

ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОКСИГЕНАЦИИ КРОВИ ПРИ ФОТОГЕМОТЕРАПИИ

Залесская Г.А.

Институт физики имени Б.И.Степанова НАН Беларуси,
пр. Независимости, 68, г. Минск, 22072 Беларусь,
тел.: +375 (017) 284-16-51, e-mail: zaleskaya@imaph.bas-net.by

Показано, что при фототерапии поглощенное кровью низкоинтенсивное оптическое излучение вызывает обратимый процесс фотодиссоциации комплексов гемоглобина с лигандами и изменение степени насыщения гемоглобина кислородом, а также парциальных давлений газов крови: O_2 и CO_2 . Наблюдаемые эффекты имеют нетепловую природу. Показатели оксигенации крови пациентов во время и после окончания курса фототерапии могут быть как ниже, так и выше исходных значений, в зависимости от резервных возможностей организма. Сделан вывод, что фототерапия влияет на кислородозависимые процессы. Биомедицинские эффекты низкоинтенсивного оптического излучения обусловлены его влиянием на содержание активных форм кислорода в клетках и последующее развитие свободнорадикальных реакций. Фототерапию следует рассматривать как метод, регулирующий баланс между образованием активных форм кислорода и их ингибированием антиоксидантами. Этот механизм является общим при лечении различных заболеваний.

Ключевые слова: фототерапия, внутривенное и надвенное облучение крови, степень насыщения гемоглобина кислородом, сродство гемоглобина к кислороду, содержание кислорода в крови, активные формы кислорода.

Введение

Медицинские технологии, основанные на применении низкоинтенсивного оптического излучения (НИОИ), успешно развивались на протяжении XX ст. Анализ данных многочисленных экспериментальных и клинических исследований показывает, что включение фототерапии в комплексное лечение пациентов позволяет сократить длительность лечения, уменьшить дозировку медикаментов и риск медикаментозных осложнений. Медицинские технологии, основанные на ее применении, обладают сравнительной дешевизной и простотой; отсутствует эффект привыкания к НИОИ как к лечебному фактору [10].

Однако, несмотря на несомненные успехи, до настоящего времени сфера применения НИОИ в терапии расширялась главным образом эмпирическим путем. Его широкое внедрение в медицинскую практику сдерживается отсутствием общепринятых представлений о первичных молекулярных механизмах действия света, которые далеко не полностью раскрыты и поняты. Предлагавшиеся механизмы биостимуляции, базировавшиеся на анализе разнообразных про-

дуктов вторичных реакций, получаемых при облучении *in vitro* культур клеток и тканей, или при биостимуляции пациентов, остаются гипотезами, неспособными объяснить многие экспериментальные факты.

Оказалось невозможным предсказать индивидуальную вариабельность эффектов фототерапии (ФГТ) живого организма на основании процессов, выявленных в культурах клеток и изолированных тканях. В ряде работ было показано, что стандартный метод ФГТ с фиксированными дозами светового воздействия вызывает у некоторых пациентов неадекватные, непредсказуемые реакции. Так, согласно данным [11], положительная реакция на процедуру внутривенного лазерного облучения крови (ВЛОК) наблюдалась лишь у 45% пациентов, а отрицательная, возможно, обусловленная передозировкой, – у 35%. Научное объяснение положительных и отрицательных результатов лечения отсутствует. Остаются нерешенными и такие актуальные проблемы фототерапии, как разработка способов оценки ее эффективности для отдельных пациентов, методов стандартизации и контроля.

Целью настоящей работы было комплексное, способствующее углублению представлений о механизмах действия НИОИ, изучение изменений при ФГТ следующих показателей оксигенации крови: (а) степени насыщения крови кислородом $SO_2 = \{[\text{HbO}_2]/[\text{HbO}_2] + [\text{Hb}] + [\text{MetHb}] + [\text{HbCO}]\} \cdot 100$, где в квадратных скобках представлены концентрации оксигемоглобина $[\text{HbO}_2]$, деоксигемоглобина $[\text{Hb}]$, метгемоглобина $[\text{MetHb}]$ и карбоксигемоглобина $[\text{HbCO}]$; (б) парциального давления кислорода p_{50} , при котором происходит 50% насыщение крови кислородом; (в) содержания кислорода в артериальной $ct_a O_2 = \text{Hb} \cdot 1,39 (S_a O_2/100) + pO_2 \cdot 0,0031$ и венозной крови $ct_v O_2 = \text{Hb} \cdot 1,39 (S_v O_2/100) + pO_2 \cdot 0,0031$, где Hb - концентрация гемоглобина, 1,39 - константа, показывающая, что 1 г Hb присоединяет к себе 1,39 мл O_2 , 0,0031 - коэффициент растворения кислорода в плазме крови.

Методы исследования

Для комплексного лечения больных с сердечно-сосудистыми заболеваниями применялись два метода ФГТ: надвенное лазерное облучение крови (НЛОК) или экстракорпоральное ультрафиолетовое облучение крови (УФОК). Курс НЛОК (аппарат «Родник», Беларусь, длина волны излучения $\lambda=670$ нм, плотность мощности 0,25 Вт/см², длительность облучения 20 мин.) состоял из 7 ежедневных процедур. Курс экстракорпорального УФОК с применением ртутной лампы (аппарат «Надежда», Россия, длина волны излучения 254 нм, плотность мощности на поверхности кюветы 1,5 мВт/см², доза $D \cong 0.06$ Дж/см²) включал 5 процедур, по одной в день в течение 5 суток. В процессе УФОК кровь, протекавшая через кварцевую кювету емкостью 3 мл, облучалась в течение 20 мин, а затем весь объем забираемой крови (порядка 1–1.5 мл на 1 кг веса пациента) возвращался больному. При УФОК и при НЛОК обследовались группы из 40 пациентов с острым коронарным синдромом, из них при использовании каждого из методов облучения 10 составляли контрольную группу.

Анализировались стабилизированные гепарином образцы крови больных, отобранные перед процедурой и после курса ФГТ. Для отдельных пациентов измерения производились после каждой процедуры. При помощи прибора ABL 800 FLEX (Дания) определяли содержание газов крови (pO_2 , pCO_2), концентрацию общего гемоглобина, содержание фракций гемоглобина и степень насыщения гемоглобина кислородом, концентрации продуктов метаболизма: глюкозы, лактата,

мочевины, билирубина. Концентрация холестерина определялась на биохимическом анализаторе (ФП-901, Labsystems). Характеристики свертываемости крови определялись при помощи автоматического анализатора (STA-Compact, ROCH-Diagnostics, Германия). Выполнялся статистический анализ данных, полученных в процессе исследования.

Результаты исследования

У обследованных больных сердечно-сосудистыми заболеваниями исходные характеристики оксигенации венозной крови сильно отличались от нормальных показателей и носили индивидуальный характер. В большинстве случаев были снижены концентрация оксигемоглобина $F_v(\text{HbO}_2)$ ($15\% < F_v(\text{HbO}_2) < 70\%$) и степень насыщения гемоглобина венозной крови кислородом $S_v O_2$ ($15\% < S_v O_2 < 70\%$). В результате при сохранившейся в нормальных пределах или повышенной концентрации гемоглобина уменьшилась кислородная емкость венозной крови $ct_v O_2$, в наибольшей мере зависящая от величины SO_2 . У больных обследуемой группы вырастала кислородная задолженность тканям. Потребление кислорода $\Pi_{O_2} = AVPO_2 \cdot CB$ превышало доставку кислорода артериальной кровью $D_{O_2} = ct_a O_2 \cdot CB$, вызывая растрату венозных запасов кислорода в организме; здесь CB - сердечный выброс, а $AVPO_2 = (ct_a O_2 - ct_v O_2)$ - артериовенозная разность в содержании кислорода, характеризующая максимальное количество кислорода, которое может транспортировать кровь.

Ниже приводятся результаты, полученные при изучении влияния терапевтических доз НИОИ с различной длиной волны, поглощаемых кровью, на характеристики оксигенации у пациентов с разной степенью нарушения кислородного обмена.

При измерениях степени насыщения венозной крови кислородом $S_v O_2$ было установлено, что ее низкие значения у некоторых пациентов нормализовались во время ФГТ, но в ряде случаев в период облучения они достигали значений, типичных для артериальной крови. У таких пациентов воздействие НИОИ на кровь инициировало отрицательный эффект – артериализацию венозной крови с повышением $S_v O_2$ до значений, близких к артериальным.

У большинства (81%) пациентов обследуемой группы ($n = 30$) в образцах венозной крови, отобранной через 15 мин. и позднее после окончания последней процедуры УФОК, уменьшились как содержание оксигемоглобина $F_v(\text{HbO}_2)$, так и степень насыщения гемоглобина O_2 (рис. 1, а).

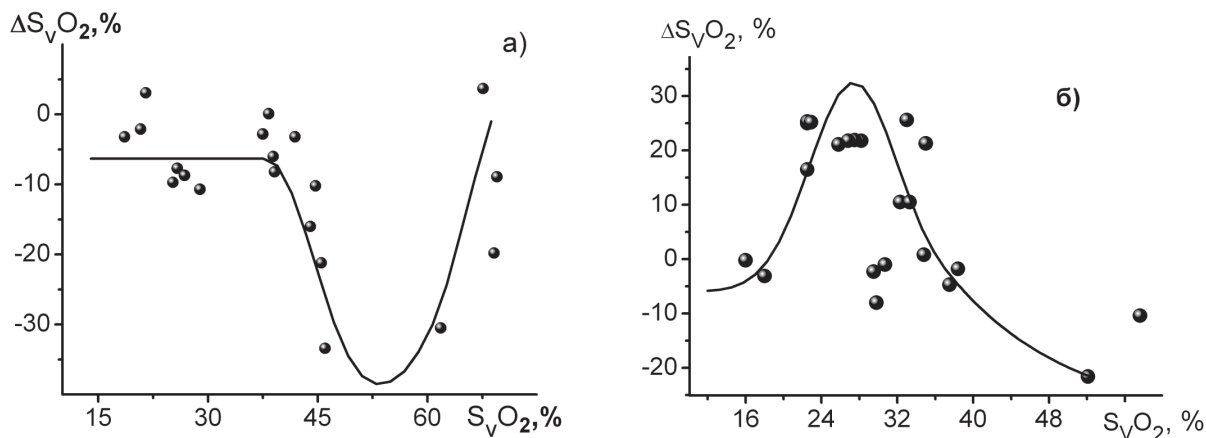


Рис. 1. Зависимости изменения степени насыщения гемоглобина венозной крови кислородом ΔS_{vO_2} под влиянием УФОК (а) и НЛОК (б) от исходных значений S_{vO_2} . Каждая точка на рисунке соответствует измерениям, выполненным для одного пациента

Среднее по группе значение этих величин снизилось под влиянием УФОК от 42% до 33,4%.

При НЛОК у группы пациентов ($n = 30$) с исходными степенями насыщения гемоглобина кислородом S_{vO_2} , попадающими в интервал $15\% < S_{vO_2} < 35\%$, значения S_{vO_2} после окончания курса были выше исходных (рис. 1, б), средние величины $F_v(\text{HbO}_2)$ и S_{vO_2} повысились от 30,7% до 36,7%. Следует отметить, что величина S_{vO_2} возрастала под влиянием курса НЛОК при таких исходных значениях, при которых влияние УФОК еще не проявлялось.

Анализ индивидуальных изменений ΔS_{vO_2} степени насыщения гемоглобина кислородом показал, что при одной и той же дозе используемого при ФГТ излучения эти величины отличались для разных пациентов и зависели от исходных значений S_{vO_2} (рис. 1); снижение S_{vO_2} после процедуры оценивалось как отрицательное значение ΔS_{vO_2} . Как следует из приведенных на рис. 1 данных, наибольшие изменения ΔS_{vO_2} достигались у пациентов с исходными значениями S_{vO_2} , попадающими в сравнительно узкий интервал. Применение НЛОК для лечения больных с различными сердечно-сосудистыми заболеваниями показало, что у пациентов с прогрессирующей стенокардией был получен достоверный рост S_{vO_2} на фоне достаточно низких исходных значений этой величины.

Выявленные в процессе исследований изменения парциального давления кислорода крови p_{vO_2} и степени насыщения гемоглобина кислородом под влиянием ФГТ больных с сердечно-сосудистыми заболеваниями позволили проанализировать влияние ФГТ на сродство гемоглобина к кислороду по изменениям положения рассчитанной по уравнению Хилла кривой диссоциации

оксигемоглобина (КДО), которая отражает зависимость SO_2 от pO_2 . За показатель сродства гемоглобина к кислороду принимается парциальное давление pO_2 , при котором SO_2 достигает 50% и гемоглобин наполовину насыщается O_2 ($p50$). Сродство гемоглобина к кислороду – важная характеристика транспорта последнего, зависящая от многих факторов, в том числе физических. Снижение сродства гемоглобина к кислороду, при котором КДО сдвигается вправо, играет важную роль в компенсации гипоксии как эффективный способ улучшения отдачи кислорода кровью в тканевых капиллярах, не требующий затрат энергии. Сигмоидальная форма КДО обеспечивает существенное изменение парциального давления кислорода при небольших колебаниях $p50$.

Показано, что одни и те же дозы поглощенной энергии НИОИ при ФГТ у разных пациентов вызывали отличающиеся изменения сродства гемоглобина к кислороду, зависевшие от исходного значения S_{vO_2} в венозной крови (рис. 2). Относительные изменения $p50$, зависевшие от исходного сродства гемоглобина венозной крови пациентов, находились в интервалах $-20\% < \Delta p50/p50 < 15\%$ при УФОК и $-15 < \Delta p50/p50 < 17\%$ при НЛОК. Однако средние величины $p50$ по обеим группам пациентов, изменявшиеся не более чем на 1-1,5%, оказались малоинформативными.

Характерной особенностью светового воздействия на кровь были обратимые изменения положения КДО в течение курса ФГТ, которые позволяют реализовать резервные свойства гемоглобина. При снижении сродства КДО после проведенной процедуры облучения смещается вправо по отношению к нормальному положению. Отделение кислорода в комплексах гемоглобина с лигандами и отдача кислорода кровью в тка-

невых капиллярах улучшаются. Однако в ряде случаев к началу следующего сеанса ФГТ кривая КДО сдвигалась влево, приближаясь к положению до начала курса облучения (рис. 2), сродство гемоглобина к кислороду повышалось.

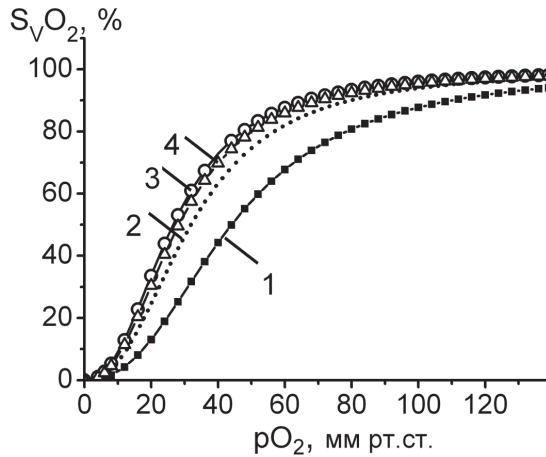


Рис.2. Кривые диссоциации оксигемоглобина (КДО) для двух пациентов. Пациент 1: до УФОК – $p_vO_2 = 19,8$ мм рт. ст., $S_vO_2 = 32,3\%$ (КДО 1); после УФОК $p_vO_2 = 24,1$ мм рт. ст., $S_vO_2 = 44,2\%$ (КДО 3). Пациент 2: до УФОК - $p_vO_2 = 26,5$ мм рт. ст., $S_vO_2 = 39,1\%$ (КДО 2); после УФОК - $p_vO_2 = 20,2$ мм рт. ст., $S_vO_2 = 30,9\%$ (КДО 4)

Представленные на рис. 3 изменения $\Delta p50$, где $\Delta p50 = p50$ (после курса ФГТ) – $p50$ (до лечения) под влиянием УФОК и НЛОК отображают характерное для ФГТ нормализующее влияние облучения венозной крови на различные показатели, в том числе на сродство гемоглобина к O_2 . При низких исходных значениях $p50$ его уровень повышал-

ся и сродство гемоглобина к O_2 снижалось, а при высоких $p50$ под влиянием облучения крови происходили противоположные изменения $p50$.

Показано, что для больных с сердечно-сосудистыми заболеваниями характерно не только уменьшение степени насыщения венозной крови кислородом S_vO_2 и содержания кислорода в венозной крови, но и увеличение артериовенозной разности (АВРО₂) в содержании кислорода (рис. 4).

У группы пациентов, в лечение которых включалось УФОК, до проведения ФГТ парциальное давление O_2 в венозной крови не выходило за пределы интервала $16 < p_vO_2 < 34$ мм рт. ст. и в среднем составляло 24,5 мм рт. ст., что значительно меньше нормального показателя $37 < p_vO_2 < 42$ мм рт. ст. Степень насыщения гемоглобина венозной крови кислородом S_vO_2 находилась в интервале $18,6 < S_vO_2 < 69\%$ при среднем значении 42% (нормальный показатель $60 < S_vO_2 < 70\%$). Пульсоксиметрическим методом было установлено небольшое снижение степени насыщения артериальной крови кислородом S_aO_2 . Она снижалась незначительно (до 92 %) по сравнению с нормой ($96 < S_aO_2 < 98\%$). У больных этой группы среднее значение АВРО₂ составило 10,6 об.%, то есть было увеличено по сравнению с нормой ($5 < АВРО_2 < 6$ об.%).

Аналогичный характер показателей кислородного обмена имел место и у больных, в комплексное лечение которых включалось НЛОК. До начала курса ФГТ степень насыщения гемоглобина венозной крови кислородом варьировала у отдельных пациентов в интервале $18,0 < S_vO_2 < 58,6\%$ при среднем по группе значении 30,7%;

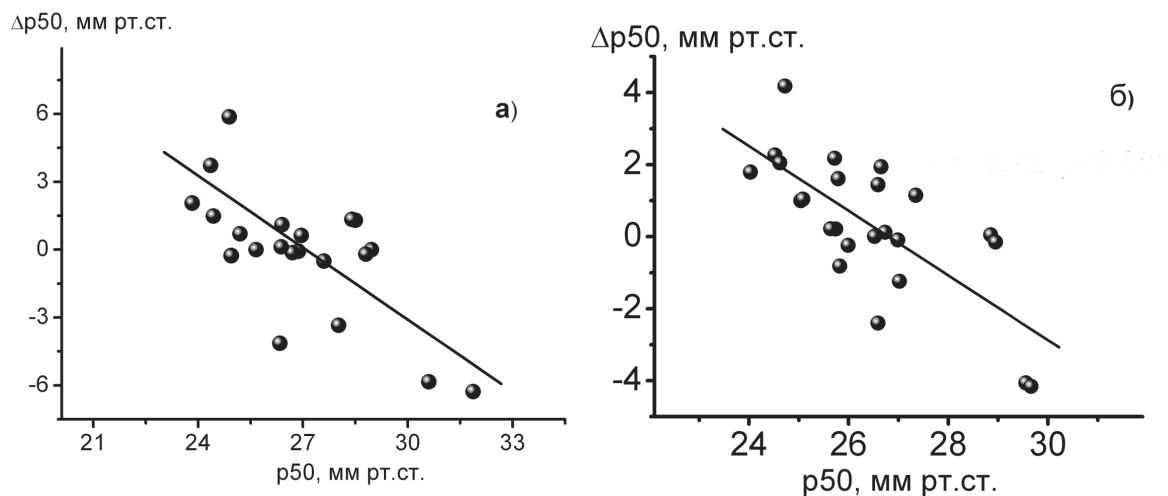


Рис. 3. Зависимости изменения сродства гемоглобина к кислороду ($\Delta p50$) в венозной крови после окончания курсов УФОК (а) (коэффициент обратной линейной корреляции Пирсона $r = -0,68$ при $p < 0,001$) и НЛОК (б) (коэффициент обратной линейной корреляции Пирсона $r = -0,72$ при $p < 0,001$) от исходной величины ($p50$) в венозной крови отдельных пациентов

парциальное давление кислорода изменялось в пределах $16 < p_{O_2} < 27$ мм рт. ст. при среднем значении $\bar{p}_{O_2} = 19$ мм рт. ст. Парциальное давление

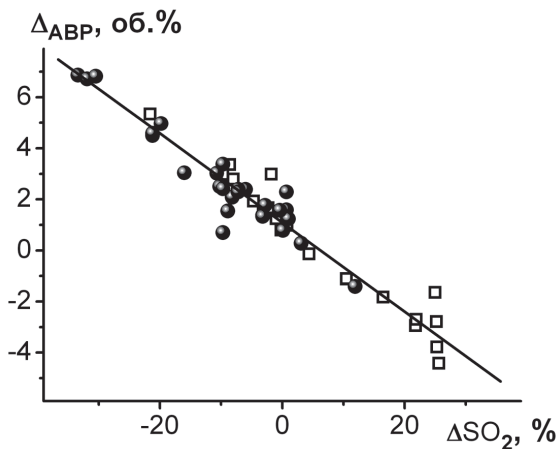


Рис. 4. Зависимость изменений $\Delta_{ABR} O_2$ под влиянием УФОК (●) и НЛОК (□) от фотоиндуцированных изменений степени насыщения венозной крови кислородом у больных с ССЗ. Каждая точка на рисунке соответствует данным для одного пациента. Коэффициент обратной линейной корреляции Пирсона $r = -0,97$ при $p < 0,001$

CO_2 оставалось близким к норме (среднее по группе значение $\bar{p}_{CO_2} = 49,5$ мм рт. ст.).

После курса ФГТ в обеих группах больных получены небольшие изменения средних по группе парциальных давлений кислорода в венозной крови: $\bar{p}_{vO_2} = 19$ мм рт. ст. (до) и $24,3$ мм рт. ст. (после НЛОК) и $\bar{p}_{vO_2} = 24,5$ мм рт. ст. (до) и $25,4$ мм рт. ст. (после УФОК). Среднее значение степени насыщения венозной крови кислородом \bar{S}_{vO_2} увеличилось под влиянием НЛОК от $30,7\%$ до $36,7\%$, но несколько снизилось под влиянием УФОК (от 42% до $34,6\%$). Значения pH и p_{CO_2} оставались в пределах нормы. В результате после облучения уменьшалась кислородная емкость венозной крови st_{vO_2} , в наибольшей мере зависящая от величины S_{vO_2} . При терапевтических дозах НИОИ перераспределение между фракциями гемоглобина, наблюдавшееся после облучения крови, не отражалось на общей концентрации гемоглобина, которая, как правило, сохранялась неизменной.

Увеличение значений S_aO_2 , измеренных непосредственно после окончания курса УФОК и НЛОК, для разных пациентов составляло $\Delta S_aO_2 = 2-4\%$ (от 96% до $98-100\%$). С увеличением S_aO_2 при постоянной концентрации гемоглобина возрастала доля $F_a(HbO_2)$ и содержание кислорода в артериальной крови st_aO_2 . При сохранявшейся в норме после обоих видов ФГТ концентрации

гемоглобина средняя по группе величина $ABPO_2$ практически не изменилась под влиянием НЛОК ($11,9$ объемных % до процедуры и 12% после), но под влиянием используемой дозы УФОК $ABPO_2$ возросла от $10,2$ объемных % (до УФОК) до $12,5\%$ (после), демонстрируя дополнительное, негативное отклонение от нормального уровня $ABPO_2$ ($5-6$ объемных %). Как было показано выше, в обследуемых группах больных как УФОК, так и НЛОК инициировали у отдельных пациентов отличающиеся по величине и даже разнонаправленные изменения показателей оксигенации и газового обмена в венозной крови. В результате артериовенозное различие по содержанию кислорода ($ABPO_2$) также изменялось под влиянием ФГТ по разному у каждого из пациентов с ОКС и зависело от изменений S_{vO_2} (рис. 4).

Обсуждение результатов

Совокупность результатов, полученных нами при исследованиях спектральных проявлений фотохимических реакций, инициируемых в крови пациентов при ФГТ [7, 9]; влияния ФГТ на газовый состав крови пациентов [4], на степень насыщения гемоглобина кислородом, на содержание продуктов метаболизма в крови отдельных пациентов [3, 5], на параметры эритроцитов позволила сформулировать основные представления о механизмах действия ФГТ, изложенные в работах [1, 6, 7, 8].

Преобразование поглощенной кровью энергии НИОИ протекает как обратимый процесс диссоциации комплексов гемоглобина с лигандами с изменением характеристик оксигенации венозной крови: степени насыщения гемоглобина кислородом S_{vO_2} , содержания оксигемоглобина $F_v(HbO_2)$, парциального давления кислорода p_{vO_2} . НИОИ, используемое при ФГТ, поглощается гемоглобином, который является основным фотоакцептором.

Изменение S_{vO_2} , инициированное поглощением терапевтических доз излучения при ФГТ (НЛОК, УФОК), проявляется в изменениях электронных спектров поглощения крови, а конформационные изменения структуры комплексов гемоглобина с лигандами - в инфракрасных спектрах поглощения крови и эритроцитарной массы.

Результаты, представленные в настоящей работе, расширяют и дополняют наши представления о механизмах действия НИОИ на кровь, облучаемую *in vivo*, и позволяют сделать ряд новых выводов.

1. Впервые установлено, что ФГТ оказывает избирательное действие на изменения показателей оксигенации отдельных пациентов (S_{vO_2} , $F_v(HbO_2)$, p_{vO_2} , p_{vCO_2}) в зависимости от исходных

значений S_vO_2 . Поэтому наряду с использованием традиционных оценок средних величин по группе пациентов представляется важным анализ причин, обуславливающих индивидуальную вариабельность изменений исследуемых показателей под влиянием ФГТ.

2. Установлены отличия в закономерностях оксигенации крови во время процедур ФГТ и после окончания курса. У пациентов с исходно сниженными показателями оксигенации последние увеличивались во время каждой из процедур ФГТ, но затем снижались к началу следующей процедуры. Показатели отдельных пациентов, достигнутые к окончанию курса, были как ниже, так и выше исходных, демонстрируя зависимость от резервных возможностей организма, обуславливающих нормализацию кислородного обмена.

3. Важное значение при лечении сердечно-сосудистых заболеваний имеет выявленная возможность корректировать методами ФГТ агрегационные характеристики крови. Оптическое излучение по-разному влияло на показатели свертываемости крови отдельных пациентов: на активированное частичное тромбопластиновое время (рис. 5), тромбиновое время и др. Изменения

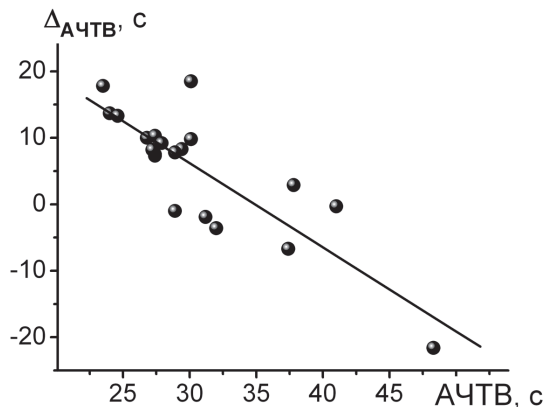


Рис. 5. Зависимость индивидуальных изменений активированного частичного тромбопластинового времени (АЧТВ) в венозной крови после окончания курса НЛОК от его исходной величины у разных пациентов. Коэффициент обратной линейной корреляции Пирсона $r = -0,84$ при $p < 0,001$.

этих показателей зависели от их исходных значений, увеличиваясь при низком исходном уровне и снижаясь при высоком. Возможность корректировать агрегационные характеристики крови и, следовательно, общее периферическое сопротивление сосудистой сети может способствовать решению одной из ключевых проблем сердечно-сосудистой патологии.

4. Другой характерной особенностью ФГТ является коррекция метаболических нарушений,

проявляющихся у больных с острым коронарным синдромом. До начала лечения стойкая гиперлипидемия наблюдалась у 55% отобранных больных. Для обследуемой группы пациентов было установлено, что изменения характеристик кислородного обмена сопровождались изменениями содержания продуктов метаболизма: глюкозы, лактата, общего холестерина, холестерина липопротеинов низкой плотности, триглицеридов [3, 5]. Так, под влиянием пятидневного курса УФОК средняя по группе концентрация общего холестерина снизилась на 10%, а наиболее атерогенного холестерина липопротеинов низкой плотности – на 9%, а после курса НЛОК соответствующие концентрации снизились на 12,3% и 14,4%. Направление и величина метаболических сдвигов зависели от двух величин: исходной концентрации продуктов метаболизма в крови пациентов (концентрации снижались при высоких исходных уровнях и, напротив, повышались при низких), а также от фотоиндуцированных изменений степени насыщения гемоглобина кислородом.

Поскольку гипотеза о том, что локальный нагрев крови и тканей в зоне поглощения НИОИ может служить пусковым механизмом биостимуляции, активно обсуждается до настоящего времени [12], нами выполнены оценки максимальных температур нагрева биотканей при использованных для ФГТ режимах облучения. Оценки проводились методами компьютерного моделирования радиационно-тепловых полей с учетом характеристик лазерного излучения, оптических и теплофизических характеристик биотканей: аналогично работе [2] решалась система уравнений, описывающих поглощение и рассеяние фотонов в плоской трехслойной ткани, включающей кровеносный сосуд. Результаты моделирования показали, что максимальный нагрев крови не превысил бы 1-2°C даже без учета ее течения в вене. Это доказывает, что наблюдаемые при ФГТ эффекты имеют нетепловую природу, и термодиссоциация оксигемоглобина отсутствует.

Выводы

На основании полученных результатов можно утверждать, что ФГТ, оказывая влияние на кислородозависимые процессы, инициирует изменения кислород-транспортной функции крови и сродства гемоглобина к кислороду, облегчая отделение кислорода в комплексах гемоглобина с лигандами. В основе механизма терапевтического воздействия НИОИ на кровь лежат фотопревращения комплексов гемоглобина с лигандами, нормализующие баланс между образованием активных форм кислорода и их ингибированием антиоксидантными системами. Тем самым при

ФГТ создаются условия для нормализации внутриклеточного содержания активных форм кислорода. Регуляция процессов их образования в клетках и последующего развития свободнора-

дикальных реакций обуславливает единый механизм биостимуляции НИОИ, поглощаемым кровью, применительно ко всем патологиям.

Литература

1. Залеская Г.А. Фотомодификация крови *in vivo* терапевтическими дозами оптического излучения: зависимость от индивидуальных параметров оксигенации крови пациентов // Биомедицинская радиоэлектроника.- 2012.- №8.- С.11-19.
2. Залеская Г.А. Антимикробная фотодинамическая терапия: воздействие лазерного излучения на слизистую ткань, содержащую фотосенсибилизатор метиленовый синий / Г.А.Залеская, Л.Г.Астафьева, В.Ю.Плавский // Оптика и спектроскопия.- 2012.- Т.112, №4.- С.697-702.
3. Залеская Г.А. Влияние облучения крови *in vivo* терапевтическими дозами оптического излучения на метаболические процессы / Г.А.Залеская, О.В.Ласкина // Журнал прикладной спектроскопии.- 2013.- Т.80, №1.- С.115-120.
4. Залеская Г.А. Влияние терапевтических доз оптического излучения на газовый состав венозной крови / Г.А.Залеская, О.В.Ласкина // Журнал прикладной спектроскопии.- 2013.- Т.80, №2.- С.273-278.
5. Залеская Г.А. Влияние экстракорпорального ультрафиолетового облучения крови на липидный обмен у больных с острым коронарным синдромом / Г.А.Залеская, О.В.Ласкина, Н.П.Митьковская, В.В.Кирковский // Биомедицинская радиоэлектроника.- 2011.- № 12.- С.3-10.
6. Залеская Г.А. Влияние терапевтических доз ультрафиолетового облучения крови *in vivo* на спектры флуоресценции плазмы / Г.А.Залеская, Т.О.Маслова // Журнал прикладной спектроскопии.- 2010.- Т.77, №4.- С.618-626.
7. Залеская Г.А. Взаимодействие низкоинтенсивного лазерного излучения с кровью и ее компонентами / Г.А.Залеская, Е.Г.Самбор // Журнал прикладной спектроскопии.- 2005.- Т.72, №2.- С.230-235.
8. Залеская Г.А. Молекулярные механизмы действия фототерапии / Г.А.Залеская, В.С.Улащик // Журнал прикладной спектроскопии.- 2009.- Т.76, № 1.- С.51-75.
9. Залеская Г.А. Спектральные характеристики крови, облучаемой *in vivo* терапевтическими дозами ультрафиолетового излучения / Г.А.Залеская, В.С.Улащик, И.И.Калоша // Оптика и спектроскопия.- 2009.- Т.107, №4.- С.695-702.
10. Карандашов В.И. Фототерапия (светолечение): Руководство для врачей / В.И.Карандашов, Е.Б.Петухов, В.С.Зродников; под ред. Н.Р. Палеева.- М.: Медицина, 2001.- 392 с.
11. Малиновский Е.Л. Новые подходы при лазерной терапии первичной артериальной гипертензии / Е.Л.Малиновский, Н.П. Елисеев //Российский вестник фотобиологии и фотомедицины.- 2010.- №2.- С.60-72.
12. Москвин С.В. Лазерная терапия в дерматологии: вителиго.- М.: Техника, 2003.- 125 с.

ALTERATIONS OF BLOOD OXYGENATION PARAMETERS AT PHOTOHEMOTHERAPY

Zalenskaya G.A.

B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Nezavisimosti Av. 68, Minsk, 220072, Belarus
phone : 375 (017) 284-16-51 , e - mail : zalenskaya@imaph.bas-net.by

It was shown that photohemotherapy initiated the reversible photodissociation process of hemoglobin complexes inducing the alterations of degree of hemoglobin oxygenation and blood gas composition (especially the partial pressure of oxygen). It was established the difference between the blood oxygenation during the photohemotherapy procedure and after the treatment course. In the individual patients with initial reduced oxygenation parameters they increased during procedures but decreased by the end of the course. The conclusion was made that photohemotherapy influenced on oxygen depending processes. The biomedical effects are generated by the activation of molecular oxygen to oxygen reactive species that initiate a cascade of molecular reactions, resulting in the observed therapeutic effects. Photohemotherapy should be considered as a method that regulates (provided that a dosage is correct) the balance between the production of oxygen reactive species and their inhibition by antioxidants. This mechanism is common in treatment of different diseases.

Keywords: *photohemotherapy, intravenous and transcutaneous blood irradiation, degree of hemoglobin oxygenation, affinity of hemoglobin for oxygen, the oxygen content in the blood, oxygen reactive species.*

ЗМІНА ПОКАЗНИКІВ ОКСИГЕНАЦІЇ КРОВІ ПРИ ФОТОГЕМОТЕРАПІЇ

Залеська Г.А.

*Інститут фізики імені Б.І.Степанова НАН Білорусі,
пр. Незалежності, 68, м. Мінськ, 22072 Білорусь,
тел. : 375 (017) 284-16-51, e-mail : zaleskaya@imaph.bas-net.by*

Показано, що при фотогемотерапії поглинене кров'ю низькоінтенсивне оптичне випромінювання викликає оборотний процес фотодиссоціації комплексів гемоглобіну з лігандами і зміну ступеня насичення гемоглобіну киснем, а також парціальних тисків газів крові: O_2 і CO_2 . Спостережувані ефекти мають нетеплову природу. Показники оксигенації крові пацієнтів під час і після закінчення курсу фотогемотерапії можуть бути як нижче, так і вище вихідних значень, залежно від резервних можливостей організму. Зроблено висновок, що фотогемотерапія впливає на кісnezалежні процеси. Біомедичні ефекти низькоінтенсивного оптичного випромінювання обумовлені його впливом на вміст активних форм кисню в клітинах і подальший розвиток вільнорадикальних реакцій. Фотогемотерапію слід розглядати як метод, що регулює баланс між утворенням активних форм кисню і їх інгібуванням антиоксидантами. Цей механізм є загальним при лікуванні різних захворювань.

Ключові слова: фотогемотерапія, внутрішньовенне і надвенне опромінення крові, ступінь насичення гемоглобіну киснем, спорідненість гемоглобіну до кисню, вміст кисню в крові, активні форми кисню.