

ОБ ИНДИВИДУАЛИЗАЦИИ ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ ДОЗ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ИЗМЕНЕНИЯМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОКСИГЕНАЦИИ КРОВИ

© 2015 г. Г.А. Залеская

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, 220072, Минск, пр. Независимости, 68, Беларусь

E-mail: zalesskaya@imaph.bas-net.by

Поступила в редакцию 10.03.15 г.

Изучено воздействие лазерно-оптического излучения на кровь разных пациентов, облучаемую *in vivo*. Объекты исследования – три серии образцов крови пациентов, полученные при экстракорпоральном ультрафиолетовом облучении крови, внутривенном облучении крови лазерным излучением и надвенном облучении крови соответственно. До и после облучения сопоставлены результаты оптической оксиметрии и газовый состав венозной крови. Промонстрированы результаты положительного и отрицательного влияния облучения крови на характеристики кислородного обмена отдельных пациентов и на содержание некоторых продуктов метаболизма. Показано, что при одной и той же энергетической дозе их изменения зависят от индивидуальных, исходных значений степени насыщения гемоглобина венозной крови кислородом и ее фотоиндуцированных изменений, которые объективно отражают индивидуальную чувствительность пациентов к воздействию оптического излучения на кровь и могут использоваться для оценки эффективности фототерапии.

Ключевые слова: фототерапия, степень насыщения гемоглобина кислородом, газовый состав крови.

Воздействие оптического излучения на кровь с терапевтическими целями, получившее название фототерапии (ФГТ), относится к числу быстро прогрессирующих областей современной медицины, успешно развивавшихся на протяжении XX столетия [1–3]. Однако несмотря на несомненные успехи, до настоящего времени остаются нерешенными такие актуальные проблемы фототерапии, как разработка способов оценки ее эффективности для отдельных пациентов и методов контроля индивидуальной восприимчивости к фототерапевтическим процедурам. К настоящему времени наряду с положительными терапевтическими результатами фототерапии в литературе приводятся отрицательные, свидетельствующие не только об отсутствии статистически достоверных улучшений в состоянии больного, но и о негативном действии [4–6]. Отмечалась плохая воспроизводимость результатов, различная чувствительности к фототерапии у разных больных, проявление стимулирующего действия в узком интервале энергетических доз [7,8]. У

некоторых пациентов стандартный метод фототерапии с фиксированными дозами светового воздействия вызывал непредсказуемые, отрицательные реакции уже во время процедур [9]. Научное объяснение положительных и отрицательных результатов лечения в большинстве работ отсутствовало. Следует отметить, что оказалось невозможным предсказать эффекты воздействия ФГТ в живом организме на основании процессов, выявленных в культурах клеток и изолированных тканях. В связи с этим, несомненно, актуальным становится изучение первичных фото процессов, инициируемых в крови пациентов терапевтическими дозами лазерно-оптического излучения; выявление индивидуальных особенностей ее фотомодификации. Решение этих задач способствует углублению наших представлений о молекулярных механизмах действия фототерапии, открывает возможности для разработки методов индивидуализации энергетических доз низкоинтенсивного оптического излучения, используемых в различных вариантах фототерапии, что относится к числу ее важнейших задач.

Цель настоящего исследования – определение факторов, в наибольшей мере характеризующих индивидуальную чувствительность пациентов к облучению крови низкоинтенсивным

Сокращения: ФГТ – фототерапия, УФОК – облучение крови излучением УФ-лампы, ВЛОК – внутривенное облучение крови лазерным излучением, НЛОК – надвенное облучение крови лазерным излучением.

оптическим излучением, и изучение возможностей их использования для оценки эффективности ФГТ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлись образцы крови пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями, отобранные до процедур ФГТ, непосредственно после их окончания, а также через 20–30 мин после завершения курса. В первой серии образцов исследовалась кровь пациентов ($n = 30$), получавших пять ежедневных процедур экстракорпорального облучения крови излучением УФ-лампы (УФОК, $\lambda = 254$ нм, плотность мощности на поверхности кюветы $1,5$ мВт/см²) (аппарат «Надежда», Россия). Вторая серия образцов – кровь пациентов ($n = 20$), получавших семь ежедневных процедур внутривенного облучения крови (ВЛОК) излучением полупроводникового лазера ($\lambda = 670$ нм, 2 мВт на выходе световода, $t = 20$ мин, аппарат «Родник», Беларусь). Третья серия образцов – кровь пациентов ($n = 26$), ежедневно в течение семи дней получавших надвенное облучение крови в локтевой вене (НЛОК) излучением полупроводникового лазера ($\lambda = 670$ нм, мощность 200 мВт, $t = 20$ мин, аппарат «Родник», Беларусь), при таком способе воздействия около 70% излучения, падающего на поверхность кожного покрова, достигает крови в вене. В каждом из методов использовались постоянные дозы, рекомендованные к применению Министерством здравоохранения Республики Беларусь (Постановление № 95 от 18.09.2007 г.). Образцы крови, взятые для анализа, были стабилизированы гепарином.

Для образцов облученной и необлученной крови на спектрофотометрическом блоке прибора ABL-800 (Radiometer, Дания), который за одно измерение определяет оптическое пропускание образца на 128 длинах волн в спектральном интервале 478 – 678 нм, измеряли содержание различных фракций гемоглобина, степень насыщения гемоглобина венозной крови кислородом ($S_V O_2$) и концентрации лактата и глюкозы. Парциальные давления газов венозной крови ($p_V O_2$, $p_V CO_2$) определяли газоанализатором прибора ABL-800. Степень насыщения артериальной крови ($S_A O_2$) оценивали по данным пульсоксиметрии (ЮМ-300, ЮТАС, Украина). Изучали данные биохимического и общего анализа крови. Корреляционный анализ выполняли с использованием критерия Пирсона (уровень значимости принимался равным менее $0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Уже в первых наших работах [10,11] было показано, что ВЛОК с использованием He-Ne-лазера приводит к изменениям поглощения крови в областях спектра, чувствительных к оксигенации крови (полоса Core, дублет полос 540 и 570 нм, область 650 – 950 нм). Результаты последующих исследований воздействия на кровь УФ-излучения ртутной лампы ($\lambda = 254$ нм) [12] и полупроводниковых лазеров ($\lambda = 670, 800$ нм) [13] подтвердили сделанный в работах [10,11] вывод, что наблюдавшиеся при ФГТ изменения электронных спектров поглощения образцов крови и эритроцитарной массы обусловлены изменением содержания окси- и деоксигемоглобина. Динамика фотоиндуцированных спектральных изменений, отражавших разницу в содержании окисленного и восстановленного гемоглобина на разных этапах ФГТ, была изучена в работе [14]. Спектральные изменения, подобные для разных длин волн оптического излучения, отличались по величине для образцов крови отдельных пациентов вследствие индивидуальной восприимчивости пациентов к воздействию низкоинтенсивного оптического излучения на кровь [13].

Как было показано в работах [10–14], фотодиссоциация комплексов гемоглобина с лигандами при поглощении оптического излучения гемоглобином крови приводит к изменениям характеристик оксигенации: степени насыщения гемоглобина венозной крови кислородом $S_V O_2$, концентрации оксигемоглобина $F_V (HbO_2)$; парциальных давлений $p_V O_2$ и $p_V CO_2$. Изменения газового состава венозной крови и степени насыщения гемоглобина кислородом при отделении и присоединении лигандов подтверждают предложенный на основании спектральных исследований механизм воздействия низкоинтенсивного оптического излучения на кровь [10,11]. Гемоглобин, имеющий на использованных для ФГТ длинах волн коэффициенты поглощения, значительно превосходящие коэффициенты поглощения других молекулярных компонентов крови, – первичный фотоакцептор лазерно-оптического излучения. Фотодиссоциация комплексов гемоглобина с лигандами – первичный фотопроект, инициируемый в крови терапевтическими дозами низкоинтенсивного оптического излучения.

Одна из выявленных характерных особенностей ФГТ – тенденция к нормализации характеристик оксигенации во время процедур (рис. 1а). Краткосрочные изменения характеристик оксигенации крови во время курса облучения и долговременные изменения, которые

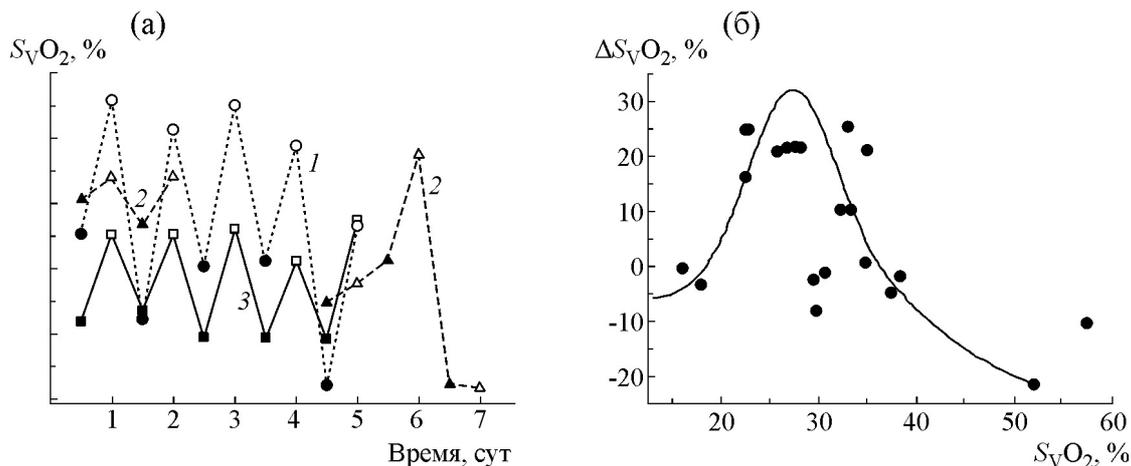


Рис. 1. Изменения степени насыщения гемоглобина кислородом $S_{V}O_2$ в течение курсов ФГТ. (а) – Зависимость 1 – УФОК (темный кружок – перед процедурой, светлый кружок – во время процедуры для образцов крови, отобранной из кюветы для УФ облучения крови); зависимость 2 – УФОК (темный треугольник – перед процедурой, светлый треугольник – во время процедуры для образцов крови, отобранных из вены); зависимость 3 – ВЛОК (темный квадрат – перед процедурой, светлый квадрат – во время процедуры). (б) – Зависимость $\Delta S_{V}O_2$ от исходных значений $S_{V}O_2$ в конце курса НЛОК. Каждая точка на рисунке соответствует измерениям для одного пациента.

определялись для каждого из пациентов после окончания курса, отличались. Возросшие во время облучения величины $p_{V}O_2$ и $S_{V}O_2$, отличавшиеся для каждого пациента, приближались к оптимальным для венозной крови значениям ($p_{V}O_2 = 40$ мм рт. ст., $S_{V}O_2 = 70\%$), но снижались до исходных или даже более низких значений к началу следующего сеанса [14]. Происходящие в течение курса изменения $p_{V}O_2$ и $S_{V}O_2$ показывают, что их количественное сопоставление для каждого из пациентов возможно только для образцов, отобранных в одинаковые, фиксированные моменты времени.

К числу наиболее важных характерных особенностей ФГТ относится избирательность ее действия на показатели оксигенации крови отдельных пациентов, достигнутые в конце курса. При одной и той же энергетической дозе у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями они изменялись в широких пределах ($18\% < S_{V}O_2 < 60\%$, $17 < p_{V}O_2 < 36$ мм рт. ст. после УФОК; $16\% < S_{V}O_2 < 60\%$, $17 < p_{V}O_2 < 40$ мм рт. ст. после НЛОК) и зависели, как от индивидуальных исходных величин $S_{V}O_2$, так и от их фотоиндуцированных изменений ($\Delta S_{V}O_2$) (рис. 1б). Индивидуальные изменения степени насыщения определялись как $\Delta S_{V}O_2 = [S_{V}O_2 \text{ (после курса ФГТ)} - S_{V}O_2 \text{ (до курса ФГТ)}]$. Снижение $S_{V}O_2$ под влиянием ФГТ оценивали как отрицательное изменение $\Delta S_{V}O_2$. Фотоиндуцированное перераспределение между фракциями гемоглобина не влияло на его общую концентрацию, средние по группам зна-

чения которой составили $143,6 \pm 15,0$ г/л до и $142,4 \pm 24,0$ г/л после УФОК; 152 ± 11 г/л до и 145 ± 19 г/л после НЛОК.

Полученные результаты позволили оценить влияние ФГТ на такие важные характеристики кислородного обмена, как содержание O_2 в артериальной ($Ct_A O_2$) и венозной крови ($Ct_V O_2$): $Ct_{V,A} O_2 = [Hb] \cdot 1,39 \cdot (S_{V,A} O_2 / 100) + 0,0031 \cdot p_{V,A} O_2$, где $[Hb]$ – концентрация гемоглобина, а также артериовенозную разность по кислороду $ABP = Ct_A O_2 - Ct_V O_2$, которая определяет концентрацию извлекаемого из крови кислорода. Часть O_2 , поглощаемая тканями из капиллярного русла, была оценена по коэффициенту утилизации кислорода $K_{\text{утил}}$, для расчета которого нет необходимости в измерениях сердечного выброса:

$$K_{\text{утил}} = ABP / Ct_V O_2. \quad (1)$$

Степень насыщения гемоглобина кислородом в артериальной крови ($S_A O_2$) у обследуемых пациентов была близка к нормальной ($94\% < S_A O_2 < 98\%$) в отличие от сниженных значений $S_{V}O_2$ ($60\% > S_{V}O_2 > 20\%$). Под влиянием ФГТ наблюдался лишь небольшой рост $S_A O_2$ ($2 < \Delta S_{V,A} O_2 < 6\%$).

В течение курсов УФОК, ВЛОК и НЛОК величины $K_{\text{утил}}$, так же как $S_{V}O_2$ и $p_{V}O_2$, претерпевали периодические осцилляции (рис. 1а, 2а). Наибольшие положительные изменения коэффициентов $K_{\text{утил}}$, отражающие нормализацию процессов утилизации O_2 тканями, происходили во время процедур облучения, когда патологически повышенные исходные значения $K_{\text{утил}}$

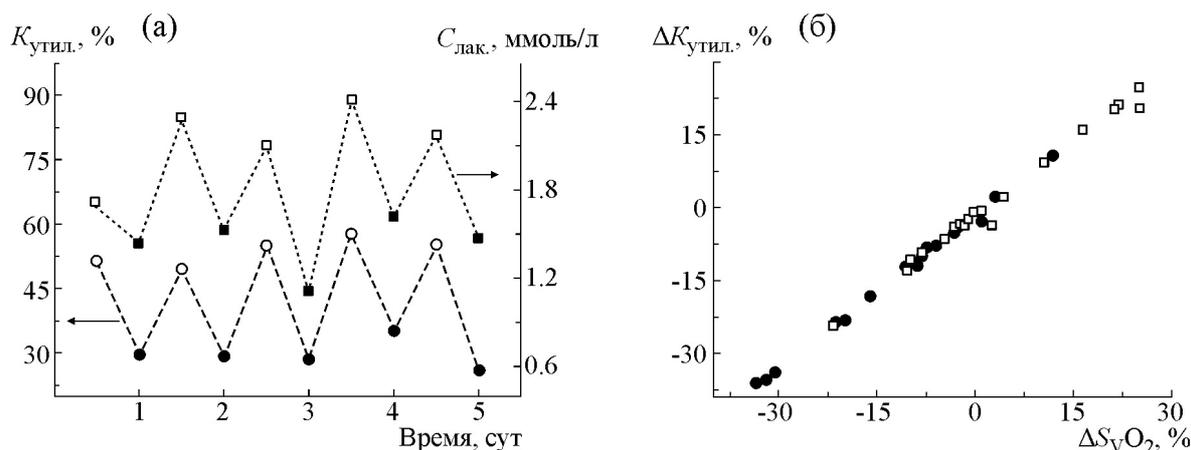


Рис. 2. (а) – Изменение коэффициента утилизации кислорода $K_{утил}$ в течение курса ВЛОК (светлый квадрат – перед процедурой, темный квадрат – во время процедуры); изменение концентрации лактата $C_{лак}$ в течение курса ВЛОК (светлый кружок – перед процедурой, темный кружок – во время процедуры). (б) – Зависимости изменений коэффициента утилизации кислорода $\Delta K_{утил}$ от изменений степени насыщения гемоглобина венозной крови кислородом ΔS_{vO_2} (УФОК (темный кружок), НЛОК (светлый квадрат)).

снижались, приближаясь к нормальным ($22 < K_{утил} < 32\%$). Это означает, что во время процедур ФГТ создавались условия для адекватного поступления кислорода в ткани. Однако если значения S_{vO_2} во время процедур ФГТ увеличиваются выше нормальной для венозной крови величины, как это происходило в некоторых случаях при УФОК, то вследствие артериализации венозной крови коэффициенты $K_{утил}$ становились ниже нормальных, утилизация кислорода тканями ухудшалась.

В конце курсов ФГТ у пациентов обследуемых групп коэффициенты $K_{утил}$ сильно отличались, изменяясь в пределах ($30\% < K_{утил} < 80\%$). В большинстве случаев конечные значения $K_{утил}$ были выше нормальных, т.е. потребление кислорода – $PO_2 = CB \cdot (Ct_A O_2 - Ct_V O_2)$ превышало его доставку $D = CB \cdot (Ct_A O_2)$ (CB – величина сердечного выброса). В целом, в конце курсов ФГТ у отдельных пациентов утилизация O_2 тканями улучшалась, а у других ухудшалась в зависимости от фотоиндуцированных изменений ΔS_{vO_2} (рис. 2б). В группе пациентов с возросшими конечными значениями S_{vO_2} коэффициенты $K_{утил}$ приближались к нормальным, снижаясь до $K_{утил} \approx 30\%$, что указывает на нормализацию снабжения тканей кислородом. Таким образом, так же как для S_{vO_2} и p_{vO_2} , ФГТ инициировала у отдельных пациентов отличавшиеся по величине и даже разнонаправленные изменения $K_{утил}$. Оказывая влияние на кислородный обмен в организме, ФГТ изменяла потребление O_2 тканями и его поступление в клетки, а следовательно, внутриклеточные процессы производства активных форм

кислорода. Увеличение концентрации O_2 в клетках активирует генерацию активных форм кислорода (синглетный кислород, анион радикал, гидроксильный радикал, H_2O_2 и др.). Известно, что в физиологически допустимых количествах активные формы кислорода действуют как регуляторы метаболических процессов, приспособляя обмен веществ к патологическим условиям [15]. Коррекция баланса между наработкой активных форм кислорода и их ингибированием компонентами антиоксидантной защиты была рассмотрена нами в работе [19] и в последующих работах [12–14] как процесс, позволяющий стимулировать положительные эффекты фототерапии. Следует указать, что активация ферментов антиоксидантной системы под влиянием фототерапии отмечалась ранее в целом ряде работ (см., например, [16–18]). Однако природа первичных процессов, приводящих к таким изменениям антиоксидантной системы, не была установлена. Влияние изменений показателей оксигенации крови, инициированных поглощением излучения гемоглобина и его фотодиссоциацией, на механизмы антиоксидантной защиты, а также возможность воздействовать на антиоксидантную систему через регуляцию поглощения низкоинтенсивного оптического излучения кровью была рассмотрена нами впервые в работе [19]. Такой молекулярный механизм действия ФГТ предполагает, что дозо-зависимые эффекты противоположной направленности, так же как неудовлетворительные результаты лечения некоторых пациентов методами фототерапии, являются следствием истощения системы антиоксидантной защиты

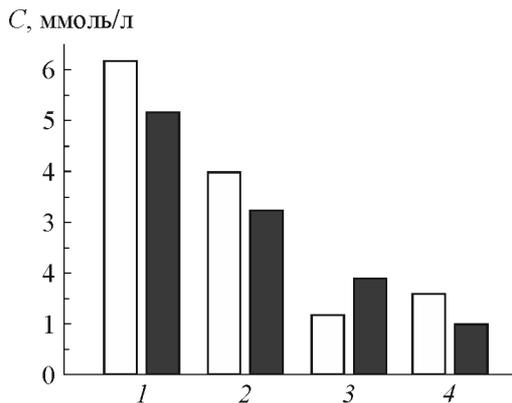


Рис. 3. (а) – Зависимость изменения концентрации $\Delta C_{\text{ХС-ЛПНП}}$ от $\Delta K_{\text{утил}}$ после УФОК; (б) – влияние исходной концентрации $C_{\text{ХС-ЛПНП}}$ у отдельных пациентов на изменение концентрации $\Delta C_{\text{ХС-ЛПНП}}$ под влиянием УФОК ($r = -0,58$, $p < 0/01$).

при передозировках или при тяжелом исходном состоянии организма.

Единый общий механизм действия низкоинтенсивного оптического излучения применительно ко всем патологиям, обусловленный его влиянием на кровь как генерализующую систему, проявился в изученных нами изменениях: содержания некоторых продуктов метаболизма (холестерина, лактата, глюкозы), гемореологии, характеристик гемокоагуляции, которые оказались взаимосвязаны с фотоиндуцированными изменениями характеристик оксигенации крови [14]. В течение курса ФГТ происходили периодические осцилляции не только $p_{\text{V}}\text{O}_2$, $S_{\text{V}}\text{O}_2$, $K_{\text{утил}}$, но и концентраций лактата (рис. 2а), глюкозы, Ca^{2+} , а также, по данным работы [1], вязкости крови, т.е. реакции орга-

низма на ФГТ реализовывались уже во время процедур облучения. В конце курса ФГТ его эффективность для отдельных пациентов зависела от исходных, индивидуальных характеристик оксигенации крови и их фотоиндуцированных изменений. Для примера на рис. 3а и 4а представлены зависимости изменений концентрации холестерина липопротеинов низкой плотности ($\Delta C_{\text{ХС-ЛПНП}}$) от ($\Delta K_{\text{утил}}$) под влиянием УФОК, а также активированного частичного тромбопластинового времени ($\Delta C_{\text{АЧТВ}}$) от ($\Delta K_{\text{утил}}$) под влиянием НЛОК, из которых следует, что наибольшие положительные фотоиндуцированные изменения рассматриваемых величин происходили в узком интервале изменений ($\Delta K_{\text{утил}}$).

Регуляторный характер воздействия ФГТ на содержание продуктов метаболических процессов, отражающих успешность лечения отдельных пациентов, проявлялся в уменьшении их содержания при высоких исходных значениях и повышении при низких. Так, оказывая положительное влияние на липидный обмен при гиперхолестеринемии, ФГТ снижает средние по группе концентрации холестерина и холестерина липопротеинов низкой плотности (рис. 5). Однако для отдельных пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями при одинаковых энергетических дозах регуляторное влияние низкоинтенсивного оптического излучения на метаболизм липидов проявлялось в зависимости конечных концентраций холестерина ($C_{\text{ХС}}$) и холестерина липопротеинов низкой плотности ($C_{\text{ХС-ЛПНП}}$) от их начальной концентрации (рис. 4б), которые уменьшались у пациентов с первоначально повышенными концентрациями и наоборот.

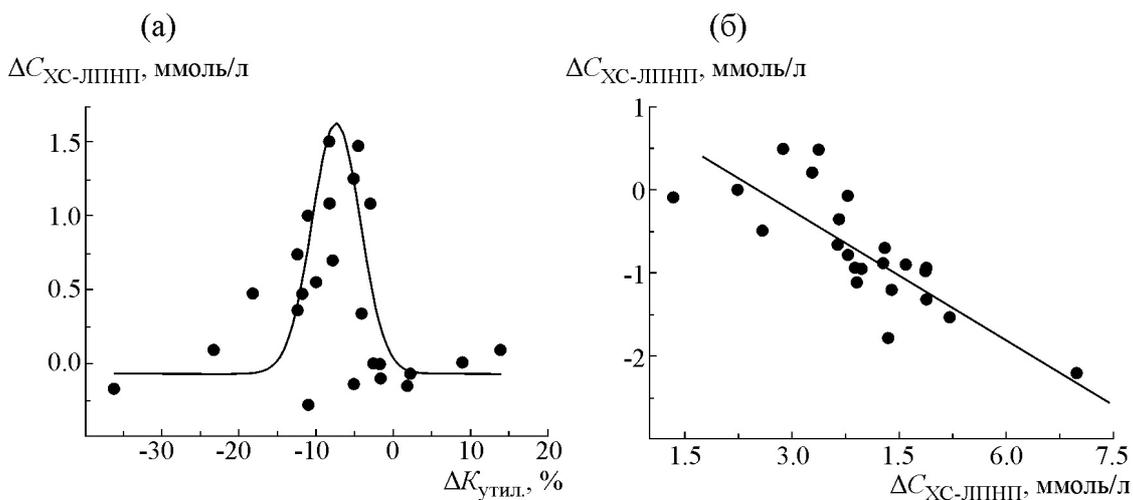


Рис. 4. (а) – Зависимость изменений активированного частичного тромбопластинового времени ($\Delta C_{\text{АЧТВ}}$) от $\Delta K_{\text{утил}}$ при НЛОК; (б) – зависимость $\Delta C_{\text{АЧТВ}}$ от исходных значений $C_{\text{АЧТВ}}$ для отдельных пациентов ($r = -0,64$, $p < 0,002$) при НЛОК.

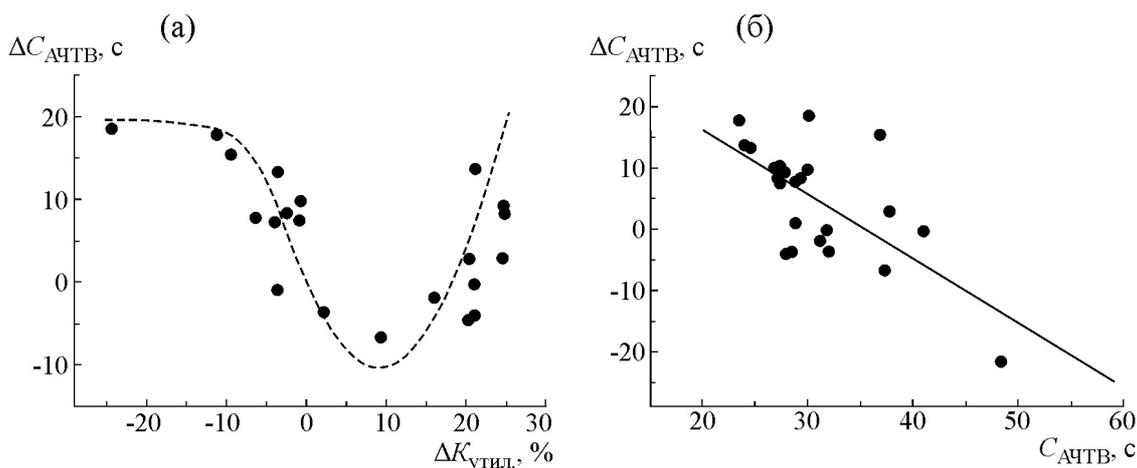


Рис. 5. Влияние НЛОК на концентрации липидов для группы больных с сердечно-сосудистыми заболеваниями: средние по группе концентрации холестерина (1), холестерина липопротеинов низкой плотности (2), холестерина липопротеинов высокой плотности (3), триглицеридов (4) до (светлые столбики) и после (темные столбики) завершения курса.

Регуляторное воздействие ФГТ на параметры свертываемости крови было установлено при УФОК и при НЛОК. Для отдельных пациентов их изменения также зависели как от исходных значений этих параметров (рис. 4б), так и от фотоиндуцированных изменений ($\Delta K_{\text{утил}}$) (рис. 4а). Полученные изменения характеристик свертываемости крови под влиянием ФГТ для отдельных пациентов оказались как положительными, так и отрицательными. Наличие положительных результатов подтверждает возможность корректировать агрегационные характеристики крови методами ФГТ.

Таким образом, установлена зависимость знака и величины изменений индивидуальных концентраций рассмотренных выше продуктов метаболизма после окончания курса ФГТ от их исходных концентраций, снижавшихся при высоких начальных уровнях и повышавшихся при низких, и от фотоиндуцированных изменений $\Delta K_{\text{утил}}$. Динамика изменений этих продуктов, зависящая от изменений характеристик оксигенации в течение курса фототерапии и после его окончания, подтверждает важную роль фотоиндуцированных изменений кислородзависимых процессов в нормализации метаболических нарушений.

Из результатов проведенных исследований следует, что для объективного контроля лечения методами ФГТ необходимо для каждого из пациентов контролировать ключевые параметры кислородного обмена, среди которых наиболее важными являются ($S_A O_2$, $S_V O_2$). Как следует из зависимости коэффициента $K_{\text{утил}}$ от характеристик оксигенации (уравнение 1), предлагаемое в работе [20] прогнозирование эффек-

тивности лазерного воздействия на кожную ткань только по оценкам локальной суммарной концентрации O_2 в кожной ткани, основанном на измерениях $S_A O_2$, представляется невозможным, так как остается неизвестной доступность O_2 тканям – потребителям кислорода. Отдача O_2 тканям увеличивается не только за счет способности артериальной крови поставлять необходимое количество кислорода тканям, но и за счет механизмов его утилизации. Как показано выше, только при сохранившейся общей концентрации гемоглобина и возросших под влиянием ФГТ низких величинах $S_V O_2$, существенно сниженных у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями, приближались к норме аномально высокие значения артериовенозной разности по кислороду и $K_{\text{утил}}$, нормализовалось потребление кислорода тканями, а следовательно, улучшалась отдача кислорода тканям. Применявшийся в настоящем исследовании контроль основных характеристик оксигенации крови в крупных кровеносных сосудах базировался как на измерениях $S_A O_2$, так $S_V O_2$, использующих оптическую оксиметрию образцов венозной крови, физической основой которой является измерение коэффициентов поглощения венозной крови на длинах волн с отличающимися коэффициентами поглощения окисленной и восстановленной форм гемоглобина. Контроль терапевтического воздействия низкоинтенсивного оптического излучения на поверхность живых тканей может осуществляться приборами, разработанными для определения локального насыщения тканей кислородом [21].

ВЫВОДЫ

Показано, что облучение крови *in vivo* низкоинтенсивным оптическим излучением оказывает разное влияние на кислородный обмен отдельных пациентов вследствие различных исходных значений и отличающихся фотоиндуцированных изменений: $S_V O_2$, содержания оксигемоглобина, $p_V O_2$. Улучшение обеспечения кислородом различных органов и тканей не является универсальным эффектом ФГТ, проявляющимся у всех пациентов. Только при нормализации под влиянием курса ФГТ содержания кислорода в артериальной и венозной крови, в наибольшей мере зависящих от величин $S_A O_2$ и $S_V O_2$, приближается к норме коэффициент $K_{\text{утил}}$, улучшается снабжение тканей кислородом.

Впервые установлена связь между фотоиндуцированными изменениями: характеристик оксигенации крови пациентов и содержанием продуктов метаболизма, отражающим эффективность ФГТ. В конце курса изменения концентраций достоверно отличались для разных пациентов и зависели как от исходной концентрации, так и от фотиндуцированных изменений $S_V O_2$. Показано, что только при оптимальном для данного пациента режиме воздействия наблюдались положительные сдвиги в процессе метаболизма.

Контроль изменений степени насыщения гемоглобина кислородом, как во время процедур, так и после их окончания следует рекомендовать для клинического применения при оценках эффективности ФГТ для отдельных пациентов, а также для решения вопроса о целесообразности применения курса фотогомо- или фототерапии в каждом конкретном случае.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь (грант Ф15-042).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. И. Карандашов, Е. Б. Петухов и В. С. Зродников, *Фототерапия*, под ред. Н.Р. Палеева (Медицина, М., 2001).
2. *Handbook of Photomedicine*, Ed. M.R. Hamblin, Y.-Y. Huang (CRC Press, Boca Raton, FL., 2013).
3. *Biomedical Photonics Handbook. I Fundamentals, Devices and Techniques. II Biomedical Diagnostics. III Therapeutics and Advanced Diagnostics*, Ed. Tuan Vo-Dinh (CRC Press, Boca Raton, FL., 2014).
4. В. В. Скворцов. *Оптимизация лечения хронических диффузных заболеваний печени с использованием лазеротерапии* (Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, 2006).
5. О. В. Ильина и Л. М. Кудяева, *Вестн. новых мед. технологий* **19** (4), 36 (2012).
6. А. И. Коряков и Е. Д. Рождественская, *Вестн. первой областной клин. больницы* **3** (4), Екатеринбург. http://vestnik.okb.mplik.ru/04_01/003.html.
7. Н. Д. Девятков, С. М. Зубкова, И. Б. Лапрун и др. *Успехи современ. биологии* **103**, 31 (1987).
8. Т. В. Чинчук, И. А. Страшкевич и Г. И. Клебанов, *Вестн. РАМН*, № 2, 27 (1999).
9. Е. Л. Малиновский, *Рос. вестн. фотобиологии и фотомедицины*, № 2, 60 (2010).
10. Г. А. Залеская и Е. Г. Самбор, *Журн. прикл. спектроскопии* **72** (2), 230 (2005).
11. Г. А. Залеская, Е. Г. Самбор и А. В. Кучинский, *Журн. прикл. спектроскопии* **73** (1), 106 (2006).
12. Г. А. Залеская и Т. О. Маслова, *Оптика и спектроскопия* **110** (2), 337 (2011).
13. Г. А. Залеская, *Журн. прикл. спектроскопии* **81** (3), 433 (2014).
14. Г. А. Залеская, *Фотомодификация крови терапевтическими дозами оптического излучения*, под ред. В.С. Улащика (Белорусская наука, Минск, 2014).
15. Н. К. Зенков, В. З. Ланкин и Е. Б. Меньщикова. *Окислительный стресс: биохимические и патофизиологические аспекты* (Наука/Интерпериодика, М., 2014).
16. Е. А. Горбатенкова, О. А. Азизова и Ю. А. Владимиров, *Биофизика* **33**, 717 (1988).
17. А. В. Волотовская, В. С. Улащик и В. Р. Филиппович, *Вопр. курортологии, физиотер. и лечебной физич. культуры* **3**, 22 (2003).
18. А. В. Донцов, *Вестн. новых мед. технологий* **19** (4), 144 (2012).
19. Г. А. Залеская и В. С. Улащик, *Журн. прикл. спектроскопии* **76** (1), 51 (2009).
20. М. М. Асимов, Р. М. Асимов и А. Н. Рубинов, *Фотобиол. и фотомедицина* **2,3**, 112 (2009).
21. А. И. Крупаткин и В. В. Сидоров, *Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови. Руководство для врачей* (ОАО Изд-во «Медицина», М., 2005).

On Individualization of Therapeutic Doses of Optical Radiation according to Changes in Parameters of Blood Oxygenation

G.A. Zaleskaya

Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220072 Belarus

The effect of *in vivo* laser irradiation by optical radiation on blood from different patients is studied. The objects of research were three series of blood samples from patients whose treatment course included extracorporeal UV blood irradiation, intravenous laser blood irradiation and supra-venous blood laser irradiation. Before and after irradiation the results on optic oximetry and gas content of venous blood were compared. The results of positive and negative influence of blood irradiation on characteristics of an oxygen exchange in separate patients and on the maintenance of some products of metabolism are represented. It is shown that at the same power dose, their changes depend on individual, initial values of hemoglobin oxygen saturation of venous blood and its photoinduced changes which objectively reflect individual sensitivity of patients to the action of optical radiation on blood and can be used for assessment of the efficiency of phototherapy.

Key words: phototherapy, degree of hemoglobin oxygen saturation, gas content of blood