

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 615.832.9

И.Н. НОВИКОВА, Е.В. ИСКОРОСТИНСКИЙ, Н.Е. ИСКОРОСТИНСКИЙ, А.В. ДУНАЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЩЕЙ ВОЗДУШНОЙ КРИОТЕРАПИИ НА ПАРАМЕТРЫ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНО–ТКАНЕВЫХ СИСТЕМ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА

В данной работе с использованием неинвазивных оптических методов лазерной доплеровской флоуметрии, оптической тканевой оксиметрии и пульсоксиметрии исследовано влияние общей воздушной криотерапии (ОВКТ) на параметры микроциркуляторно–тканевых систем (МТС) организма человека. Описана методика проведения экспериментов, проведен детальный анализ колебаний кровотока, оценена динамика изменения измеренных и расчетных комплексных параметров тканевого дыхания. Выявлены статистически значимые изменения значений параметров МТС сразу после проведения процедуры криотерапии по отношению к значениям до ОВКТ, а также их полное восстановление через 15–20 мин у большинства исследуемых добровольцев.

Ключевые слова: неинвазивная диагностика, лазерная доплеровская флоуметрия, оптическая тканевая оксиметрия, пульсоксиметрия, микроциркуляторно–тканевые системы, общая воздушная криотерапия.

В настоящее время для улучшения общего состояния организма человека и лечения многих заболеваний в физиотерапии применяют различные природные и искусственно создаваемые физические факторы [1]. Одной из областей физиотерапии является низкотемпературная терапия (криотерапия), получившая развитие благодаря исследованиям японских и немецких учёных, которые впервые предложили использовать сверхнизкие температуры при лечении заболеваний организма человека, а также провели сравнительную оценку эффективности применения различных хладогентов [2, 3].

Данный вид физиотерапии в зависимости от степени охлаждения, достигаемого при помощи различных хладоносителей, а также в зависимости от площади тела, подвергаемого воздействию, имеет свои разновидности [4]. Наибольший интерес в медицинской практике представляет общая криотерапия, которая относится к стрессогенным физиотерапевтическим процедурам и заключается в воздействии жидкими, чаще газообразными хладогентами для отведения тепла от всей поверхности тела человека. Холодовое воздействие, воспринимаемое организмом как кратковременно действующий стресс, по результатам исследований вызывает значительное изменение температуры тела [5, 6], биохимического состава крови и её реологических свойств [7], оказывает влияние на работу сердечно–сосудистой системы [8], центральной и вегетативной нервной системы, приводит к активации обменных процессов, улучшению состояния антиоксидантных систем и липидного профиля [9, 10], тем самым вызывая повышение неспецифической резистивности организма.

Таким образом, в процессе проведения процедуры под влиянием холодового фактора происходит быстрое снижение температуры (охлаждение) пойкилотермной «оболочки», в состав которой входят кожа, подкожная клетчатка и ткани конечностей, в пределах криоустойчивости (до 5–10 °С), при сохранной температуре гомеотермного «ядра», что обеспечивает отсутствие выраженных сдвигов терморегуляции организма. В результате охлаждения происходит активация рефлекторного и гуморально–гормонального звеньев организма, которые включают в себя афферентные и эфферентные сигналы, воспринимающий центр, гуморальные агенты и нейрогормоны, продуцируемые эндокринными железами и нейронами, а также усиление биохимических, биофизических реакций и метаболических процессов, протекающих на тканевом, клеточном и молекулярном уровнях. Несмотря на интенсивное внедрение данных технологий в медицинскую практику в настоящее время продолжают исследовать

дования, направленные на более детальное изучение влияния общей воздушной криотерапии на функционирование отдельных систем организма человека и его состояние в целом, а также для оценки эффективной длительности проведения процедур.

Целью данной работы явилось исследование влияния общей воздушной криотерапии на изменение значений параметров микроциркуляторно–тканевых систем (МТС) организма человека для оценки эффективности и корректировки длительности процедуры.

В настоящее время для исследования МТС организма человека широко применяют неинвазивные оптические технологии, такие как лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ), оптическая тканевая оксиметрия (ОТО) и пульсоксиметрия (ПО), которые совместно с различными функциональными пробами, позволяют получить более полную информацию о состоянии организма, его резервных и адаптивных возможностях [11, 12].

Для выявления изменений параметров МТС организма человека после проведения процедуры ОВКТ были проведены тестовые экспериментальные исследования с использованием методов ЛДФ, ОТО и ПО. В исследованиях приняли участие 6 условно–здоровых добровольцев – 5 мужчин и 1 женщина (в возрасте от 14 до 67 лет). Измерения проводились на коже с артерио–венными анастомозами (АВА) на ладонной поверхности дистальной фаланги 3–го пальца кисти правой руки, в условиях физического и психического покоя через 2 часа после приема пищи с предварительной адаптацией испытуемых к температуре помещения 20–23 °С (только для случая регистрации начальных данных до ОВКТ) в положении сидя, правое предплечье на столе на уровне сердца. Исследования выполнялись с использованием лазерного анализатора микроциркуляции крови для врача общей практики «ЛАКК–ОП» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва), представленного на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид лазерного анализатора микроциркуляции крови для врача общей практики «ЛАКК–ОП» (а) и расположение оптических датчиков на пальцах рук добровольца во время проведения исследований (б)

Лазерный анализатор предназначен для исследования МТС организма человека путём одновременного использования методов ЛДФ с длиной волны лазерного зондирования 1064 нм, ОТО с длинами волн излучения 530 нм и 630 нм и пульсоксиметрии. Для частотного анализа различных ритмов периферического кровотока (эндотелиальных, нейрогенных, миогенных, дыхательных и сердечных колебаний [13]) зарегистрированных ЛДФ– и ОТО–грамм применялась программа LDF 2.3.514.602, которая реализует непрерывное вейвлет–преобразование с использованием в качестве анализирующего вейвлета комплекснозначный вейвлет Морле [14].

В один день на одном добровольце проводилась только одна процедура ОВКТ, длительность которой составляла от 2 до 2,5 мин. Процедура ОВКТ осуществлялась в охлаждении организма человека до температуры –(150–170) °С с помощью азотно–воздушной смеси криосауны «КАЭКТ–01» (ООО НПП «КРИОН», г. Санкт–Петербург), представленной на рисунке 2. На сегодняшний день существует большой спектр криотерапевтических установок и систем, реализующих различные принципы действия [15]. Данная модель рассчитана на од-

ного пациента и состоит из кабины открытого типа, сосуда Дьюара на 40 л жидкого азота и системы подачи парожидкостной струи азота в кабину.



Рисунок 2 – Внешний вид криосауны «КАЭКТ-01»

Регистрацию параметров МТС в виде записи базового теста (БТ) осуществляли до начала проведения процедуры криотерапии (БТ1), сразу после (БТ2) и через 15–20 мин после её окончания (БТ3). Длительность БТ составляла 3 мин. Всего было проведено 34 эксперимента и зарегистрировано 102 БТ. В процессе проведения экспериментальных исследований производилась регистрация основных параметров МТС организма человека, а именно: показателя микроциркуляции крови (I_m), тканевой сатурации (S_tO_2), уровня объёмного кровенаполнения ткани (V_b) и сатурации артериальной крови (S_aO_2).

На рисунке 3 представлены примеры регистрации ЛДФ- и ОТО-грамм и их амплитудно-частотные спектры до и после проведения процедуры криотерапии. Как видно, данное физиотерапевтическое воздействие вызывает значительное изменение основных регистрируемых параметров МТС.

По методике [16, 17], основанной на анализе амплитуд колебаний кровотока и тканевой сатурации, определяли показатель экстракции кислорода (OE):

$$OE = (S_aO_2 - S_vO_2) / S_aO_2, \quad (1)$$

где S_vO_2 – сатурация венозной крови.

Для определения значений сатурации венозной крови были проанализированы амплитуды колебаний, связанные с пассивными механизмами регуляции тканевой сатурации (S_tO_2), а именно: амплитуды сердечных $A(S_tO_2)_c$ и дыхательных $A(S_tO_2)_d$ осцилляций. Если $A(S_tO_2)_c / A(S_tO_2)_d > 1$, то сатурация венозной крови рассчитывалась следующим образом:

$$S_vO_2 = \frac{S_tO_2}{A(S_tO_2)_c / A(S_tO_2)_d}, \quad (2)$$

где $A(S_tO_2)_c$, $A(S_tO_2)_d$ – максимальные амплитуды колебаний тканевой сатурации кардиального (0,8–1,6 Гц) и дыхательного (0,2–0,4 Гц) генеза.

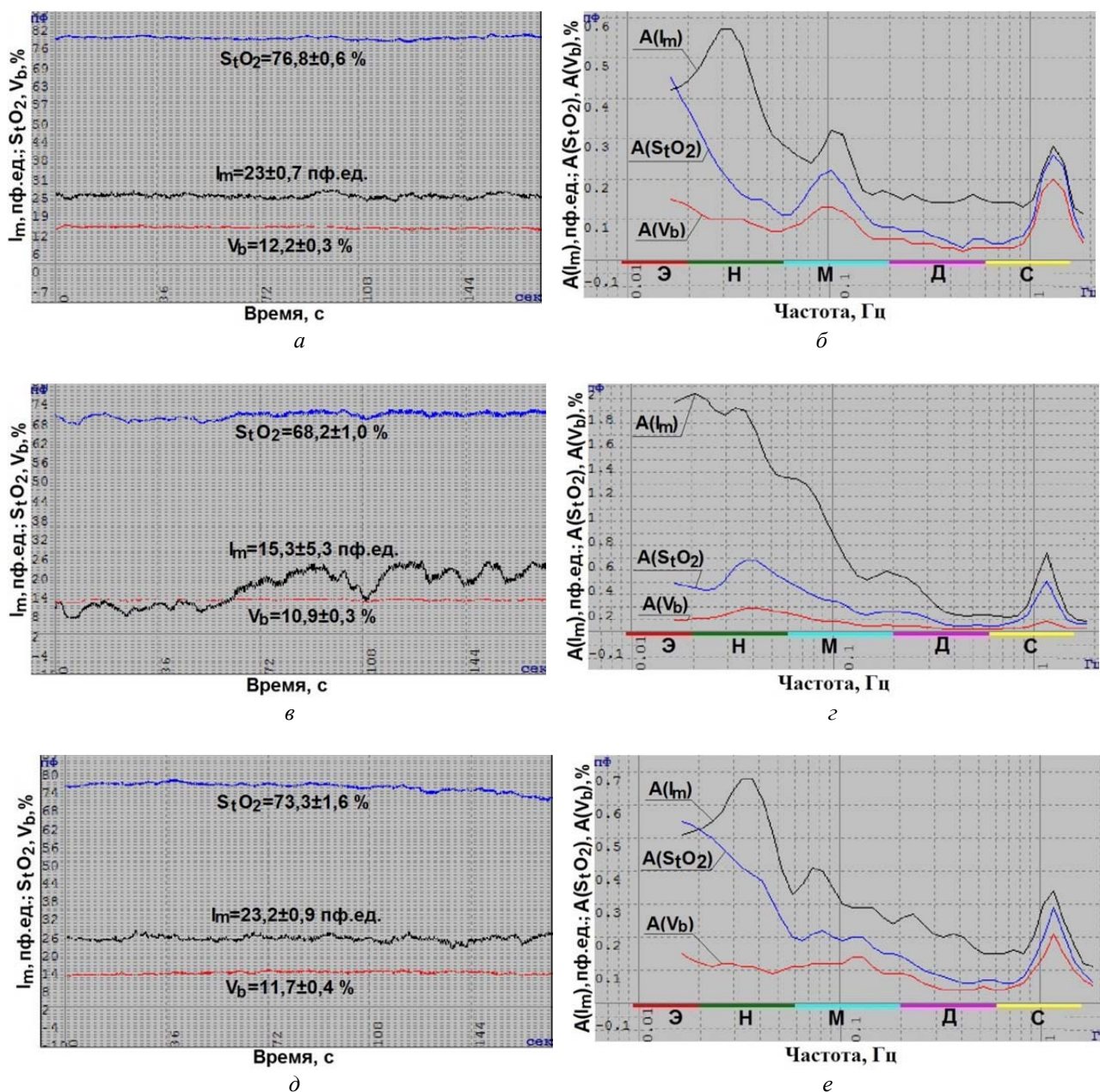


Рисунок 3 – Примеры регистрации ЛДФ– и ОТО–грамм и их амплитудно–частотные спектры до (а, б), сразу после (в, з) и через 15–20 мин после (д, е) проведения процедуры:
 Э – эндотелиальные, Н – нейрогенные, М – миогенные, Д – дыхательные, С – сердечные ритмы

В случае резонанса колебаний тканевой сатурации, связанных с активными механизмами регуляции, когда высокоамплитудные осцилляции наблюдаются только в одном из них на фоне резкого угнетения колебаний в других диапазонах и снижения их амплитуд, расчет S_vO_2 имеет ряд особенностей. В случае резонанса осцилляций в общем миогенном (0,047–0,145 Гц) или дыхательном диапазонах, сатурация венозной крови рассчитывалась следующим образом:

$$S_vO_2 = \frac{S_tO_2}{BI(S_tO_2)}, \quad (3)$$

где $BI(S_tO_2)$ – показатель шунтирования (ПШ), рассчитываемый по S_tO_2 –грамме:

$$BI(S_tO_2) = 1 + \frac{A(S_tO_2)_н}{A(S_tO_2)_м}, \quad (4)$$

где $A(S_tO_2)_н$, $A(S_tO_2)_м$ – амплитуды колебаний тканевой сатурации в нейрогенном (0,021–0,046 Гц) и миогенном диапазонах.

Скорость потребления кислорода (OC) рассчитывалась на основании анализа колебаний ЛДФ–грамм и рассчитанного ранее значения венозной сатурации:

$$OC = I_{mnutr} \cdot (S_a O_2 - S_v O_2), \quad (5)$$

где I_{mnutr} – доля нутритивного кровотока в общем микрокровотоке:

$$I_{mnutr} = I_m / BI(I_m), \quad (6)$$

где I_m – среднее значение перфузии;

$BI(I_m)$ – показатель шунтирования, рассчитываемый по ЛДФ–грамме в свою очередь по формуле:

$$BI(I_m) = BI(I_m)_1 + BI(I_m)_2. \quad (7)$$

Составляющая $BI(I_m)_1$ рассчитывалась по формуле (4) с использованием данных перфузии (I_m). В случае доминирования осцилляций кровотока, связанных с эндотелиальными механизмами регуляции, при расчете показателя шунтирования амплитуда колебаний нейрогенного генеза (A_n) заменялась на амплитуду колебаний, связанных с эндотелиальными механизмами (A_s).

$BI(I_m)_2$ рассчитывалась по следующей формуле:

$$BI(I_m)_2 = A(I_m)_{nacc} / A(I_m)_m, \quad (8)$$

где $A(I_m)_{nacc}$ – максимальная амплитуда колебаний кровотока, связанная с пассивными механизмами регуляции (осцилляции сердечного или дыхательного генеза).

$BI(I_m)_2$ учитывалась при расчете показателя шунтирования, если $BI(I_m)_2 \geq 1$ [16].

Для оценки колебательного компонента микрососудистого тонуса определялись величины эндотелиального (ET), нейрогенного (NT) и миогенного (MT) тонусов по следующим формулам [18]:

$$ET = \sigma / A(I_m)_s, \quad (9)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение (СКО) показателя микроциркуляции крови (I_m); $A(I_m)_s$ – наибольшее значение амплитуды колебаний перфузии в эндотелиальном диапазоне;

$$NT = \sigma / A(I_m)_n, \quad (10)$$

где $A(I_m)_n$ – наибольшее значение амплитуды колебаний перфузии в нейрогенном диапазоне;

$$MT = \sigma / A(I_m)_m, \quad (11)$$

где $A(I_m)_m$ – наибольшее значение амплитуды колебаний перфузии в миогенном диапазоне.

На основании зарегистрированных данных производился расчет комплексных параметров МТС организма человека, а именно индексов удельного потребления кислорода в ткани согласно двум различным подходам [16]:

$$U_1 = S_a O_2 / S_t O_2, \quad (12)$$

$$U_2 = (S_a O_2 - S_t O_2) / V_b. \quad (13)$$

Индекс удельного потребления кислорода в ткани (с учётом нутритивного кровотока) определялся следующим образом [19]:

$$I = (S_a O_2 / S_t O_2) \cdot I_{mnutr}. \quad (14)$$

Индекс относительной перфузионной сатурации кислорода в микрокровотоке характеризует связь между потоком крови (перфузией) в микроциркуляторном русле и непотребленным тканями кислородом, т.е. находится в обратной зависимости от потребления кислорода тканью. Данный параметр рассчитывался следующим образом:

$$S_m = S_t O_2 / I_m. \quad (15)$$

Как известно, параметры МТС организма человека обладают пространственной и временной вариабельностью [19], оценка изменения которой является важной характеристикой уровня жизнедеятельности тканей и должна учитываться при интерпретации результатов исследований системы микроциркуляции крови. Был проведен анализ изменений значений зарегистрированных и расчетных параметров МТС организма человека, полученные данные статистически обработаны с применением критерия Манна–Уитни [20]. Оценены различия

значений анализируемых параметров до проведения процедуры криотерапии (БТ1), сразу после окончания процедуры (БТ2) и к завершению (через 15 мин) исследования (БТ3). Результаты экспериментальных исследований изменений параметров МТС организма человека при проведении процедуры ОВКТ по всем условно–здоровым добровольцам представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований по всем добровольцам

№ п/п	Параметр	Базовые тесты		
		БТ №1 (n=34)	БТ №2 (n=34)	БТ №3 (n=34)
1	I_m , пф.ед.	21,6±1,6	15,0±4,9*	20,3±4,0
2	S_tO_2 , %	70,4±8,0	61,7±7,9*	68,2±5,8
3	V_b , %	10,6±2,4	9,6±2,4	10,2±2,2
4	S_aO_2 , %	98,8±0,4	98,7±0,5	98,8±0,3
5	$BI(S_tO_2)$, отн.ед.	2,9±1,1	3,2±1,1	3,7±2,0
6	$BI(I_m)$, отн.ед.	2,9±1,3	3,4±1,6	2,9±1,2
7	S_vO_2 , %	22,6±11,7	27,2±11,2	23,8±12,4
8	ET , отн.ед.	2,14±0,75	2,66±1,17*	1,98±0,90
9	NT , отн.ед.	1,97±0,67	2,87±1,03*	2,10±1,01
10	MT , отн.ед.	2,86±1,38	4,45±2,83*	2,81±1,02
11	I_{mnutr} , пф.ед.	8,4±2,9	5,4±2,9*	8,5±4,6
12	U_1 , отн.ед.	1,4±0,2	1,6±0,2	1,5±0,1
13	U_2 , отн.ед.	2,8±0,9	4,3±2,4	3,3±1,2
14	I , пф.ед.	11,9±4,4	9,0±5,4	12,6±7,2
15	S_m , отн.ед.	3,3±0,5	4,6±1,9*	3,6±1,5
16	OE , отн.ед.	0,77±0,12	0,73±0,11	0,76±0,13
17	OC , отн.ед.	627,2±208,6	390,3±216,2*	643,5±357,4

* – статистическая значимость различий значений показателей после проведения криотерапии по отношению к значениям до воздействия с $p < 0,05$ по критерию Манна–Уитни.

Как видно из полученных данных, воздействие азотно–воздушной смесью, температура которой составляет $-(150-170)^\circ\text{C}$, приводит к значительным изменениям параметров МТС организма человека. Через 2–2,5 мин общего воздействия в результате охлаждения тела происходит снижение температуры кожи (до температуры в пределах криоустойчивости) и раздражение холодовых рецепторов. В результате происходит активация адренергических симпатических нервных волокон [18], что приводит к активации колебаний кровотока симпатического диапазона. Возрастание амплитуд низкочастотных осцилляций и увеличение миогенного тонуса ($MT_1 = 2,86 \pm 1,38$ отн.ед., $MT_2 = 4,45 \pm 2,83$ отн.ед.) вызывает сужение просвета мелких периферических сосудов, прекапиллярных сфинктеров, уменьшение периферического кровообращения ($I_{m1} = 21,6 \pm 1,6$ пф.ед., $I_{m2} = 15,0 \pm 4,9$ пф.ед.) и величины нутритивного кровотока ($I_{mnutr1} = 8,4 \pm 2,9$ пф.ед., $I_{mnutr2} = 5,4 \pm 2,9$ пф.ед.), что может свидетельствовать о перемещении крови во внутренние органы, т.е. о централизации кровообращения. В результате данных процессов происходит снижение скорости потребления кислорода ($OC_1 = 627,2 \pm 208,6$ отн.ед., $OC_2 = 390,3 \pm 216,2$ отн.ед.). Сужение просвета сосудов, вызванное действием хладагента, является одной из двух защитных фаз сосудистой реакции на охлаждение, обеспечивая предотвращение проникновения холодового фактора на кожные покровы и подкожную клетчатку к глубоко лежащим внутренним органам и системам организма. Данная фаза сосудистой реакции может длиться в течение 20 мин после окончания процедуры [21, 22].

Как показывают полученные результаты, через 15–20 мин после процедуры ОВКТ у большинства исследуемых происходит нормализация колебаний кровотока, миогенный тонус прекапилляров уменьшается ($MT_3 = 2,81 \pm 1,02$ отн.ед.), приближаясь к значению до проведения криотерапии, происходит выраженное расширение периферических сосудов, увеличение кровообращения, в результате чего происходит увеличение показателя микроциркуляции ($I_{m3} = 20,3 \pm 4,0$ пф.ед.), величины нутритивного кровотока ($I_{mnutr3} = 8,5 \pm 4,6$ пф.ед.) и скорости потребления кислорода ($OC_3 = 643,5 \pm 357,4$ отн.ед.). Данный процесс приводит к активации артериальной гиперемии и является второй защитной фазой сосудистой реакции. Дан-

ная фаза, являясь компенсаторной, способствует усиленному теплообразованию, тем самым препятствуя ишемии и нарушению питания тканей. Длительность второй фазы может составлять от 1 до 3 ч [22, 23]. Благодаря расширению кожных сосудов во вторую фазу сосудистой реакции происходит снижение общего периферического сопротивления, в результате чего происходит уменьшение нагрузки на сердце.

Однако также было выявлено, что индивидуальные реакции МТС организма человека на процедуру криотерапии могут различаться. Так, например, у одного из добровольцев (мужчина 64 лет) после проведения ОВКТ не происходило значимых изменений параметров МТС, а именно – показателя микроциркуляции ($I_{m1} = 23,4$ пф.ед., $I_{m2} = 19,2$ пф.ед. и $I_{m3} = 22,2$ пф.ед.), миогенного тонуса ($MT_1 = 3,79$ отн.ед., $MT_2 = 3,56$ отн.ед. и $MT_3 = 5,08$ отн.ед.), величины нутритивного кровотока ($I_{mnutr1} = 4,2$ пф.ед., $I_{mnutr2} = 3,6$ пф.ед. и $I_{mnutr3} = 4,3$ пф.ед.), скорости потребления кислорода ($OC_1 = 373,9$ отн.ед., $OC_2 = 314,0$ отн.ед. и $OC_3 = 374,7$ отн.ед.) и других параметров, что может быть связано со снижением резервных и адаптивных возможностей МТС вследствие их возрастных изменений.

Таким образом, анализ полученных экспериментальных данных показал, что в процессе проведения общей воздушной криотерапии ввиду различных адаптационных резервов организма человека происходят разнообразные изменения параметров микроциркуляторно–тканевых систем вследствие активации рефлекторных и гуморально–гормонального звеньев организма, а также усиления биохимических, биофизических реакций и метаболических процессов. Очевидно, что данные изменения необходимо учитывать при оценке эффективности и для корректировки длительности процедуры, что позволяет индивидуализировать ОВКТ. В дальнейшем, на наш взгляд, будет более информативным продолжить экспериментальные исследования с применением диагностического метода флуоресцентной спектроскопии с целью оценки изменений метаболических процессов путём расчета показателя тканевого кислородного метаболизма (редокс–соотношения).

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ для ФГБОУ ВПО «Государственный университет–УНПК» (№310).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боголюбов, В.М. Общая физиотерапии. Учебное пособие для студ. мед. вузов. ед. вузов / В.М. Боголюбов, Г.Н. Пономаренко // СПб.: Правда, 1998. – 480 с.
2. Yamauchi, T. Whole body cryotherapy is method of extreme cold -175°C Treatment initially used for rheumatoid arthritis / T. Yamauchi // Z. Phys. Med. Baln. Med. Klim. – 1986. – № 15. – P. 311.
3. Fricke, R. Ganzkörperkältetherapie in einer Kältekammer mit Temperaturen um -110°C / R. Fricke // Z. Phys. Med. Baln. Med. Klim. – 1989. – V. 18. – № 1. – P. 1–10.
4. Баранов, А.Ю. Лечение холодом (Криомедицина): руководство для врачей / А.Ю. Баранов // СПб.: Атон, 1999. – 272 с.
5. Westerlund, T. Thermal responses during and after whole–body cryotherapy (-110°C) / T. Westerlund // Journal of Thermal Biology. – 2003. – V. 28. – № 8. – P. 601–608.
6. Smolander, J. Thermal sensation and comfort in women exposed repeatedly to whole–body cryotherapy and winter swimming in ice–cold water / J. Smolander // Physiology & Behavior. □ 2004. □ V. 82. □ № 4. □ P. 691–965.
7. Ходарева, Н.В. Влияние общей воздушной криотерапии на липидный спектр сыворотки крови / Н.В. Ходарева // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. □ 2012. □ № 3. □ P. 36–39.
8. Zalewski, P. Thermal and hemodynamic response to whole–body cryostimulation in healthy subjects / P. Zalewski // Cryobiology. □ 2013. □ V. 66. – №3. □ P. 295–302.
9. Lubkowska, A. Acute effect of a single whole–body cryostimulation on prooxidant–antioxidant balance in blood of healthy, young men / A. Lubkowska // Journal of Thermal Biology. □ 2008. □ V. 33. □ № 8. □ P. 464–467.
10. Lubkowska, A. Changes in lipid profile in response to three different protocols of whole–body cryostimulation treatments / A. Lubkowska // Cryobiology. □ 2010. □ V. 61. □ № 1. □ P. 22–26.
11. Дунаев, А.В. Исследование возможностей тепловидения и методов неинвазивной медицинской спектроскопии в функциональной диагностике / А.В. Дунаев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. □ 2010. – № 6–2 (284). – С. 95–100.
12. Новикова, И.Н. Оценка влияния холодовой прессорной функциональной пробы на изменение параметров микроциркуляторно–тканевых систем / И.Н. Новикова, А.В. Дунаев, А.И. Крупаткин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. □ 2014. □ № 3 (305). □ P. 132–141.
13. Stefanovska, A. Wavelet analysis of oscillations in peripheral blood circulation measured by doppler technique / A. Stefanovska, M. Bracic, H.D. Kvernmo // Biomedical Engineering. □ 2010. □ V. 46. □ № 10. □ P. 1230–1239.

14. Tankanag, A. Application of adaptive wavelet transform for analysis of blood flow oscillations in the human skin / A. Tankanag, N. Chemeris // Phys. Med. Biol. □ 2013. □ V. 53. □ № 21. □ P. 5967–5976.
15. Жердев, А.А. Способы реализации общей криотерапевтической процедуры / А.А. Жердев, А.В. Шакуров, А.А. Щелчков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – С. 189–201.
16. Крупаткин, А.И. Неинвазивная оценка тканевого дыхания у человека с использованием вейвлет-анализа колебаний сатурации крови кислородом и кровотока в микрососудах кожи / А.И. Крупаткин // Физиология человека. – 2012. – Т. 38. – № 4. – С. 67–73.
17. Dunaev, A.V. Investigating tissue respiration and skin microhaemocirculation under adaptive changes and the synchronization of blood flow and oxygen saturation rhythms / A.V. Dunaev // Physiological Measurement. – 2014. – V. 35(4). – № 607. – DOI. 10.1088/0967–3334/35/4/607
18. Крупаткин, А.И. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно–тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: руководство для врачей / А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров – М.: ЛИБРОКОМ, 2013. – 496 с.: ил.
19. Дунаев, А.В. Анализ физиологического разброса параметров микроциркуляторно–тканевых систем / А.В. Дунаев // Биотехносфера. – 2013. – № 5. – С. 44–53. – ISSN 2073–4824.
20. Юнкеров, В.И. Математико–статистическая обработка данных медицинских исследований / В.И. Юнкеров, С.Г. Григорьев // СПб.: ВМедА. – 2002. – 266 с.
21. Волотовская, А.В. Криотерапия: учеб.–метод. пособие / А.В. Волотовская // Минск: БелМАПО, 2010. – 26 с.
22. Баранов, А.Ю. О многостороннем изучении изменений в организме здорового человека в ответ на криотерапевтическое воздействие / А.Ю. Баранов // Вестник СПб ГМА им. И.И. Мечникова. – 2005. – № 6. – С. 147–150.
23. Галанова, С.К. Влияние общей криотерапии на психоэмоциональное состояние пациентов с начальным проявлением недостаточности кровоснабжения мозга / С.К. Галанова, Д.Ш. Альтман, С.Н. Теплова // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. – 2008. – № 4. – С. 12–15.

Новикова Ирина Николаевна

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», инженер–исследователь научно–образовательного центра «Биомедицинская инженерия»
Тел.: +7–4862–41–98–76
E–mail: i.n_novikova@mail.ru

Дунаев Андрей Валерьевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет–УНПК», г. Орёл
Ведущий научный сотрудник научно–образовательного центра «Биомедицинская инженерия», кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел.: +7–4862–41–98–76
E–mail: dunaev@bmccenter.ru

Искоростинский Никита Евгеньевич

Медицинский центр «АЛЬТАИР», г. Орёл
Лаборант
Тел.: +7–4862–54–11–01
E–mail: info@mc–altair.ru

Искоростинский Евгений Владимирович

Медицинский центр «АЛЬТАИР», г. Орёл
Директор, к.м.н.
Тел.: +7–4862–54–11–01
E–mail: info@mc–altair.ru

I.N. NOVIKOVA, E.V. ISKOROSTINSKIY, N.E. ISKOROSTINSKIY, A.V. DUNAEV

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF WHOLE BODY CRYOTHERAPY ON THE PARAMETERS OF MICROCIRCULATORY–TISSUE SYSTEMS OF THE HUMAN BODY

In this article using non–invasive optical methods of laser Doppler flowmetry, tissue reflectance oximetry and pulse oximetry, we investigated the influence whole body cryotherapy (WBC) on the parameters of microcirculatory–tissue systems (MTS) of the human body. Described is the methodology for conducting experiments, detailed analysis of fluctuations of blood flow, estimated the dynamics of measured and calculated complex parameters of tissue respiration. Statistically significant changes of the parameters of the MTS were found immediately after the procedure cryotherapy in relation to the values before WBC and their full recovery after 15–20 min in most researched volunteers.

Keywords: non–invasive diagnostics, laser Doppler flowmetry, tissue reflectance oximetry, pulse oximetry, microcirculatory–tissue system, whole body cryotherapy.

BIBLIOGRAPHY

1. Bogolyubov, V.M. Obshchaya fizioterapii. Uchebnoye posobiye dlya stud. med. vuzov. yed. vuzov / V.M. Bogolyubov, G.N. Ponomarenko // SPb.: Pravda, 1998. – 480 s.
2. Yamauchi, T. Whole body cryotherapy is method of extreme cold –175°C Treatment initially used for rheumatoid arthritis / T. Yamauchi // Z. Phys. Med. Baln. Med. Klim. – 1986. – № 15. – P. 311.

3. Fricke, R. Ganzkörperkältetherapie in einer Kältekammer mit Temperaturen um $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ / R. Fricke // *Z. Phys. Med. Baln. Med. Klim.* – 1989. – V. 18. – № 1. – P. 1–10.
4. Baranov, A.Yu. Lecheniye kholodom (Kriomeditsina): rukovodstvo dlya vrachey / A.Yu. Baranov // SPb.: Aton, 1999. – 272 s.
5. Westerlund, T. Thermal responses during and after whole-body cryotherapy ($-110\text{ }^{\circ}\text{C}$) / T. Westerlund // *Journal of Thermal Biology.* – 2003. – V. 28. – № 8. – P. 601–608.
6. Smolander, J. Thermal sensation and comfort in women exposed repeatedly to whole-body cryotherapy and winter swimming in ice-cold water / J. Smolander // *Physiology & Behavior.* □ 2004. □ V. 82. □ № 4. □ P. 691–965.
7. Khodareva, N.V. Vliyaniye obshchey vozduшной krioterapii na lipidnyy spektr syvorotki krovi / N.V. Khodareva // *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoy fizicheskoy kultury.* □ 2012. □ № 3. □ P. 36–39.
8. Zalewski, P. Thermal and hemodynamic response to whole-body cryostimulation in healthy subjects / P. Zalewski // *Cryobiology.* □ 2013. □ V. 66. – №3. □ P. 295–302.
9. Lubkowska, A. Acute effect of a single whole-body cryostimulation on prooxidant–antioxidant balance in blood of healthy, young men / A. Lubkowska // *Journal of Thermal Biology.* □ 2008. □ V. 33. □ № 8. □ P. 464–467.
10. Lubkowska, A. Changes in lipid profile in response to three different protocols of whole-body cryostimulation treatments / A. Lubkowska // *Cryobiology.* □ 2010. □ V. 61. □ № 1. □ P. 22–26.
11. Dunayev, A.V. Issledovaniye vozmozhnostey teplovideniya i metodov neinvazivnoy meditsinskoy spektrofotometrii v funktsionalnoy diagnostike / A.V. Dunayev // *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii.* □ 2010. – № 6–2 (284). – S. 95–100.
12. Novikova, I.N. Otsenka vliyaniya kholodovoy pressornoj funktsionalnoy proby na izmeneniye parametrov mikrotsirkulyatorno–tkanevykh sistem / I.N. Novikova, A.V. Dunayev, A.I. Krupatkin // *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii.* □ 2014. □ № 3 (305). □ P. 132–141.
13. Stefanovska, A. Wavelet analysis of oscillations in peripheral blood circulation measured by doppler technique / A. Stefanovska, M. Bracic, H.D. Kvernmo // *Biomedical Engineering.* □ 2010. □ V. 46. □ № 10. □ P. 1230–1239.
14. Tankanag, A. Application of adaptive wavelet transform for analysis of blood flow oscillations in the human skin / A. Tankanag, N. Chemeris // *Phys. Med. Biol.* □ 2013. □ V. 53. □ № 21. □ P. 5967–5976.
15. Zherdev, A.A. Sposoby realizatsii obshchey krioterapevticheskoy protsedury / A.A. Zherdev, A.V. Shakurov, A.A. Shchelchikov // *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Mashinostroyeniye».* – 2012. – C. 189–201.
16. Krupatkin, A.I. Neinvazivnaya otsenka tkanevogo dykhaniya u cheloveka s ispolzovaniyem veyvlet-analiza kolebaniy saturatsii krovi kislorodom i krovotoka v mikrososudakh kozhi / A.I. Krupatkin // *Fiziologiya cheloveka.* – 2012. – T. 38. – № 4. – C. 67–73.
17. Dunaev, A.V. Investigating tissue respiration and skin microhaemocirculation under adaptive changes and the synchronization of blood flow and oxygen saturation rhythms / A.V. Dunaev // *Physiological Measurement.* – 2014. – V. 35(4). – № 607. – DOI. 10.1088/0967–3334/35/4/607
18. Krupatkin, A.I. Funktsionalnaya diagnostika sostoyaniya mikrotsirkulyatorno–tkanevykh sistem: kolebaniya, informatsiya, nelineynost: rukovodstvo dlya vrachey / A.I. Krupatkin, V.V. Sidorov – M.: LIBROKOM, 2013. – 496 s.: il.
19. Dunayev, A.V. Analiz fiziologicheskogo razbrosa parametrov mikrotsirkulyatorno–tkanevykh sistem / A.V. Dunayev // *Biotekhnosfera.* – 2013. – № 5. – S. 44–53. – ISSN 2073–4824.
20. Yunkerov, V.I. Matematiko–statisticheskaya obrabotka dannykh meditsinskikh issledovaniy / V.I. Yunkerov, S.G. Grigoryev // SPb.: VMedA. – 2002. – 266 s.
21. Volotovskaya, A.V. Krioterapiya: ucheb.–metod. posobiye / A.V. Volotovskaya // Minsk: BelMAPO, 2010. – 26 s.
22. Baranov, A.Yu. O mnogostoronnem izuchenii izmeneniy v organizme zdorovogo cheloveka v otvet na krioterapevticheskoye vozdeystviye / A.Yu. Baranov // *Vestnik SPb GMA im. I.I. Mechnikova.* – 2005. – № 6. – C. 147–150.
23. Galanova, S.K. Vliyaniye obshchey krioterapii na psikhooemotsionalnoye sostoyaniye patsiyentov s nachalnym proyavleniyem nedostatochnosti krovosnabzheniya mozga / S.K. Galanova, D.SH. Altman, S.N. Teplova // *Fizioterapiya, balneologiya i reabilitatsiya.* – 2008. – № 4. – C. 12–15.

Novikova Irina Nikolaevna

State University ESPC, Orel
Post graduate student degree of the Department «Instrumentation, metrology and certification» of Educational and Research Institute of Information Technology, engineer–researcher of scientific–educational center «Biomedical Engineering»
Tel.: +7–4862–41–98–76
E–mail: i.n_novikova@mail.ru

Iskorostinsky Nikita Evgenievich

Medical center «ALTAIR», Orel
Laboratory assistant
Tel.: +7–4862–54–11–01
E–mail: info@mc-altair.ru

Dunaev Andrey Valerievich

State University ESPC, Orel
Leading Research Fellow of scientific–educational center «Biomedical Engineering», PhD, docent of the Department «Instrumentation, metrology and certification» of Educational and Research Institute of Information Technology
Tel.: +7–4862–41–98–76
E–mail: dunaev@bmccenter.ru

Iskorostinsky Evgeny Vladimirovich

Medical center «ALTAIR», Orel
Director, PhD
Tel.: +7–4862–54–11–01
E–mail: info@mc-altair.ru