

УДК 612.1

DOI: 10.24884/1682-6655-2018-17-2-12-17

ПАМОВА А. П.¹, СУВОРОВ А. В.¹, ФЕДОРОВИЧ А. А.^{1, 2}

Микроциркуляция в коже верхних конечностей и параметры центральной гемодинамики при часовом дыхании чистым кислородом

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Государственный научный центр Российской Федерации «Институт медико-биологических проблем» Российской академии наук, Москва, Россия
123007, Россия, Москва, Хорошевское шоссе, д. 76А

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр профилактической медицины» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия
101990, Россия, Москва, Петроверигский переулок, д. 10, стр. 3
e-mail: anppamova@gmail.com

Статья поступила в редакцию 28.01.18; принята к печати 19.03.18

Реферат

Цель – изучить влияние часовой нормобарической оксигенации (НБО) 100 %-м кислородом на состояние центральной и периферической гемодинамики человека.

Материал и методы. Применили метод лазерной допплеровской флюметрии и капилляроскопии у 10 здоровых мужчин ((27,3±4) года) исходно, на 5–15-й, 45–55-й мин НБО и в период восстановления.

Результаты. Выявлены индивидуальные различия между испытуемыми, зависящие от состояния вегетативной нервной системы, оцениваемой с помощью индекса Кердо (ИК). Испытуемые с ИК <0 имели стабильное состояние микроциркуляции. У испытуемых с ИК >0 отмечалась двухфазная реакция.

Выводы. Физиологический ответ на часовое дыхание чистым кислородом может быть различным и зависит от состояния тонуса вегетативной нервной системы.

Ключевые слова: лазерная допплеровская флюметрия, капилляроскопия, индекс Кердо, нормобарическая гипероксия, внекорабельная деятельность

Для цитирования: Памова А. П., Суворов А. В., Федорович А. А. Микроциркуляция в коже верхних конечностей и параметры центральной гемодинамики при часовом дыхании чистым кислородом. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2018; 17(2):12–17. doi: 10.24884/1682-6655-2018-17-2-12-17

UDC 612.1

DOI: 10.24884/1682-6655-2018-17-2-12-17

ПАМОВА А. П.¹, СУВОРОВ А. В.¹, ФЕДОРОВИЧ А. А.^{1, 2}

Microcirculation in the skin of the upper extremities and the parameters of central hemodynamics with hourly breathing of pure oxygen

¹ State Scientific Center of Russia Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
123007, Russia, Moscow, Horoshevskoe shosse, 76A

² National Medical Research Center for Preventive Medicine of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia
101990, Russia, Moscow, Petroverigskiy street, 10, 3
e-mail: anppamova@gmail.com

Received 28.02.18; accepted 23.03.18.

Summary

The aim of the study was to assessment the effects of normobaric oxygenation (NBO) with 100 % oxygen for 60 minutes on the state of central and peripheral hemodynamics of a humans.

Material and methods. The method of laser Doppler flowmetry and capillaroscopy was used in 10 healthy men (27.3±4) initially, at 5–15, 45–55 minutes of the NBU and during the recovery period.

Results. Individual differences between the testers, depending on the state of the autonomic nervous system, assessed using the Kerdo index (IR), are revealed. The testers with IR <0 had a stable state of microcirculation. A test with an IR >0 showed a two-phase reaction.

Conclusions. The physiological response to hourly breathing with pure oxygen can be different and depends on the state of the tone of the autonomic nervous system.

Key words: laser Doppler flowmetry, capillaroscopy, Kerdo index, normobaric hyperoxia, extravehicular activity

For citation: Памова А. П., Суворов А. В., Федорович А. А. Microcirculation in the skin of the upper extremities and the parameters of central hemodynamics with hourly breathing of pure oxygen. Regional hemodynamics and microcirculation. 2018; 17(2):12–17. doi: 10.24884/1682-6655-2018-17-2-12-17

Введение

В клинической практике нормобарическая оксигенация (НБО) применяется при лечении дыхательной недостаточности [4], для повышения когнитивных способностей, для лечения подводников, баротравм и многих других патологических состояний. Вместе с тем дыхание смесями с высокими концентрациями O_2 сопряжено с локальными и системными физиологическими эффектами [5, 17]. Помимо клинической практики, НБО применяется и в космонавтике. Деятельность космонавтов в условиях полета сопряжена с рядом экстремальных ситуаций, одними из них являются выход в открытый космос и внекорабельная деятельность (ВКД). Перед выходом в открытый космос космонавты в обязательном порядке проходят НБО для обеспечения десатурации организма и предотвращения развития декомпрессионной болезни [6, 10, 19].

При освещении в литературе данной проблемы основное внимание уделяется состоянию церебральной микроциркуляции, а влияние состояние микроциркуляторного русла (МЦР) конечностей отражено в единичных работах [15]. При этом транспорт кровью кислорода к работающим мышцам обеспечивает система кровообращения и, прежде всего, на уровне МЦР [8]. Также в доступной литературе нам не удалось найти источники, описывающие взаимосвязи ВКД с микроциркуляцией верхних конечностей и их влияние на работоспособность космонавтов. Вместе с тем перед работой в скафандре «Орлан» предусмотрена 30-минутная десатурация организма чистым кислородом при давлении 73 кПа [10]. В реальности данная процедура может увеличиваться до 40–60 мин, что и было положено в основу наших исследований. Одновременно с этим нарушения микрокровотока являются ключевыми факторами повышения артериального давления за счет повышения периферического сосудистого сопротивления, что может отразиться на физических возможностях человека при проведении подобной процедуры и на работоспособности космонавтов при ВКД, особенно его верхних конечностей.

Цель исследования – изучить особенности микроциркуляции у человека во время часового дыхания чистым кислородом при нормальном атмосферном давлении для выявления возможных отклонений, влияющих на функциональные возможности верхних конечностей.

Материал и методы исследования

В эксперименте приняли участие 10 практически здоровых мужчин в возрасте 20–34 лет ($27,3 \pm 4$ года), имеющих среднее физическое развитие и средний уровень физической тренированности. Программа исследований была одобрена Комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ ИМБП РАН, а все испытуемые, после ознакомления с целью исследования и методами его проведения, подписали информированное согласие.

Исследование проводили в лаборатории с постоянной температурой $+23 \pm 1$ °C в положении сидя после 15-минутного периода адаптации на обеих верхних конечностях, которые располагались на специальном ложе на уровне сердца. На левой руке регистрировали параметры центральной гемодинамики, на правой –

параметры микроциркуляторного кровотока. После периода адаптации на протяжении 10 мин регистрировали исходные данные, затем в течение 60 мин испытуемые дышали медицинским кислородом, который подавался из 40-литрового баллона через ресивер, клапанную коробку и лицевую маску, из которой выдыхаемый воздух после клапана выдоха поступал в усредняющую емкость и далее в атмосферу. После окончания НБО на протяжении 10 мин регистрировали процесс восстановления. Регистрацию параметров осуществляли в четыре этапа: 1-й этап – фоновый период (10 мин); 2-й этап – 5–15 мин НБО (10 мин); 3-й этап – 45–55 мин НБО (10 мин); 4-й этап – период восстановления после окончания НБО (10 мин).

Параметры центральной гемодинамики регистрировали с помощью прикроватного монитора реаниматолога МПР6-03 («Тритон», Россия). Оценивали уровень артериального давления – систолического и диастолического (САД и ДАД), по ЭКГ рассчитывали частоту сердечных сокращений (ЧСС). Дополнительно монитор позволяет рассчитывать общее периферическое сосудистое сопротивление (ОПСС), ударный объем (УО), систолический индекс (СИ), сердечный выброс (СВ), частоту дыхательных движений (ЧДД) и минутный объем дыхания (МОД). Все параметры измеряли три раза – на 2-й, 5-й и 9-й минутах каждого из этапов. Полученные результаты усредняли.

Исследование функционального состояния резистивных микрососудов проводили лазерным допплеровским флюметром «ЛАКК-02» (НПП «ЛАЗМА», Москва) в области срединной линии наружной поверхности правого предплечья на 4 см выше шиловидных отростков лучевой и локтевой костей. Выбор указанной области обусловлен минимальным количеством артериоло-венуллярных анастомозов и меньшей степенью подверженности внешним влияниям, что позволяет получать информацию о нутритивном (обменном) характере микроциркуляторного кровотока в коже. Оценивали средний уровень тканевой перфузии на протяжении 10 мин и функциональное состояние регуляторных механизмов с помощью амплитудно-частотного анализа колебаний кровотока методом непрерывного вейвлет-преобразования [12]. Уровень перфузии (М) и амплитуды регуляторных механизмов – эндотелиальных (Аэ), нейрогенных (Ан), миогенных (Ам), респираторно связанных (Ад) и пульсовых (Ас) – оценивали в условных перфузионных единицах (пф). Это обусловлено тем, что средняя перфузия в микроциркуляторном русле не может быть выражена в абсолютных единицах, например, в $\text{мл}/\text{с}/\text{мм}^3$ [14].

Параметры капиллярного кровотока оценивали на фоне регистрации ЛДФ компьютерным капилляроскопом «Капилляроскан-01» (ООО «Новые энергетические технологии», Россия) в области ногтевого ложа 4-го (безымянного) пальца правой руки [1, 2]. Оценивали плотность капиллярного русла в 1 мм^2 (ПКС) и размер перикапиллярной зоны (ПЗ) – расстояние от переходного отдела капилляра до максимально удаленной точки кожного сосочка – в мкм (рис. 1).

Обработка полученных результатов была выполнена с помощью пакета программ «Statistica 10», с использованием различных методов статистическо-

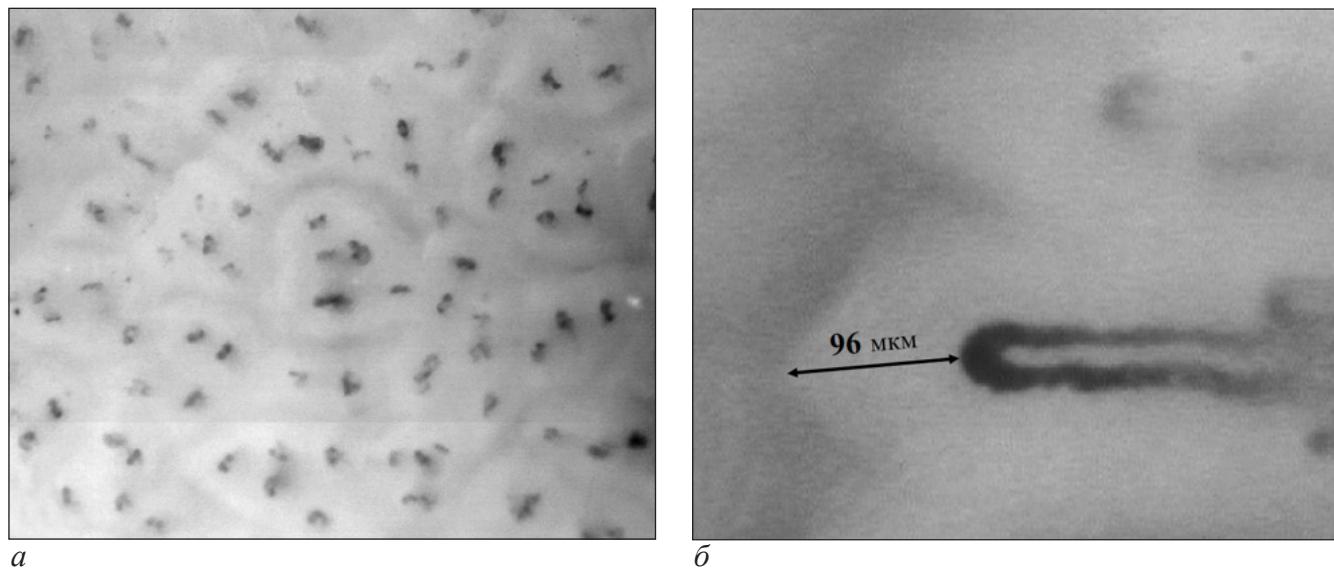


Рис. 1. Капилляроскопия: *а* – количество капилляров в 1 мм² (ПКС); *б* – размер перикапиллярной зоны (ПЗ)
 Fig. 1. Capillaroscopy: *a* – capillary network density in 1 mm² (CD); *b* – the size of the pericapillary space (PS)

го анализа для оценки непараметрических данных и более подробно изложена в следующем разделе.

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе анализа данных мы использовали однофакторный дисперсионный анализ (Краскела–Уоллиса). В результате статистически значимых изменений у 10 испытуемых ни по одному из анализируемых параметров мы не выявили ($p>0,05$), что, вероятнее всего, обусловлено очень малой выборкой. Тем не менее, как видно из данных таблицы, можно говорить об определенных тенденциях. Например, на 45–55-й мин НБО отмечается снижение перфузии и увеличение ПЗ.

Далее мы использовали метод главных компонент [3], который, в конечном итоге, позволяет провести визуальную оценку данных. Значения дисперсии па-

раметров центральной и периферической гемодинамики, полученные с помощью этого метода, были положены в основу набора диаграмм, на которых обозначали интервал в виде $\pm 2\sigma$. Испытуемых, чьи показатели не выходили за интервал $\pm 2\sigma$, включили в группу «А», а испытуемые, чьи показатели частично выходили за границы интервала, вошли в группу «Б». У одного из 10 испытуемых значения, полученные с помощью метода главных компонент, значительно выходили за границы интервала $\pm 2\sigma$, поэтому в дальнейшем мы анализировали его отдельно – «В». В результате использования данного метода было установлено, что выборка изначально являлась не однородной и если анализировать параметры всего у 10 человек как у единой группы, то можно упустить индивидуальные физиологические реакции на НБО.

Параметры дыхания, центральной гемодинамики и микроциркуляции (Ме [Q25; Q75])

Parameters of respiration, central hemodynamics and microcirculation (Me [Q25; Q75])

Показатель	Этап исследования (n=10)			
	1-й (фон)	2-й (5–15-я мин НБО)	3-й (45–55-я мин НБО)	4-й (восстановление)
САД, мм рт. ст.	122 [116; 135]	128 [119; 141]	124 [121; 130]	128 [126; 144]
ДАД, мм рт. ст.	75 [73; 78]	75 [65; 79]	78 [75; 80]	80 [72; 84]
ЧСС, уд./мин	75 [68; 84]	74 [70; 85]	75 [71; 82]	77 [72; 86]
СИ, мл/м ²	3 [2,9;3,3]	2,8 [2,7;3,4]	3 [2,7;3,7]	3,1 [2,8;3,6]
УО, мл	80 [76; 83]	81 [78; 88]	82 [75; 91]	80 [73; 86]
ОПСС, дин/с·см ²	1190 [1163; 1265]	1348 [1115; 1447]	1312 [1143; 1471]	1234 [1141; 1420]
СВ, л/мин	5,9 [5,5; 6,5]	5,5 [5,3; 6,3]	5,6 [5,2; 6,8]	5,7 [5,4; 6,8]
ЧДД, дых./мин	12 [10;14]	13 [9;15]	13 [9;13]	14 [11;15]
МОД, л/мин	10,5 [9,2; 11,4]	13,2 [12,5; 13,6]	14,6 [13,1; 16,5]	11 [10,2; 18,1]
М, пф	3,9 [2,1; 6,2]	4,2 [2,5; 7,7]	2,7 [1,6; 4,3]	2,8 [1,4; 4]
Аэ, пф	0,3 [0,3; 0,4]	0,3 [0,2; 0,4]	0,3 [0,2; 0,4]	0,3 [0,2; 0,4]
Ан, пф	0,4 [0,2; 0,5]	0,3 [0,2; 0,4]	0,4 [0,2; 0,4]	0,4 [0,2; 0,5]
Ам, пф	0,3 [0,2; 0,7]	0,3 [0,1; 0,9]	0,3 [0,2; 0,8]	0,4 [0,2; 0,5]
Ад, пф	0,2 [0,1; 0,2]	0,2 [0,1; 0,3]	0,2 [0,1; 0,4]	0,2 [0,1; 0,3]
Ас, пф	0,09 [0,045; 0,13]	0,09 [0,06; 0,15]	0,08 [0,07; 0,11]	0,08 [0,05; 0,1]
ПЗ, мкм	119 [96,5; 134,5]	118,5 [96,5; 125,5]	125,5 [90,5; 137]	116 [95,5; 125,5]
ПКС, кап./мм ²	66,4 [56,8; 76]	64,8 [58; 70,8]	68 [63,2; 77,6]	59,2 [57,6; 65,6]

Далее параметры дыхания, центральной гемодинамики и микроциркуляторного кровотока у испытуемых «А» и «Б» проанализировали с помощью метода Фридмана по отдельности (на каждом из 4 этапах исследования), в результате чего стало ясно, что изменения есть (Фридман, $p<0,05$). После этого использовали критерий Вилкоксона с применением поправки Бонферрони ($p<0,03$) для определения этапа, на котором эти изменения произошли. В целом испытуемые «А» и «Б» имели стабильное состояние параметров центральной гемодинамики и микроциркуляции, за исключением ДАД в группе «А», которое к периоду восстановления возрастало на 7,7 % по сравнению с фоном (Вилкоксон, $p=0,04$), а в группе «Б» отмечалось увеличение ОПСС на 27 % и прирост на 3 % ЧДД относительно исходных значений (Вилкоксон, $p<0,03$). Поскольку ДАД отражает сопротивление периферических сосудов, его рост может свидетельствовать об уменьшении просвета резистивных артериол, на что косвенно указывает тенденция к снижению уровня кожной перфузии (М) в группе «А». У испытуемых группы «Б» отмечается постепенное увеличение ОПСС к восстановительному этапу исследования (на 26,8 % от исходных значений) и тенденция к снижению М, что также можно расценивать как склонность к уменьшению величины просвета резистивных микрососудов на фоне НБО. ЧДД на этапе восстановления у испытуемых групп «А» и «Б» была несколько выше исходных значений, что, вероятнее всего, связано с адаптацией организма при возврате дыхания обычным воздухом после часовой нагрузки 100 %-м кислородом.

Подобные изменения центральный гемодинамики вполне закономерны и обусловлены сужением микрососудов при НБО, так как органы и ткани не нуждаются в таком количестве кислорода, и это со-

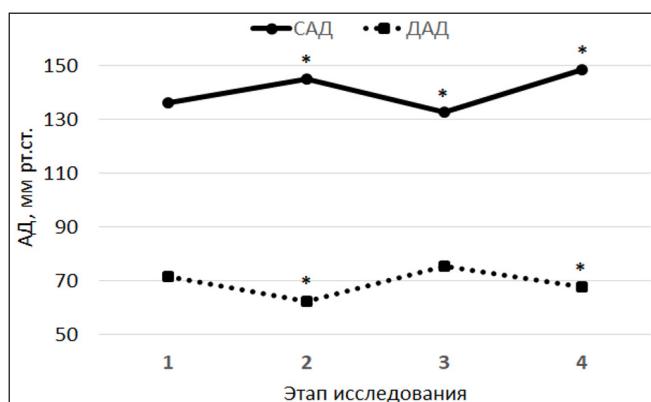


Рис. 2. Параметры артериального давления испытуемого «Б», усредненные по трем измерениям: * – $p<0,05$ относительно исходных значений (критерий наименьшей значимой разности – LSD)

Fig. 2. Parameters of arterial blood pressure of the volunteer «B», averaged over three dimension: * – $p<0.05$ relative to the reference values (LSD)

гласуется с результатами других работ [13, 18]. По данным A. Stirban et al., при НБО в течение 15 мин в коже верхних конечностей на глубине 2 мм отмечается тенденция к снижению перфузии ткани, что, по мнению исследователей, свидетельствует о вазоконстрикции [15]. При этом авторы отмечают менее выраженные изменения МЦР в ногах по сравнению с руками, что подтверждает правильность выбранного нами подхода в оценке влияния НБО на микроциркуляторные процессы в верхних конечностях, учитывая тот факт, что при ВКД космонавтов задействованы именно руки. В ряде других экспериментов [13, 20] также обнаружено снижение перфузии крови в различных регионах кожи человеческого тела (руки, ноги, спина) и слизистой ротовой полости, где время воздействия НБО составляло от 10 до 30 мин.

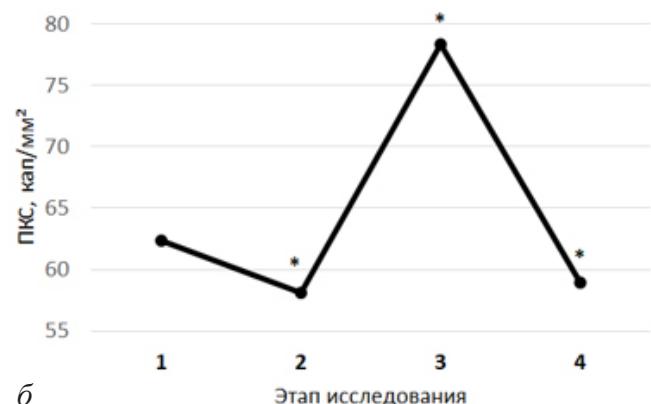
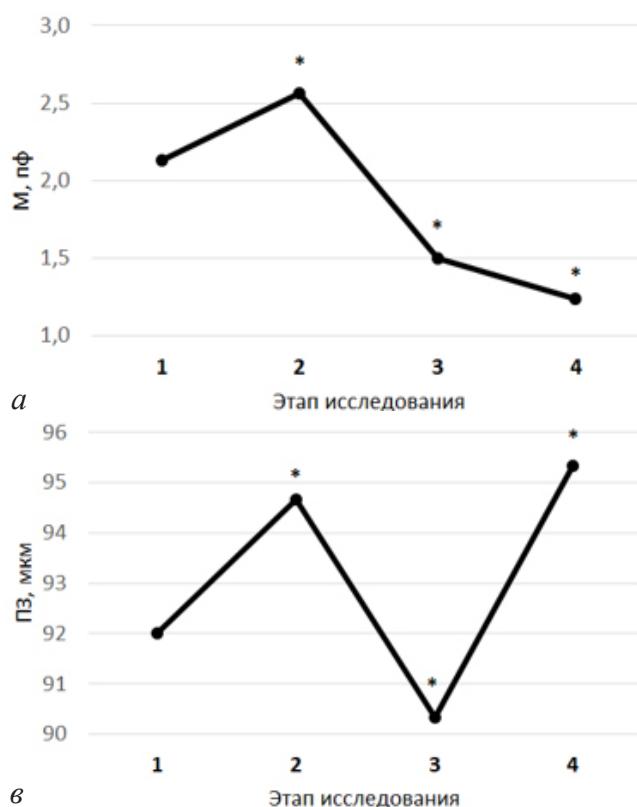


Рис. 3. Параметры микроциркуляции испытуемого «Б»: а – ЛДФ, уровень перфузии (М); б, в – капилляроскопия: б – плотность капиллярной сети (ПКС); в – размер перикарпиллярной зоны (ПЗ); * – $p<0,05$ относительно исходных значений (критерий наименьшей значимой разности – LSD)

Fig. 3. Parameters of microcirculation, «B»-volunteer: а – LDF, level of perfusion (M); б, в – capillaroscopy: б – capillary network density in 1 mm² (CD); в – the size of the pericapillary space (PS); * – $p<0.05$ relative to the reference values (LSD)

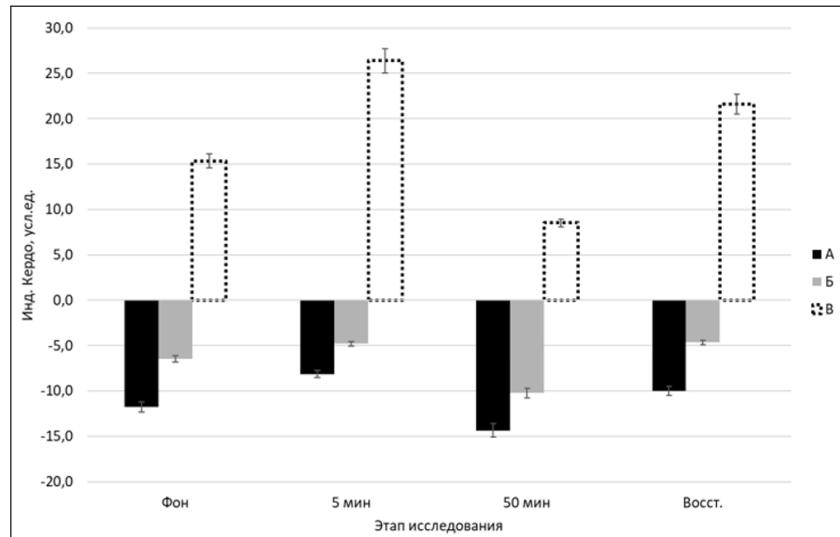


Рис. 4. Среднее значение индекса Кердо с 5 %-й погрешностью на каждом из этапов исследования

Fig. 4. Average value of the Kredo index with a 5 % error at each stage of the study

Испытуемый «В» продемонстрировал наиболее выраженную реакцию на НБО. В начале его параметры гемодинамики были проанализированы с помощью критерия Фридмана на 4 этапах исследования, и были выявлены статически значимые изменения (Фридман, $p<0,05$). Для определения этапа, на котором наблюдались изменения, параметры были проанализированы с помощью критерия наименьшей значимой разницы – LSD. Менялись показатели центральной гемодинамики: САД и ДАД динамически и разнонаправленно колебались в процессе НБО (рис. 2), в то время как СИ, УО и СВ возрастали (на 6, 4, 8 % соответственно), а ОПСС снижалось на 4 % (критерий наименьшей значимой разницы – LSD, $p<0,05$) к периоду восстановления по сравнению с фоном. У данного испытуемого изменялись и параметры микроциркуляторного кровотока. Сначала НБО тканевая перфузия (М) увеличилась, но в дальнейшем она демонстрировала снижение (рис. 3). Количество функционирующих капилляров и степень гидратации интерстициального пространства также достоверно (критерий наименьшей значимой разницы – LSD, $p<0,05$) и противофазно изменялись относительно друг друга (рис. 3).

При амплитудно-частотном вейвлет-анализе достоверной динамики в группах «А» и «Б» нами не получено, а вот у испытуемого «В» к окончанию эксперимента отмечалось статистически значимое снижение относительно исходных значений амплитуды всех тонус-формирующих механизмов, что свидетельствует о повышении их тонуса: Аэ – с 0,26 до 0,1 пф; Ан – с 0,21 до 0,1 пф; Ам – с 0,18 до 0,12 пф соответственно (критерий наименьшей значимой разницы – LSD, $p<0,05$). Полученные у испытуемого «В» данные позволяют говорить о том, что функциональная адаптация МЦР начала развиваться только к окончанию НБО, но центральная гемодинамика перестроиться не успела.

До настоящего времени не существует однозначной теории о том, почему под действием НБО происходит вазоконстрикция. Рассматриваются как

участие эндотелия микрососудов [7], так и функциональное состояние симпатической нервной системы. Так, F. Yamazaki описал, что гипероксия уменьшает вазодилатацию сосудов кожи в ответ на аппликацию к ней ацетилхолина, а в ответ на нитропруссид натрия вазодилатации кожных сосудов вообще не происходит [20]. Другие авторы при симпатэктомии выявили отсутствие вазоконстрикции во время НБО, что также может свидетельствовать о превалирующем влиянии тонуса симпатической нервной системы на состояние МЦР [17].

По литературным данным хорошо известно, что гипербарическая оксигенация приводит к вазоконстрикции, гипертензии, брадикардии и снижению сердечного выброса [9]. Нормобарическая оксигенация имеет схожие, но менее выраженные эффек-

ты на организм [15]. Полученные нами результаты у испытуемых групп «А» и «Б» согласуются с более ранними исследованиями, чего нельзя сказать об испытуемом «В». Для объяснения подобного явления в каждой из групп мы рассчитали индекс Кердо [11] на всех этапах эксперимента. Установлено, что у испытуемого «В» на протяжении всего эксперимента преобладал симпатический тонус регуляции нервной системы (индекс Кердо >0), а у испытуемых групп «А» и «Б» – парасимпатический (индекс Кердо на всех этапах исследования <0). При этом у испытуемых группы «А» индекс Кердо по модулю был больше, чем у испытуемых группы «Б» (рис. 4).

Полученные нами данные свидетельствуют о том, что реакция сердечно-сосудистой системы на НБО зависит от исходного тонуса вегетативной нервной системы. При преобладании влияния симпатической нервной системы (испытуемый «В») часовое дыхание чистым кислородом вызывает более выраженные изменения в состоянии как центральной гемодинамики, так и микроциркуляции, что согласуется с результатами работ других исследователей. На наш взгляд, этот факт необходимо принимать во внимание при прогнозировании реакции на НБО перед медицинскими процедурами, а также перед НБО, которая предшествует работе космонавтов в условиях открытого космоса.

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что влияние нормобарической гипероксии на состояние центральной и периферической гемодинамики в определенной степени зависит от преобладания тонуса симпатической или парасимпатической нервной системы. Мы считаем, что при оценке физиологических реакций на влияние НБО в малых выборках (менее 30 человек) в начале исследования необходимо разделять испытуемых на группы в соответствии с их тонусом, который определяется с помощью индекса Кердо. Для дальней-

шего подтверждения данного вывода необходимо провести подобные исследования с большей выборкой испытуемых, чем было в нашем исследовании (10 человек) с применением поправки Бонферрони.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interests.

Литература / References

1. Аракчеев А. Г., Гурфинкель Ю. И., Пегов В. Г. Компьютерный капилляроскоп для неинвазивных исследований параметров циркулирующей крови // Москов. хирург. журн. – 2010. – № 5. – С. 27–30. [Arakcheev AG, Gurfinkel II, Pevgov VG. Computer capillaroscope for non-invasive studies of circulating blood parameters. Moscow surgical journal. 2010;(5):27-30. (In Russ).]
2. Возможности использования компьютерной капилляроскопии в космической медицине и в клинической практике / Ю. И. Гурфинкель, Н. В. Кац, О. В. Макеева, В. М. Михайлов // Методы нелинейного анализа в кардиол. и онкол. – 2010. – № 2. – С. 111–122. [Gurfinkel YI, Kace NV, Makeeva OV, Mikhailov VM. Possibilities of using computer capillaroscopy in space medicine and in clinical practice. Methods of non-linear analysis in cardiology and oncology. 2010;(2):111-122. (In Russ).]
3. Носовский А. М. Развитие метода многомерного шкалирования применительно к практике медико-биологических исследований // Авиакосм. и эколог. мед. – 2002. – Т. 36. – № 3. – С. 62–66. [Nosovsky AM. Development of multidimensional scaling methods for biomedical research. Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2002; 36(3):62-66. (In Russ).]
4. Cakmak T, Battal B, Kara K et al. A case of tension pneumothorax during hyperbaric oxygen therapy in an earthquake survivor with crush injury complicated by ARDS (adult respiratory distress syndrome). Undersea Hyperb Med. 2015;42(1):9-13.
5. Camporesi EM, Bosco G. Hyperbaric oxygen pretreatment and preconditioning. Undersea Hyperb Med. 2014; 41(3):259-263.
6. Castagna O, Gempp E, Blatteau JE. Pre-dive normobaric oxygen reduces bubble formation in scuba divers. Eur J Appl Physiol. 2009;106(2):167-172. doi: 10.1007/s00421-009-1003-z.
7. Garland CJ, Dora KA. EDH: endothelium-dependent hyperpolarization and microvascular signalling. Acta Physiol. 2017;219(1):152-161. doi: 10.1111/apha.12649.
8. González-Alonso J, Crandall CG, Johnson JM. The cardiovascular challenge of exercising in the heat. J Physiol. 2008;586(1):45-53. doi: 10.1113/jphysiol.2007.142158.
9. Jain KK. Textbook of Hyperbaric Medicine. Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-47140-2.
10. Katuntsev VP. Approaches to decompression safety support of EVA for orbital and interplanetary missions. Acta Astronaut. 2010;66(12):96-101. doi: 10.1016/j.actaastro.2009.05.018.
11. Kérdö I. Ein aus Daten der Blutzirkulation kalkulierter Index zur Beurteilung der vegetativen Tonuslage. Acta Neuroveg. (Wien). 1966;29(2):250-268.
12. Kvandal P, Landsverk SA, Bernjak A et al. Low-frequency oscillations of the laser Doppler perfusion signal in human skin. Microvasc Res. 2006;72(3):120-127. doi: 10.1016/j.mvr.2006.05.006.
13. Orbegozo CD, Puflea F, Donadello K et al. Normobaric hyperoxia alters the microcirculation in healthy volunteers. Microvasc Res. 2015;98:23-28. doi: 10.1016/j.mvr.2014.11.006.
14. Stefanovska A, Bracic M. Physics of the human cardiovascular system. Contemp Phys. 1999;40(1):31-35. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/001075199181693>.
15. Stirban A, Lentrot S, Nandreas S et al. Functional changes in microcirculation during hyperbaric and normobaric oxygen therapy. Undersea Hyperb Med. 2009;36(5):381-390.
16. Thomas PS, Hakim TS, Trang LQ et al. The synergistic effect of sympathectomy and hyperbaric oxygen exposure on transcutaneous Po₂ in healthy volunteers. Anesth Analg. 1999;88(1):67-71. doi: 0.1097/00000539-199901000-00013.
17. Thomson AJ, Drummond GB, Waring WS et al. Effects of short-term isocapnic hyperoxia and hypoxia on cardiovascular function. J Appl Physiol. 2006;101(3):809-816. doi: 10.1152/japplphysiol.01185.2005.
18. Ulker P. The effect of acute and short term normobaric hyperoxia on hemorheologic parameters. Biorheology. 2016; 53(3):171-177. doi: 10.3233/BIR-16096.
19. Webb JT, Pilmanis AA, Kannan N, Olson RM. The effect of staged decompression while breathing 100% oxygen on attitude decompression sickness. Aviat Space Environ Med. 2000;71(7):692-698.
20. Yamazaki F. Hyperoxia attenuates endothelial-mediated vasodilation in the human skin. J Physiol Sci. 2007;57(1): 81-84. doi: 10.2170/physiolsci.SC011006.

Информация об авторах

Памова Анастасия Петровна – аспирант, младший научный сотрудник Лаборатории физиологии кардиореспираторной системы и баромедицины ФГБУН «Государственный научный центр Российской Федерации "Институт медико-биологических проблем"» Российской академии наук, e-mail: anppamova@gmail.com.

Суровов Александр Владимирович – доктор медицинских наук, заведующий Лабораторией физиологии кардиореспираторной системы и баромедицины ФГБУН «Государственный научный центр Российской Федерации "Институт медико-биологических проблем"» Российской академии наук, e-mail: suvalex@inbox.ru.

Федорович Андрей Александрович – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник Лаборатории физиологии кардиореспираторной системы и баромедицины, ФГБУН «Государственный научный центр Российской Федерации "Институт медико-биологических проблем"» Российской академии наук, старший научный сотрудник Отдела фундаментальных и прикладных аспектов ожирения ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр профилактической медицины» Минздрава России, e-mail: faa-micro@yandex.ru.

Authors information

Pamova Anastasia P. – postgraduate student, junior researcher Laboratory of Physiology of Cardiorespiratory System and Baromedicine State Scientific Center of Russia Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, e-mail: anppamova@gmail.com.

Suvorov Alexander V. – Doctor of Medical Sciences, Head Laboratory of Physiology of Cardiorespiratory System and Baromedicine State Scientific Center of Russia Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, e-mail: suvalex@inbox.ru.

Fedorovich Andrey A. – Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher Laboratory of Physiology of Cardiorespiratory System and Baromedicine State Scientific Center of Russia Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Senior Researcher of Fundamental and Applied Aspects of Obesity Department Federal State Institution «National Medical Research Center for Preventive Medicine» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, e-mail: faa-micro@yandex.ru.