambda=670$ нм, 780 нм 20 мВт, $t=20$ мин, 7 ежедневных процедур, аппарат «Родник», Беларусь) и ВЛОК ($\lambda=632,8$ нм, 670 нм, 2 мВт на выходе световода, $t=20-30$ мин, 10 процедур) на характеристики оксигенации и продукты метаболизма оценивалось по результатам измерений образцов крови пациентов ($n=40$ при НЛОК, $n=25$ при ВЛОК) до и после окончания курса на приборе ABL-800 (Radiometer, Дания).

Результаты и обсуждение. Анализ спектров глубин проникновения излучения в кровь $\sigma_{кр}$ и кожные ткани $\sigma_{кж}$, рассчитанных с оптическими характеристиками (μ_a , μ_s , g), типичными для биотканей человека, показал, что для крови величина $\sigma_{кр}$ возрастает от нескольких мкм при $\lambda=405$ нм до 1,4 мм при продвижении в длинноволновую область до 950 нм. При ВОК оптическое излучение наиболее эффективно в интервале 406–574 нм, в пределах которого величины $K_{эф}(\lambda_1, z)$ изменяются незначительно. При продвижении в длинноволновую область эффективность ВОК снижается, уменьшаясь на традиционно используемых длинах волн: ВОК–630 нм в 1,5 и ВОК–670 нм в 2 раза по сравнению с ВОК–406 нм, но не в 116 и 184 раза, как это следует из сравнения коэффициентов поглощения крови μ_a на этих длинах волн. Из-за больших ве-

личин $\sigma_{кр}$ излучение 630 нм и 670 нм более равномерно освещает кровь в вене, снижая возможность отрицательных пристеночных эффектов. Сделан вывод, что невозможно выбрать λ , пригодную для оптимального увеличения O_2 в облучаемой крови только на основании значений μ_a .

Показано, почему оптическое излучение с $\lambda=405-416$ нм не пригодно для НОК: проникает только в поверхностные слои кожных тканей, малая доля излучения $\lambda=416$ нм (2 %) и $\lambda=470$ нм (30 %) достигает крови в вене. Наиболее эффективно для НЛОК и НОК излучение диапазона от 670 нм до 950 нм, обеспечивающее достаточную глубину проникновения (6–8 мм) и интенсивность у поверхности вены $I(z)=60-80$ %.

Установлено, что практически важной для клинического применения особенностью воздействия оптического излучения разных λ на кровь является достаточно высокая степень фотодиссоциации оксиHb эритроцитов излучением широкого диапазона длин волн, в том числе красного и ближнего ИК диапазонов, для которых в растворах гемоглобина предсказывалось сильное падение квантового выхода фотодиссоциации оксиHb. Сопоставимые результаты фотодиссоциации в диапазоне от 450 нм до 950 нм были получены как при облучении крови в крупных кровеносных сосудах, так и при облучении кожных тканей. Установлено, что для обоих методов изменения степени насыщения артериальной крови составляли $\Delta S_aO_2=2-6$ %, а венозной ΔS_vO_2 достигали 20–30 %.

Важной особенностью ФГТ, которую необходимо учитывать при анализе результатов, полученных с разными λ , является зависимость эффективности воздействия от исходных значений S_vO_2 . На примере изменений содержания оксиHb после курсов НЛОК показано, что зависимость индивидуальных изменений его концентрации (ΔF_vHbO_2) от исходных значений S_vO_2 коррелируют с зависимостью величина μ_a от S_vO_2 . Как ΔF_vHbO_2 , так и μ_a изменяются с ростом величины S_vO_2 однонаправлено, убывая с увеличением S_vO_2 . Отмечается, что многочисленные сообщения об отсутствии терапевтической реакции на ФГТ у пациентов с нормальными, высокими значениями S_vO_2 могут быть обусловлены зависимостью μ_a (S_vO_2).

По продуктам метаболизма в большинстве медицинских применений определяется эффективность фототерапии. Поэтому особый интерес представляют их фотоиндуцированные изменения при разных λ . Сопоставление зависимостей от исходных значений S_vO_2 концентрации глюкозы и холестерина и зависимости $\mu_a(S_vO_2)$, подтверждает влияние количества поглощенного кровью излучения на метаболические процессы. Подобные, но количественно отличающиеся результаты получены для

продуктов метаболизма при УФОК ($\lambda=254$ нм), ВЛОК ($\lambda=632,8$ нм, 670 нм), НЛОК ($\lambda=670$ нм, 780 нм).

Успешное терапевтическое использование технологий ФГТ предполагает также учет динамики показателей кислородного статуса венозной и артериальной крови. Надежные результаты по влиянию ФГТ с различными λ получены для образцов крови, отобранных в одинаковые фиксированные моменты времени.

Выводы. Оценки оптимальных спектральных условий для ФГТ излучением $\lambda=405-950$ нм показали, что наибольшее увеличение содержания O_2 в крови при ВОК может быть получено для $\lambda=405-570$ нм, затем эффективность ВОК снижается для $\lambda>630$ нм. Однако уменьшение эффективности ВОК происходит значительно медленнее, чем снижение коэффициента поглощения крови μ_a с ростом λ ; поэтому необходимы оценки поглощенной энергии в облучаемом слое крови с учетом μ_a , μ_s и g . Показано, почему наиболее эффективным для НЛОК и НОК является излучение от 670 нм до 950 нм, обеспечивающее достаточные как глубину проникновения, так и интенсивность излучения, достигшую вены.

Установлено, что фотодиссоциация оксигемоглобина способствует дополнительному экстрагированию O_2 из крови при ФГТ. Воздействие оптического излучения с различными λ , увеличивая содержание O_2 в крови, приводит как к генерализованной реакции организма, так и к стимуляции разнообразных местных терапевтических эффектов: снижению гипоксии тканей с увеличением S_vO_2 до 20–30 %, активации процессов метаболизма. Фотоиндуцированные изменения, как характеристик оксигенации, так и продуктов метаболизма связаны с исходным значением S_vO_2 , которой определяется коэффициент поглощения крови.