

УДК 612.135

РЕАКЦИИ СОСУДОВ МИКРОГЕМОЦИРКУЛЯЦИИ В ГОЛОВНОМ МОЗГЕ ПРИ ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

М.В. Воротникова, Ю.Ф. Зеркалова, М.В. Балыкин

Ульяновский государственный университет

Рассмотрены изменения газового состава крови и реакции сосудов микрогемодициркуляторного русла в различных отделах головного мозга при физических нагрузках. Физические нагрузки, наряду с напряжением функциональных систем, сопровождаются возникновением гипоксических состояний – гипоксии нагрузки. В основе лежит несоответствие между кислородным запросом локомоторных, респираторных мышц и внутренними органами в «борьбе за кислород». Изменения газового состава крови приводят к регионарным реакциям сосудов микрогемодициркуляции во всех отделах головного мозга.

Ключевые слова: головной мозг, микрогемодициркуляторное русло, физическая нагрузка, гипоксия нагрузки.

Введение. Известно, что адекватной моделью изучения компенсаторно-приспособительных реакций сердечно-сосудистой системы является физическая нагрузка, которая позволяет оценить состояние регуляторных механизмов и функциональные возможности системной и регионарной динамики [4; 3].

Показано, что при интенсивных физических нагрузках происходит перераспределение кровотока в локомоторные, респираторные мышцы и органы, принимающие участие в обеспечении мышечной деятельности (сердце, печень, надпочечники и т.д.) [1; 3]. При этом имеются сведения, что при увеличении системного артериального давления, кровоснабжение головного мозга при мышечной деятельности варьирует в незначительных пределах [4; 7], что связывают с его топографией (ригидная черепная коробка) определяющей механизмы регуляции церебрального кровообращения [8; 9].

Установлено, что удовлетворение кислородного запроса в различных отделах головного мозга, при ограничении артериального притока, осуществляется за счет его внутриорганного перераспределения [9; 10]. Имеются сведения о ведущей роли гуморальной и местной (метаболической) регуляции мозгового кровообращения в этих условиях [2; 11; 12; 13], которые реализуются на уровне микроциркуляторного русла. При этом сведения об изменениях сосудов микроцирку-

ляции в головном мозге при физических нагрузках ограничены единичными исследованиями. Исходя из этого в рамках проведенного исследования была поставлена задача оценить изменения газового состава крови и реакции сосудов микрогемодициркуляции в различных отделах головного мозга у крыс при околопредельных физических нагрузках.

Материалы и методы. Исследования проводились на белых беспородных, половозрелых лабораторных крысах-самцах массой 180–200 г. Моделью физической нагрузки служило плавание при температуре воды 27–28 °С. Нагрузки выполнялись до утомления и регламентировались отказом животных от работы. Тренировки проводились ежедневно, 6 раз в неделю, на протяжении 30 суток. Животных выводили из опыта на 1, 3, 7, 15 и 30 сутки с учетом рекомендаций «Правила проведения работ с использованием экспериментальных животных» (Приказ Минвуза от 13.11.1984 г. №724). Под эфирным наркозом брали кровь из правого и левого желудочков сердца анаэробно в стеклянные гепаринизированные шприцы, которые помещались на лед для определения газового состава и кислотно-основного состояния (КОС) крови. В образцах артериальной и смешанной венозной крови определяли напряжение O_2 (PaO_2 , PvO_2), CO_2 ($PaCO_2$, $PvCO_2$) и pH (pHa , pHv) с использованием

газоанализатора АМЕ1 (Дания). По нормограммам Зиггаард-Андерсена, построенным для крови крыс, рассчитывали содержание (CaO_2 , SvO_2) кислорода в крови и показатели КОС. Насыщение крови кислородом (SaO_2 , SvO_2) определяли при помощи кюветного оксигемометра 057 М.

В эксперименте проводилось исследование количественных изменений микроциркуляторного русла в различных отделах головного мозга. Для этого использовалась методика прижизненного инъецирования кровеносного русла водной взвесью черной туши в разведении 1:1 [5]. Инъекционная масса вводилась в кровеносное русло через левый желудочек сердца. После эвтаназии осуществляли трепанацию черепа и извлекали образцы головного мозга, которые фиксировали в 10 %-м нейтральном формалине с последующей проводкой по спиртам возрастающей концентрации и заключением в парафин. Из этого материала готовились просветленные микропрепараты общепринятыми методиками, толщиной 5 и 20 мкм. При необходимо-

сти просветленные препараты докрашивались гематокселин-эозином. На препаратах подсчитывали количество капилляров в стандартном поле зрения (N_c), наружный ($D_{a \text{ нар.}}$) и внутренний ($D_{a \text{ вн.}}$) диаметры артериол и венул (D_v). Измерения проводились с использованием окуляр-микрометра МОВ-1-15х и сетки Автандилова [2; 5].

Для математической обработки полученных данных использовались методы статистического анализа [6]. В качестве достоверного уровня значимости использовалась вероятность $p < 0,05$, которая применяется в биологических исследованиях [6].

Результаты и обсуждение. Результаты исследования показали, что при предельных плавательных нагрузках (тренировках) газовый состав и рН артериальной крови зависят от сроков адаптации к мышечной деятельности. В 1–7-е сутки тренировки физические нагрузки приводят к выраженной артериальной гипоксемии, повышению PaCO_2 при наличии смешанного метаболического и респираторного ацидоза (табл. 1).

Таблица 1

Газовый состав артериальной крови в покое и после физической нагрузки на разных этапах плавательной тренировки ($M \pm m$)

Показатели	Контроль	Физическая нагрузка (плавание), сутки			
		1	7	15	30
$p\text{O}_2$, мм рт.ст.	96,0±1,0	87,5±2,2*	98,5±1,7	97,5±1,7	98,3±2,2
SaO_2 , %	96,5±0,2	93,3±0,9*	94,0±0,9*	97,5±1,1	97,2±0,8
CaO_2 , об. %	18,0±0,7	18,5±1,0	17,9 ±0,8	19,6±1,0	20,2±0,9
pHa	7,39±0,01	7,33±0,01*	7,35 ±0,01*	7,44±0,02*	7,4±0,01*
PaCO_2 , мм рт.ст.	37,0±1,5	42,8±2,1*	39,5±2,2	33,1±1,2*	34,0 ±0,8

Примечание. * – здесь и далее различия достоверны по сравнению с контролем ($p < 0,05$).

В последующие сроки эксперимента (15–30 сутки) артериальная гипоксемия при нагрузках полностью компенсирована, о чем свидетельствует повышение PaO_2 и при смещении КОС крови в сторону респираторного алкалоза, что указывает на повышение эффективности внешнего дыхания и газообмена в легких.

На этом фоне имели место отчетливые реактивные изменения со стороны сосудов

микроциркуляции во всех отделах головного мозга.

Установлено, что на всем протяжении эксперимента в теменной доле коры реактивные изменения прослеживаются во всех звеньях микроциркуляторного русла (табл. 2).

Отмечается достоверное увеличение внутреннего и наружного диаметров артериальных сосудов, что коррелирует с метаболи-

ческим сдвигом КОС в артериальной крови. Наряду с увеличением просвета приносящих сосудов происходит значительное увеличение числа функционирующих капилляров с максимальным пиком на 3 сутки, что свидетельствует о высокой реактивности микро-

судов при физических нагрузках. На этом фоне диаметр вен и венул повышен, характеризуя хороший венозный отток.

Иные соотношения установлены в белом веществе теменной доли (табл. 3).

Таблица 2

Изменение микроциркуляторного русла в теменной доле коры головного мозга при физических нагрузках в разные сроки тренировки плаванием (M±m)

Показатели	Продолжительность тренировки (сутки)					
	Контроль	1 сутки	3 сутки	7 сутки	15 сутки	30 сутки
Артериолы						
Д.а.нар., мкм	23,97±1,0	27,3±0,97*	25,7±1,1	24±0,78	24,6±1,2	25,0±0,9
Д.а.вн., мкм	14,0±0,48	17,7±0,94*	17,0±0,67	16,9±0,6*	16,5±0,24*	17,8±0,9*
Капилляры						
N, мм ²	115,0±4,7	130,7±3,3*	138,5±6,5*	133±5,3*	123,4±3,9	136,4±7,2*
Венулы						
Д.в., мкм	13,5±0,22	20,5±0,89*	17,0±1,7*	18,0±0,9*	20,2±0,78*	23,7±1,0*

Таблица 3

Изменение микроциркуляторного русла в белом веществе теменной доле коры головного мозга при физических нагрузках в разные сроки тренировки плаванием (M±m)

Показатели	Продолжительность тренировки (сутки)					
	Контроль	1 сутки	3 сутки	7 сутки	15 сутки	30 сутки
Артериолы						
Д.а.нар., мкм	15,1±1,2	13,5±0,75	14,1±0,97	13,8±1,2	15,5±0,65	14,6±0,9
Д.а.вн., мкм	8,1±0,85	6,4±0,56	6,1±0,45*	7,2±1,0	7,0±0,99	7,2±0,76
Капилляры						
N, мм ²	58,9±1,2	45,8±1,8*	52,6±1,04*	51,6±1,9	61,9±2,7	44,5±1,0*
Венулы						
Д.в., мкм	7,4±0,76	19,0±1,6*	18,7±0,92*	14,3±0,9*	13,9±1,0*	15,1±0,95*

Установлено, что в прилежащих участках белого вещества теменной доли диаметр артериальных сосудов и капилляризация нервной ткани достоверно снижены на всем протяжении тренировки. Эти данные свидетельствуют о наличии перераспределительных реакций между корковыми и подкорковыми отделами головного мозга. Таким образом, прослеживается жесткая регуляция мозгового кровотока при максимизации системного кровообращения, ограничивающая артериальный приток, и, соответственно, объем жидких сред в ригидной черепной коробке.

Для сравнения реакций микроциркуляторного русла на действие физической нагрузки было проведено исследование микроциркуляторного русла гипоталамуса, продолговатого мозга и мозжечка, имеющих более сложные пути притока, включая магистральные позвоночные артерии.

Поскольку гипоталамус является высшим вегетативным центром, можно предположить, что при физических нагрузках функциональная активность гипоталамуса резко возрастет, что требует усиленной перфузии органа (табл. 4).

Таблица 4

Изменение микроциркуляторного русла в гипоталамусе у крыс в контроле и при физических нагрузках в разные сроки тренировки плаванием (M±m)

Показатели	Продолжительность тренировки (сутки)					
	Контроль	1 сутки	3 сутки	7 сутки	15 сутки	30 сутки
Артериолы						
Д.а.нар., мкм	12,73±0,78	15,73±0,65*	17,0±0,72*	19,0±1,7*	17,17±1,2*	15,0±0,76*
Д.а.вн., мкм	6,76±0,74	8,0±0,47	9,11±0,87*	12,5±1,0*	10,0±0,67*	8,59±0,48
Капилляры						
N, мм ²	567,1±17,3	665,3±25,1*	618±24,4*	589±20,1	589,2±24,5	794,3±39*
Венулы						
Д.в., мкм	7,5±0,85	12,36±0,61*	14,13±1,4*	15,3±0,9*	12,5±0,67*	14,0±0,96*

Действительно, результаты исследования показали, что в гипоталамусе при физических нагрузках, начиная с первого сеанса и до 30 суток тренировки, внутренний просвет артериол достоверно повышен, что свидетельствует об интенсивности артериального притока в орган. Характерно, что если в первые 7–15 суток на гистологических препаратах отмечается некоторое разрыхление сосудистой стенки, то к 30-м суткам тренировки визуально прослеживается ее уплотнение с признаками гипертрофии гладкомышечных клеток и внутренней мембраны. Эти данные свидетельствуют о формировании адаптивных сосудистых изменений, развивающихся в ответ на увеличение перфузионного давления в процессе ежедневных физических тренировок. В соответствии с изменением тону-

са в артериальном звене имеет место увеличение количества функционирующих капилляров при снижении диффузионных расстояний для O₂. Характерно, что в гипоталамусе имеет место двух- и более кратное увеличение диаметра венул. Таким образом, результаты свидетельствуют о высокой реактивности всех звеньев микрогемодикуляторного русла в гипоталамусе при физических нагрузках на всем протяжении месячной тренировки плаванием.

Мозжечок является одной из структур головного мозга, принимающих участие в координации произвольных и непроизвольных движений, что предполагает увеличение функциональной активности его структур при мышечной деятельности (табл. 5).

Таблица 5

Изменение микроциркуляторного русла в мозжечке у крыс в контроле и при физических нагрузках в разные сроки тренировки плаванием (M±m)

Показатели	Продолжительность тренировки (сутки)					
	Контроль	1 сутки	3 сутки	7 сутки	15 сутки	30 сутки
Артериолы						
Д.а.нар., мкм	14,17±0,79	17,76±1,03*	18,7±1,0*	20,0±0,9*	14,72±1,58	14,9,0±0,74
Д.а.вн., мкм	7,7±0,49	10,4±0,85*	10,58±0,3*	10,8±0,3*	7,61±0,81	7,4±0,23
Капилляры						
N, мм ²	122±4,1	132,3±5,5	140,5±5,0*	116,2±6,3	110,1±3,4*	125,5±5,4
Венулы						
Д.в., мкм	12,6±0,97	18,57±0,88*	19,62±1,0*	16,4±0,8*	13,2±0,74	21,53±0,9*

Так, просвет артериальных, венозных микрососудов и количество функционирующих капилляров в мозжечке при физической нагрузке увеличиваются лишь на 1–3 сутки тренировки, с последующим снижением показателей, приближенным к данным в контроле. Оценивая полученные данные, можно полагать, что постепенное снижение активности нервных центров и, соответственно, ограничение регионарного кровотока связаны с формированием двигательного навыка у

крыс и экономизацией их двигательных функций при плавании.

Множество сенсорных, проводниковых и рефлекторных функций определяют полифункциональность продолговатого мозга в обеспечении мышечной деятельности. Кровеносное русло продолговатого мозга принимает непосредственное участие в организации гуморально-гормональных связей в организме и регуляции вегетативных функций при физических нагрузках (табл. 6).

Таблица 6

Изменение микроциркуляторного русла в продолговатом мозге у крыс в контроле и при физических нагрузках в разные сроки тренировки плаванием ($M \pm m$)

Показатели	Продолжительность тренировки (сутки)					
	Контроль	1 сутки	3 сутки	7 сутки	15 сутки	30 сутки
Артериолы						
Д.а.нар., мкм	19,2±0,98	21,3±0,85	22,4±0,32*	23,9±0,7*	22,3±0,78*	21,2±1,05
Д.а.вн., мкм	12,5±0,45	15,4±0,51*	14,0±0,83	15±0,34*	14,6±0,72*	14,1±0,82*
Капилляры						
N, мм ²	71,3±2,2	116,0±3,4*	95,7±2,3*	105±7,8*	94,5±2,7*	90,0±2,9*
Венулы						
Д.в., мкм	14,02±0,97	16,48±1,30	19,5±1,02*	21,6±0,6*	18,2±0,87*	17,2±0,52*

Результаты исследования продолговатого мозга свидетельствуют о высокой реактивности сосудов микрогемодикуляции при физических нагрузках на всех этапах месячной адаптации к мышечной деятельности. Можно полагать, что высокое перфузионное давление в позвоночных артериях приводит к расширению просвета артериол. Нельзя исключить действие на сосудистую стенку химических изменений в ликворе, т.к., по литературным данным, рН при физических нагрузках сдвигается в кислую сторону [1; 13].

Выводы

1. Анализ реакций сосудов микрогемодикуляции в различных отделах головного мозга при физических нагрузках свидетельствует, что в наибольшей степени они выражены в коре головного мозга, гипоталамусе и продолговатом мозге независимо от сроков тренировки, что обеспечивает стабильно высокий кровоток в нервных центрах, обеспе-

чивающих вегетативное поддержание мышечной деятельности.

2. Реактивность сосудов микрогемодикуляции при физических нагрузках в регионах белого вещества и мозжечка увеличивается в начальный период физической нагрузки (тренировки) и снижается по мере увеличения ее продолжительности.

1. *Балыкин, М.В.* Газы крови и органный кровоток у собак при физических нагрузках в горах / М.В. Балыкин, Х.Д. Каркобатов, Е.В. Орлова // Физиологический журнал им. И.М. Сеченова. – 1993. – Т. 79. – №11. – С. 78–85.

2. *Верещагин, Н.В.* Мозговое кровообращение / Н.В. Верещагин, В.В. Борисенко, А.Г. Влащенко // Современные методы исследования в клинической неврологии. – М. : Интер-Весы, 1993. – 208 с.

3. Газовый состав и кислотно-основное состояние крови при гипоксии различного генеза / М.В. Балыкин и др. // Материалы III Всероссийской конф. с международным участием «Медико-

физиологические проблемы экологии человека». – Ульяновск, 2009. – С. 29–30.

4. Изменение мозгового кровотока у спортсменов при физических нагрузках / М.В. Балькин и др. // Современные проблемы и развитие физической культуры и спорта: Материалы Международной науч.-практической конф. – Архангельск, 1998. – С. 154.

5. Катинас, Г.С. К методике анализа количественных показателей в цитологию / Г.С. Катинас, Ю.З. Полонский // Цитология. – 1970. – Т. 12. – №3. – С. 399–403.

6. Лакин, Г.Ф. Биометрия / Г.Ф. Лакин. – М. : ВШ. – 1990. – 253 с.

7. Макарова, Т.Г. Реактивность мозгового кровообращения при повторных гипоксически-гиперкапнических воздействиях / Т.Г. Макарова, И.В. Антипов, М.В. Балькин // Вестн. Тверского гос. ун-та, серия «Биология». – Тверь, 2008. – №7(67). – С. 20–26.

8. Москаленко, Ю.Е. Кровоснабжение головного мозга / Ю.Е. Москаленко // Физиология

кровообращения. Физиология сосудистой системы (Руководство по физиологии). – Л. : Наука. – 1984. – С. 352–358.

9. Москаленко, Ю.Е. Мозговое кровообращение. Физико-химические приемы изучения / Ю.Е. Москаленко, А.И. Бекетов, Р.С. Орлов. – Л. : Наука, 1988. – 160 с.

10. Мчедlishvili, Г.И. Функция сосудистых механизмов головного мозга. Их роль в регуляции и в патологии мозгового кровообращения / Г.И. Мчедlishvili. – Л. : Наука, 1968. – 204 с.

11. Babikian, V.L. Transcranial Doppler Ultrasonography / V.L. Babikian, L.R. Wechsler. – Mosby – Year Book. Inc. – 1993. – 80 p.

12. Critical analysis of cerebrovascular autoregulation during reheated head-up titl / R.L. Hughson и др. – Stroke. – 2001 Oct. – V. 32, №10. – P. 2403–2408.

13. Lee, J.S. Microvascular volume changes induced by exercise, heat exposure, or endotoxin injection / J.S. Lee // Amer. J. Physiol. – 1994. – V. 267, №3. – Pt. 2. – H. 1142–1150.

REACTION OF MICROHEMOCIRCULATION VESSELS IN BRAIN AT PHYSICAL EXERCISE

M.V. Vorotnikova, Y.F. Zerkalova, M.V. Balykin

Ulyanovsk State University

The changes in the gas blood composition and reaction of microhemocirculation vessels in different parts of brain at while doing physical exercises. Physical exercises together with tension of functional systems are accompanied by hypoxia – hypoxia of exercise. The discrepancy between oxygen request of locomotory, respiratory muscles and internal organs in “oxygen fights” is in the base of these processes. The change in gas blood composition leads to regional reactions of microhemocirculation vessels in all parts of brain.

Keywords: brain, microhemocirculation bed, physical exercise, hypoxia of exercise.