

10. Gifford R. *Environmental Psychology: Principles and Practice*. 5th ed. Colville, WA: Optimal Books; 2014. 599.
11. Krasnova O.V., Galasyuk I.N., Shinina T.V. *Psikhologiya lichnosti pozhilykh lyudey i lits s ogranicheniyami zdorov'ya* [Psychology of elderly people and persons with limited health]. Moscow; 2010. 200 (in Russian).
12. Elyutina M.E., Bolotov G.I. Povsednevnyaya zhizn' pozhiloy sem'i: strategiya planirovaniya i zhestkoy ekonomii resursov [Everyday life of an elderly family: strategy for planning and austerity]. *Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Sotsiologiya. Politologiya*. 2017; 17 (1): 10–15 (in Russian).
13. Shapovalenko I.V. *Vozrastnaya psikhologiya (Psikhologiya razvitiya i vozrastnaya psikhologiya)* [Age psychology (Developmental psychology and developmental psychology)]. Moscow; 2005. 349 (in Russian).
14. Krasnova O.V., Lidars A.G. *Sotsial'naya psikhologiya stareniya: ucheb. posobie dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy* [Social psychology of aging: Manual for graduate students]. Moscow. 2002. 288 (in Russian).
15. Stokols D., Misr S., Runnerstro M.G., Hipp J.A. Psychology in an Age of Ecological Crisis: From Personal Angst to Collective Action. *American Psychologist*. 2009; 64: 181–193.
16. Show B. *Nazad k Mafusailu* [Back to Methuselah]. Moscow; 1980. 383 (in Russian).

УДК 612.285-897+797.212

DOI 10.23648/UMBJ.2018.31.17224

ОСОБЕННОСТИ МЕЖСИСТЕМНОЙ ИНТЕГРАЦИИ И ХЕМОРЕАКТИВНОСТИ КАРДИОРЕСПИРАТОРНОЙ СИСТЕМЫ СПОРТСМЕНОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ СПОРТИВНОЙ КВАЛИФИКАЦИИ

Н.В. Балиоз, В.И. Баранов, Ю.В. Боброва, В.Э. Диверт, С.Г. Кривошеков

*Научно-исследовательский институт физиологии и фундаментальной медицины,
г. Новосибирск, Россия*

e-mail: krivosch@physiol.ru

Понимание адаптивных изменений в механизмах регуляции газообмена и кислородного обеспечения организма в зависимости от уровня спортивного мастерства актуально для управления тренировочным процессом.

Цель исследования – изучить особенности адаптивных реакций спортсменов циклических видов спорта разного уровня подготовки в ответ на гипоксическую и гиперкапническую нагрузку.

Материалы и методы. Обследованы пловцы и легкоатлеты-бегуны (все мужчины) высокого и среднего уровня спортивной квалификации в возрасте от 18 до 23 лет. Регистрация кардиореспираторных показателей проводилась на эргоспирометрической системе OxyconPro® (Erich

Jaeger). Спортсмены-пловцы подвергались отдельным воздействиям: а) плавно нарастающей (с 20,9 до 10 % O₂) гипоксии в течение 25 мин; б) плавно нарастающей гиперкапнии (дыхание в замкнутое пространство) в течение 25 мин. Спортсмены-бегуны испытывали воздействие острой (10 % O₂) гипоксии в течение 10 мин.

Результаты. Для высококвалифицированных спортсменов-пловцов характерно снижение ответных реакций сердца на гипоксию и меньшая чувствительность к изменениям парциального давления кислорода в альвеолярном газе. При этом у пловцов высокой спортивной квалификации

происходит совершенствование механизмов межсистемной интеграции, что обеспечивает повышение «точности» физиологической настройки в изменениях вентиляторных и сердечных ответов на гипоксическое и гиперкапническое воздействие. Для высококлассных спортсменов-легкоатлетов (бегунов на средние дистанции) различий в абсолютных значениях кардиореспираторных показателей в ответ на дыхание гипоксической смесью по сравнению со спортсменами более низкой квалификации не наблюдается, но, так же как и у пловцов, отмечается совершенствование механизмов межсистемной интеграции – повышение «точности» настройки газообменной регуляции ответа на внутреннюю гипоксическую гиперкапнию, проявляющееся в усилении тесноты обратной связи прироста легочной вентиляции и прироста давления CO_2 в артериальной крови.

Выводы. Усиление межсистемной интеграции обеспечивает оптимальность хемореактивных ответов на гипоксические и гиперкапнические возмущения газового гомеостаза организма и отражает «точность» адаптивных настроек кардиореспираторной системы у спортсменов высокого класса при интенсивных аэробных нагрузках.

Ключевые слова: спортсмены высокого класса, хемореактивность, гипоксия, гиперкапния, кардиореспираторная система.

Введение. Профессиональные спортивные тренировки, как правило, сопровождаются специфическими для конкретного вида спорта адаптивными изменениями системы кислородного обеспечения организма. В связи с этим ведутся поиски физиологических критериев функциональных резервов организма спортсменов и способов контроля тренировочных процессов. Одним из перспективных направлений является исследование адаптивных изменений хеморефлекторной регуляции газообмена на возмущающее внешнее воздействие (гипоксия, гиперкапния) [1–3]. На сегодняшний день подробно описаны базовые механизмы регуляции кислородтранспортных процессов в организме в покое и при мышечной работе. Необходимо отметить следующие важные моменты. Отклонения давления крови и уровней содержания в ней углекислого газа и кислорода воспринимаются рецепторами рефлексогенных зон в области дуги аорты, разветвления сонных артерий, устья вен у предсердий и в области ствола мозга, влияющими через нейронные сети на дыхательную и сердечно-сосудистую системы. При этом активируются как собственные рефлексы в кардиореспираторной системе, так и сопряженные с другими системами организма [4, 5]. Анализ влияния активации хеморецепторов при гипоксии и гиперкапнии на сердечно-сосудистые реакции и

вегетативную нервную систему показал, что гипоксемия вызывает больший прирост периферического сопротивления и частоты сердечных сокращений по сравнению с гиперкарбией [6]. В зависимости от силы хеморефлекторного раздражения функциональная нагрузка на сердце сохраняется или увеличивается [7]. Длительное изменение состава вдыхаемого воздуха от атмосферного до гипоксического вызывает сдвиг порогов для дыхательных реакций и симпатической активности, а также реакций сердца во время возвратного гиперкапнического теста [8, 9]. Это позволяет предполагать существование выраженной интеграции дыхательных и сердечно-сосудистых реакций при хеморецепторных воздействиях. Исходя из постулата, что для повышения физиологических резервов кровообращения, дыхания и энергообмена важна согласованная деятельность легких, сердца, сосудов, а также согласованность проявлений кислородтранспортных и реологических свойств крови, можно допустить, что для высококлассных спортсменов характерно совершенствование механизмов комплексной регуляции газообмена, в которые вовлечены хемореактивные свойства и вегетативная регуляция. Однако остается нерешенным вопрос о том, как строятся эти взаимодействия.

Очевидно, что адаптивные (аллостатические) изменения, которые происходят в механизмах регуляции

газообмена организма, не могут иметь простой линейный характер. В регуляции участвует множество подсистем, взаимодействие которых обеспечивает необходимый результат. В 2014 г. P. Guyenet опубликовал схему, в которой показал место хеморефлексов в регуляции системного гомеостаза организма [10]. Согласно этой схеме контроль уровней CO_2 и O_2 в крови осуществляется системами гомеостатирования, включающими афферентные звенья – периферические (каротидные) и центральные хеморецепторы, имеющие прямые и обратные связи с центральным водителем дыхательного ритма, которые через структуры автономной нервной системы влияют на систему кровообращения – тонус сосудов и работу сердца. В свою очередь барорецепторы сосудистой системы, участвующие в контроле АД, имеют обратное влияние на систему дыхания. Автором прослежены сердечно-легочные реакции на спинном и понтомедуллярном уровнях и описана регуляция газообмена при изменениях газоснабжения организма. Этим также объясняется тот факт, что острые возмущения в газах крови вызывают изменения психологического состояния: пробуждение, аверсивные ощущения, стресс, – в которых задействованы многие другие отделы головного мозга. Иными словами, в регуляции газового гомеостаза участвует множество структур, в т.ч. и центральной нервной системы. Вполне очевидно, что с ростом спортивного мастерства эти механизмы будут претерпевать адаптивные преобразования.

Все вышеописанные механизмы, с одной стороны, важны для понимания и прогноза адаптивных изменений в организме, а с другой – будут характеризовать уровень спортивной квалификации в отдельном виде спорта. Поскольку длительные физические тренировки, используемые в спорте, изменяют функциональные резервы кардиореспираторной системы [11], можно предполагать, что с ростом уровня спортивной квалификации формируются специфические настройки регуляции

газообменной функции.

Цель исследования. Оценить адаптивные изменения в механизмах регуляции газообмена и кислородного обеспечения организма в зависимости от уровня спортивной квалификации.

Материалы и методы. В лабораторных условиях обследовано две группы спортсменов (мужчин) в возрасте от 18 до 23 лет: пловцы и легкоатлеты-бегуны. Проведено две серии исследований. В первой серии обследовано 19 спортсменов-пловцов, разделенных по уровню спортивного мастерства на группу невысокой спортивной квалификации (10 чел., 2–3-й разряд) и группу спортсменов высокой квалификации (9 чел., кандидаты и мастера спорта). В дальнейшем первая подгруппа спортсменов с более низкой спортивной квалификацией именуется как разрядники (Р), а вторая – как мастера (М). В 1-й серии исследований спортсмены подвергались раздельным воздействиям:

а) плавно нарастающей гипоксии в течение 25 мин; б) плавно нарастающей гиперкапнии в течение 25 мин. Снижение концентрации кислорода обеспечивалось специальным устройством – гипоксикатором, изготовленным на базе импортного кислородного концентратора типа NewLife компании AirStep (США) согласно свидетельству на полезную модель № 24098 от 27.07.2002 (модель устройства «Тибет-4»).

В гипоксическом тесте применялось ингаляционное нормобарическое гипоксическое воздействие с экспоненциально понижающейся концентрацией O_2 во вдыхаемой газовой смеси от 20,9 до 10,5 об. %. В гиперкапническом тесте использовался метод возвратного дыхания через загубник в эластичную емкость объемом 5 л при поддержании постоянно повышенного (до 30 об. %) содержания O_2 во вдыхаемой газовой смеси. Гиперкапническое воздействие прекращалось при достижении уровня легочной вентиляции 40 л/мин или величины парциального давления CO_2 7,5 кПа.

Регистрация кардиореспираторных показателей проводилась на

эргоспирометрической системе Oхусон Pro[®] (Erich Jaeger) в исходном состоянии и на 25-й мин воздействия. Непрерывно регистрировались: легочная вентиляция VE (л/мин), частота дыхания BF (1/мин), дыхательный объем VT (л), скорость потребления O₂ – VO₂ (мл/мин), скорость выведения CO₂ – VCO₂ (мл/мин), парциальное давление O₂ и CO₂ в конечной порции выдоха – PetO₂ и PetCO₂ (кПа), средняя концентрация O₂ и CO₂ в выдыхаемой газовой смеси – FeO₂ и FeCO₂ (об. %), концентрация O₂ и CO₂ во вдыхаемой газовой смеси – FiO₂ и FiCO₂ (об. %), вентиляторные эквиваленты O₂ и CO₂ – EqO₂ и EqCO₂ (л/л), газообменное отношение RQ, частота сердечных сокращений HR (уд./мин). Насыщение гемоглобина крови кислородом SaO₂ (%) измерялось с помощью ушного пульсоксиметра VCI Autocorr (Smiths Medical PM, Inc., USA).

Во 2-й серии обследовались легкоатлеты-бегуны на средние дистанции (21 чел.) в возрасте от 18 до 22 лет, разделенные по уровню спортивного мастерства на группу невысокой спортивной квалификации (16 чел., 2–3-й разряд) и группу спортсменов высокой квалификации (5 чел., кандидаты и мастера спорта). Спортсмены подвергались воздействию острой гипоксии (10 % O₂) в течение 10 мин. Регистрация кардиореспираторных показателей проводилась на том же приборе, как в 1-й серии, в исходном состоянии и на 10-й мин воздействия.

Расчеты проводились с использованием

пакета прикладных программ Statistica 10. Внутригрупповые распределения показателей проверялись на нормальность по критерию Колмогорова–Смирнова ($p > 0,2$). Достоверность межгрупповых различий оценивалась по t-критерию Стьюдента ($p \leq 0,05$) или по критерию Манна–Уитни. Статистическая значимость коэффициента корреляции r Пирсона проверялась на соответствие условиям для критических значений при $p < 0,05$. Расчетные данные представлены в виде средних величин и их ошибок ($M \pm m$).

Результаты и обсуждение. *Результаты 1-й серии исследований.* Возраст испытуемых (20,1±0,8 и 21,6±1,0 года), рост (176,9±2,2 и 178,4±3,5 см), вес (75,2±2,6 и 71,6±2,8 кг) и индекс массы тела Кетле (ИМТ) (24,0±0,7 и 22,4±0,3 кг/см²) у пловцов групп Р и М значимо не отличаются, хотя по ИМТ наблюдается тенденция ($p < 0,07$) к его снижению в группе мастеров. Исходное АД в группе мастеров и разрядников находится в пределах нормальных значений, с учетом систематической ошибки (~5 мм рт. ст.), и также значимо не отличается: разрядники – (127,2±3,4)/(73,7±1,9) мм рт. ст., мастера – (130,7±2,6)/(80,4±2,4) мм рт. ст., при этом у мастеров отмечаются более высокие значения диастолического АД.

У мастеров по сравнению с разрядниками в исходном состоянии достоверно снижены легочная вентиляция (VE) и частота дыхания (BF), что согласуется с пониженным кислородным запросом в условиях покоя у первых: меньшими показателями потребления кислорода (VO₂) и выведения углекислого газа (VCO₂) (табл. 1).

Таблица 1

Изменения показателей кардиореспираторной системы у спортсменов-пловцов при гипоксии ($M \pm m$)

Показатель	Разрядники (n=10)		Мастера (n=9)	
	Исходное значение	Приращение при гипоксии	Исходное значение	Приращение при гипоксии
SaO ₂ , %	97,90±0,34	-16,7±1,2	98,10±0,44	-18,0±1,8

VE, л	13,2±0,7	2,3±1,2	10,0±0,9**	0,9±0,7
BF, л/мин	18,7±1,5	1,6±2,4	12,8±1,6**	-1,5±1,2
VT, л	0,74±0,06	0,08±0,04	0,87±0,11	0,14±0,10
VO ₂ , мл/мин	306±19	-7±17	237±21*	32±23
VCO ₂ , мл/мин	279±20	41±15	210±25	46±24
PetCO ₂ , кПа	5,1±0,1	-0,51±0,09	4,8±0,2	-0,41±0,13
PetO ₂ , кПа	13,7±0,2	-7,2±0,3	14,1±0,2	-7,8±0,4
EqO ₂ , л/л	37,0±1,6	8,8±2,8	34,1±2,6	-0,3±3,4*
EqCO ₂ , л/л	41±2	24,5±7,3	39,4±3,0	-1,7±1,5***
HR, 1/мин	73,6±3,8	17,9±0,6	69,1±2,8	12,1±1,4***

Примечание. Звездочками обозначена значимость межгрупповых различий: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$.

Изменения вентиляторных показателей (VE, BF, VT) при дыхании гипоксической смесью в обеих группах не значимы, однако вентиляторная реакция у мастеров и разрядников в ответ на гипоксию характеризуется неоднозначной направленностью. Возможно, это обусловлено индивидуальным влиянием тормозных обратных связей на пути передачи сигналов в дыхательный центр. На наличие таких связей в центральных механизмах управления дыханием, тонусом сосудов и работой сердца указывает G.S. Gilmartin et al. [5]. Прирост VE, в сравнении с исходным уровнем, при медленно нарастающей ингаляционной нормобарической гипоксии как у разрядников, так и у мастеров очень мал. Изменения газообмена VO₂ и VCO₂ под влиянием гипоксии разнонаправлены и не превышают 25 % (табл. 1). В то же время уменьшение парциального давления кислорода и углекислого газа в последней порции выдыхаемого воздуха (альвеолярном газе) (PetO₂ и PetCO₂) достаточно выражено в каждой группе, что указывает на существенные изменения в газовом составе крови под влиянием использованного в тестах гипоксического стимула. Достоверных межгрупповых различий по этим показателям выявить не удалось. Степень снижения насыщения гемоглобина крови кислородом за

время ингаляции гипоксической смеси также не различается между обследованными группами, а по величине она меньше, чем полученная нами ранее у спортсменов-легкоатлетов [12]. По-видимому, способность сохранять повышенный уровень SaO₂ в условиях гипоксии можно считать отличительным признаком тренированности в плавании. Механизмы этого недостаточно понятны и могут быть обусловлены адаптивными изменениями физиологических механизмов регуляции на всех уровнях транспорта кислорода из внешней среды до клетки, а также энергетики с привлечением анаэробных механизмов обмена веществ.

Обращает на себя внимание более стабильное поддержание в гипоксических условиях вентиляторных эквивалентов кислорода (EqO₂) и углекислого газа (EqCO₂) у высококвалифицированных пловцов. Эти показатели отражают эффективность газообменной функции легких по связыванию кислорода и выведению углекислоты. Их достоверное возрастание у разрядников свидетельствует о существенном снижении эффективности легочного газообмена у начинающих спортсменов. В отличие от этого, в группе мастеров при гипоксии эти показатели остаются на прежнем уровне, эффективность

легочного газообмена сохраняется, что, свойств альвеолярной вентиляции. возможно, происходит за счет улучшения

Таблица 2

Изменения показателей кардиореспираторной системы при гипоксическом воздействии у спортсменов-пловцов (M±m)

Показатель	Разрядники (n=10)	Мастера (n=9)	p
DHR, %	25,0±1,7	17,5±2,0***	0,01
DSaO ₂ , %	-17,1±1,2	-18,3±1,9***	-
PetO ₂ min, кПа	4,93±0,17	5,54±0,17*	0,02
bHRpetO ₂ , 1/мин кПа	-2,58±0,14	-1,83±0,20***	0,001
bHRsatO ₂ , 1/%	-0,94±0,08	-1,26±0,22***	-

Примечание. Условные обозначения: DHR, DSaO₂ – дельта ЧСС и сатурации кислорода относительно исходного уровня; bHRpetO₂ и bHRsatO₂ – чувствительность ответных реакций (ЧСС и сатурации кислорода) на численную единицу изменения стимула (PetO₂ или SaO₂) во время гипоксии. Звездочками обозначены значимые величины прироста показателей по сравнению с исходными данными: * – p<0,05; *** – p<0,001.

Минимальный уровень, которого достигает парциальное напряжение кислорода в конечной порции выдыхаемого газа в условиях гипоксии (PetO₂min), в группе М несколько выше, чем в контроле (p<0,02). Возможно, это отражает уменьшение зависимости тканевых окислительных процессов от уровня O₂ в крови с ростом профессионализма в спортивном плавании.

В табл. 2 приведены величины стандартной оценки чувствительности ответных реакций на воздействие гипоксии (bHRpetO₂ и bHRsatO₂). При этом рассчитывается величина прироста значимого эффекторного показателя (в нашем случае взята ЧСС) на численную единицу изменения стимула (PetO₂ или SaO₂), воздействующего на рецепторы, т.е. наклон прямой регрессии ЧСС(PetO₂) или ЧСС(SaO₂). Следует отметить, что обычно используемый расчет чувствительности на единицу изменения SaO₂ в крови (bHRsatO₂) не дает межгрупповых различий в чувствительности для HR. Однако расчет той же чувствительности HR на единицу изменения парциального давления O₂ в альвеолярном газе (конечной порции выдоха) (bHRpetO₂) выявляет меньшую

величину в группе мастеров с большей степенью вероятности (p<0,001). Снижение у высококлассных пловцов чувствительности тахикардической реакции на изменения pO₂ в альвеолярном газе (которое близко к pO₂ в крови легочных капилляров) можно считать адаптивной реакцией, которая обеспечивается за счет более высоких резервных возможностей внешнего дыхания, крови, сердечно-сосудистой системы и тканевого дыхания, определяющих высокий уровень аэробной работоспособности этих спортсменов.

Отличительной особенностью реакции кардиореспираторной системы на гиперкапнию является выраженный прирост (113–136 %) легочной вентиляции (DVE) (табл. 3). Это соответствует предположению о ведущем значении уровня CO₂ в регуляции внешнего дыхания и роли последнего в его поддержании [3]. Однако межгрупповые различия в величине вентиляторного ответа на гиперкапнию отсутствуют, что может свидетельствовать о достаточно жестком механизме регуляции уровня углекислоты в крови, прямо связанном с метаболическими процессами в организме.

Таблица 3

**Изменение показателей кардиореспираторной системы
в ответ на гиперкапническое воздействие у спортсменов-пловцов (M±m)**

Показатель	Разрядники (n=10)	Мастера (n=9)	p
DVE, л	12,4±1,4***	13,4±1,6***	-
DVE, %	113,7±16,6***	136,1±18,3***	-
DBF, 1/мин	-0,13±0,71	0,12±0,50	-
DVT, л	0,75±0,12**	0,53±0,23	-
DPetCO ₂ , кПа	2,08±0,13***	1,49±0,21**	0,05
DHR, 1/мин	2,7±2,0	2,7±3,2	-
Пороговое парциальное давление p ₀ PetCO ₂ , кПа	6,3±0,1***	5,2±0,2***	0,001
Чувствительность легочной вентиляции к PetCO ₂ , bVEpetCO ₂ , л/кПа	12,4±1,4***	11,1±1,8***	-

Примечание. Звездочками обозначены значимые величины прироста показателей по сравнению с исходными данными: ** – p<0,01; *** – p<0,001.

Для определения особенностей взаимодействия внешнего дыхания и сердца как звеньев единой кардиореспираторной системы, обеспечивающей функцию газообмена, нами рассматривалась зависимость между индивидуальными приростами легочной вентиляции и ЧСС (рис. 1). Коэффициент корреляции r для группы мастеров составил -0,73 с уровнем значимости p<0,05, что позволяет говорить о наличии достаточно надежной зависимости между переменными. Уравнение регрессии мастеров: (DVE на гипоксию)= =242,8-7,51×(DHR на гиперкапнию) – свидетельствует о наличии обратных соотношений между величинами ответных хеморефлекторных реакций для отдельных звеньев кардиореспираторной системы – дыхания и сердца. Данные группы Р располагаются правее линии регрессии, где в

среднем близкая к группе М вентиляторная реакция DVE дополняется большей тахикардической DHR. Таким образом, в реакциях кардиореспираторной системы на селективные изменения газового состава крови присутствует механизм реципрокного дополняющего взаимодействия ответных реакций отдельных ее звеньев – внешнего дыхания и сердца. При этом: а) суммарная хемореактивность кардиореспираторной системы может изменяться в зависимости от вида спортивной тренировки, в частности снижаться при занятиях плаванием; б) с увеличением уровня спортивного мастерства наблюдается повышение «точности» физиологической настройки в изменениях вентиляторных и сердечных ответов на гипоксическое и гиперкапническое воздействие.

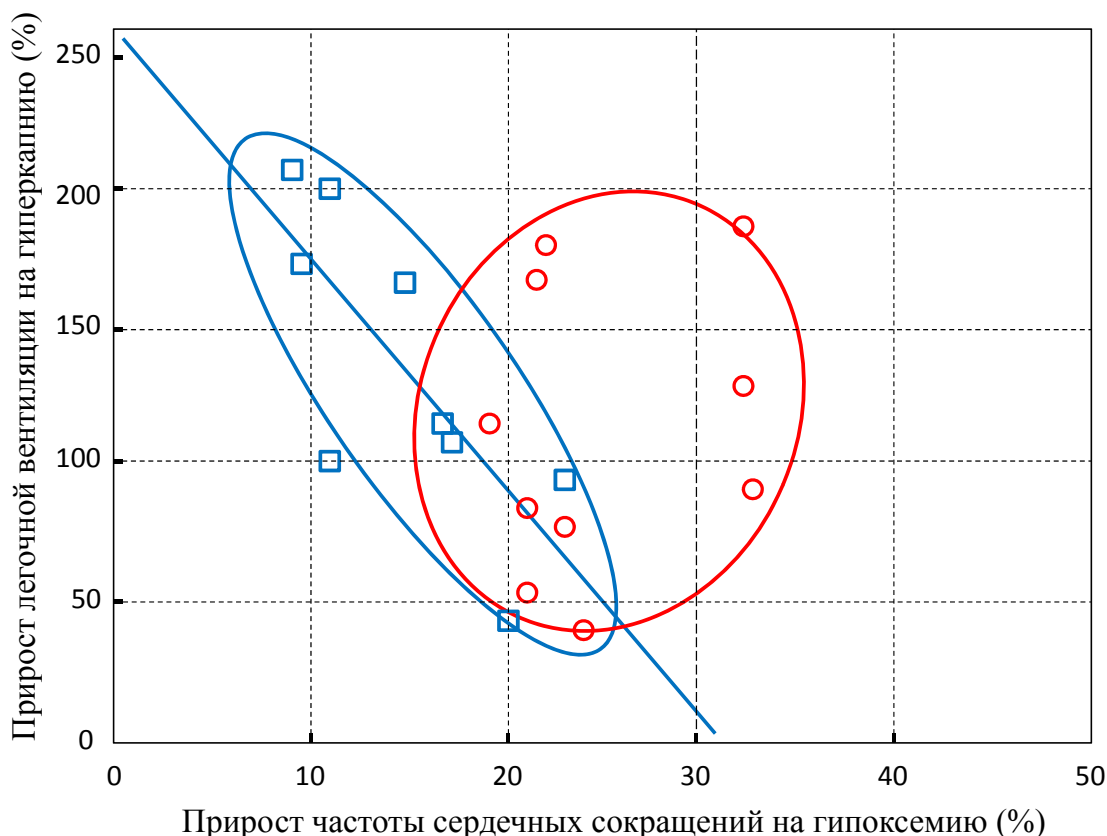


Рис. 1. Зависимость между индивидуальными приростами легочной вентиляции в ответ на гиперкапнию (в % от исходных величин) и приростами частоты сердечных сокращений в ответ на гипоксемию (в % от исходных величин) для обследованных групп пловцов. Мастера – сплошная линия регрессии, квадратики; разрядники – кружки. Эллипсы охватывают 95 % точек. Уравнение регрессии для мастеров: (Прирост легочной вентиляции на гиперкапнию)= $242,8-7,51 \times$ (Прирост частоты сердечных сокращений на гипоксемию), $r=-0,73$, $p<0,05$

Результаты 2-й серии исследований. Во второй серии были обследованы спортсмены-легкоатлеты с циклическим аэробным типом нагрузки – бегуны на средние дистанции. В отличие от пловцов, у бегунов высокого уровня (группа М) индекс массы тела выше, чем у разрядников. При этом индекс массы тела мастеров и разрядников достоверно различается как по критерию Манна–Уитни ($p<0,02$), так и по критерию Колмогорова–Смирнова ($p<0,05$) (медиана 23,2 и 20,3; $M=23,0$ и $20,8$; $SD=1,31$ и $1,80$; $SE=0,59$ и $0,45$).

В отличие от пловцов, у которых отмечается несколько повышенный уровень диастолического АД, у бегунов (при одинаковых уровнях систолического АД) систолическое и диастолическое давление у разрядников

и мастеров достоверно не различалось: исходные значения у М – 128/73 мм рт. ст., у Р – 126/78 мм рт. ст.; при гипоксии – 132/74 и 135/78 мм рт. ст. соответственно.

В условиях гипоксии в обеих группах бегунов поддержание уровня сатурации крови происходит вследствие усиления вентиляции, в основном за счет увеличения глубины дыхания (около 20 %) и вентиляторного эквивалента по кислороду E_{QO_2} (примерно в 1,5 раза) при сниженной реакции со стороны частоты дыхания. Однако, в отличие от пловцов, у которых рост мастерства сопровождается большим усилением функции дыхательной системы (вентиляции и дыхательного коэффициента в условиях гипоксии) по сравнению с разрядниками, высококвалифицированные бегуны по этим

показателям не отличаются от разрядников.

Таблица 4

Показатели кардиореспираторной системы у спортсменов-бегунов в исходном состоянии и на 10-й мин гипоксического воздействия

Показатель	Разрядники (n=16)		Мастера (n=5)	
	Исходное значение	Приращение при гипоксии, %	Исходное значение	Приращение при гипоксии, %
SaO ₂ , %	97,70±0,24	-22,20±1,55	97,00±0,32	-19,40±1,06
VE, л	10,10±0,44	18,7±2,2	10,10±0,84	20,40±6,42
BF, 1/мин	12,5±0,9	3,52±3,70	12,70±1,98	2,81±10,10
VT, л	0,85±0,05	16,60±4,47	0,85±0,09	20,8±11,7
VO ₂ , мл/мин	273±11	-17,40±3,14	276,0±14,7	-16,20±3,61
VCO ₂ , мл/мин	245,00±9,81	15,40±3,76	241,0±18,1	17,20±3,62
PetCO ₂ , кПа	5,21±0,10	-9,73±0,76	5,11±0,18	-11,90±1,96
PetO ₂ , кПа	13,70±0,21	-57,60±0,75	13,70±0,18	-56,30±0,51
FeO ₂ , об. %	17,30±0,13	-53,90±0,61	17,40±0,32	-53,10±0,72
FeCO ₂ , об. %	3,19±0,11	-6,09±2,08	3,06±0,28	-7,55±5,17
EqO ₂ , л/л	32,8±1,5	48,90±5,62	32,1±3,2	48,80±9,09
EqCO ₂ , л/л	36,40±1,27	5,26±1,96	36,90±3,49	5,82±6,62
HR, 1/мин	65,80±2,32	32,00±3,06	59,60±4,24	36,20±8,93

Для бегунов наиболее интересные различия между группами обнаружены для показателя, характеризующего отношение прироста вентиляции (dVE) в ответ на прирост CO₂ в конечной порции выдыхаемого воздуха (dPetCO₂) в условиях гипоксии (рис. 2). Уравнение регрессии (для мастеров: dVEG=-15,1-2,98×(dPetCO₂G)) и уровень корреляции у мастеров (r=-0,91, p<0,03) отражают «точность» настройки регуляции газообменных показателей в условиях гипоксии, тогда как достоверное отсутствие корреляции между аналогичными показателями у разрядников (r=0,01, p>0,96) говорит о недостаточной интегративности функции кардиореспираторной системы при воздействии гипоксии. Этот факт отражает индивидуальную адаптивную настройку хеморефлекторной регуляции на

гиперкапнический драйв, возникающий в условиях симулирующей гипоксию физической нагрузки [11].

По результатам обеих серий можно считать, что рост спортивного мастерства (от спортсменов разрядников к спортсменам высокого класса в одном виде спорта) происходит не только за счет изменений абсолютных значений кардиореспираторных показателей, но и за счет изменения механизмов, обеспечивающих оптимальность («точность») настройки хеморецепторных реакций на развивающуюся гипоксемию или гиперкарбию. Спортсмены более низкого уровня могут иметь аналогичные с мастерами абсолютные значения показателей кардиореспираторной системы как в исходном состоянии, так и во время дыхания измененной газовой смесью, но в их группе

нередко наблюдается избыточная или недостаточная хеморефлекторная реакция. На основании полученных данных можно предполагать, что разрядники с оптимальным ответом на тестирующее воздействие, т.е. попадающие в

«эллипс» мастеров (рис. 1, 2), имеют большие перспективы профессионального спортивного роста.

Ранее нами было показано, что, в зависимости от индивидуальной хемореактивности, при проведении гипоксических и гиперкапнических тестов происходит разделение спортсменов на группы в зависимости от вида спорта [12]. Разработка этого вопроса привела нас к обнаружению тесной связи индивидуального вегетативного статуса с величинами реакций сердца и легких на ингаляционное воздействие измененными газовыми смесями и позволила утверждать, что длительные однотипные двигательные нагрузки изменяют межсистемные взаимодействия в механизмах хемореактивности. Результаты данного исследования позволяют считать, что по мере роста спортивной квалификации происходит совершенствование механизмов межсистемной интеграции, что проявляется в оптимизации («точности») ответа физиологических систем на изменение уровней CO_2 и O_2 в крови, причем для каждого конкретного вида спорта существуют свои оптимальные зоны этих взаимодействий. Эти зоны могут служить ориентиром для выявления разрядников, имеющих перспективы высокого профессионального спортивного роста. Вместе с тем нельзя исключать требующую дополнительного исследования генетическую обусловленность «групповых мастерских настроек», обеспечивающих при высоких спортивных нагрузках оптимальные межсистемные взаимодействия (фенотип успешного спортсмена).

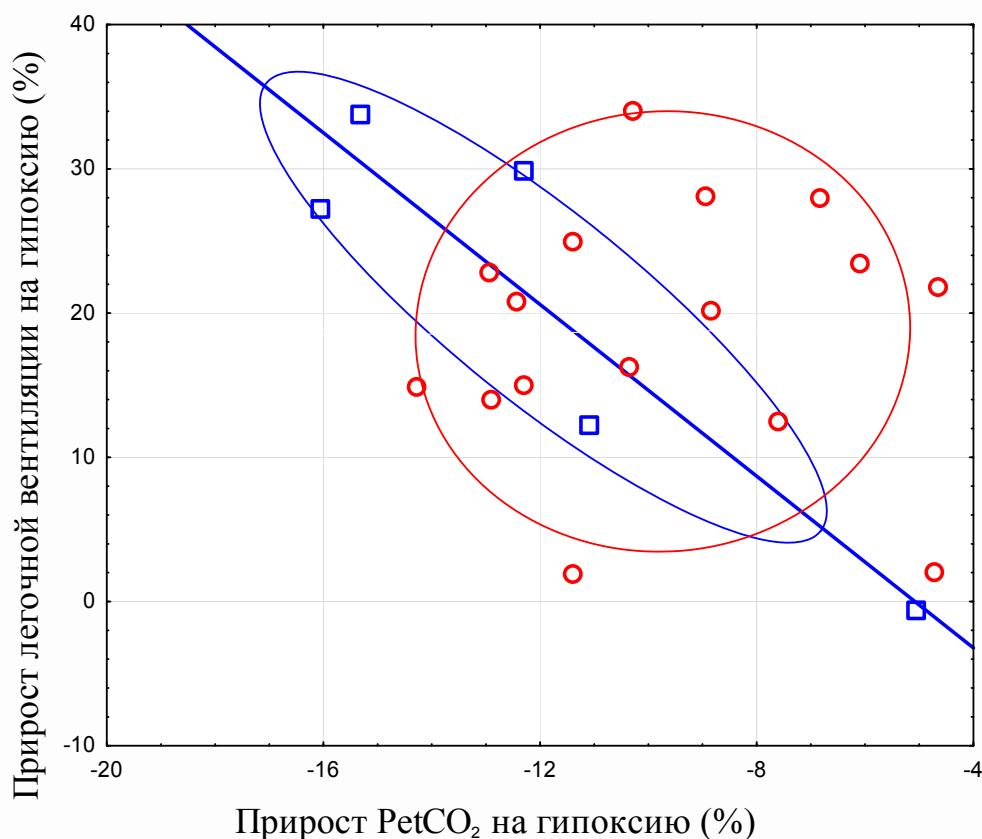


Рис. 2. Зависимость между индивидуальными приростами вентиляции (VEG) и приростом CO_2 в конечной порции выдыхаемого воздуха (PetCO_2) у спортсменов-бегунов при гипоксии. Для мастеров уравнение регрессии: (Прирост VEG на гипоксию) = $-15,1 - 2,98 \times (\text{Прирост } \text{PetCO}_2 \text{ на гипоксию})$, $r = -0,91$, $p < 0,03$; для разрядников: $r = 0,01$, $p > 0,95$. Эллипс охватывает 95 % точек. Обозначения: мастера спорта – квадратики, разрядники – кружки

Выводы:

1. Для спортсменов-пловцов характерно снижение ответных реакций сердца на гипоксию и меньшая чувствительность к изменениям парциального давления кислорода в альвеолярном газе. При этом у пловцов высокой спортивной квалификации происходит совершенствование механизмов межсистемной интеграции, что обеспечивает повышение «точности» физиологической настройки в изменениях вентиляторных и сердечных ответов на гипоксическое и гиперкапническое воздействие.

2. Для высококлассных спортсменов-легкоатлетов (бегунов на средние дистанции) различий в абсолютных значениях показателей кардиореспираторной системы в ответ на дыхание гипоксической смесью по сравнению со спортсменами более низкой квалификации не наблюдается, но, так же как

и у пловцов, отмечается совершенствование механизмов межсистемной интеграции – повышение «точности» настройки газообменной регуляции на внутреннюю гипоксическую гиперкапнию, проявляющееся в усилении тесноты обратной связи прироста легочной вентиляции и прироста давления CO_2 в артериальной крови.

3. Усиление межсистемной интеграции обеспечивает оптимальность хемореактивных ответов на гипоксические и гиперкапнические возмущения газового гомеостаза организма и отражает адаптивные настройки кардиореспираторной системы у спортсменов высокого класса при интенсивных аэробных нагрузках.

Литература

1. Балькин М.В., Сагидова С.А., Жарков А.В. Изменения газового состава крови и процессы свободнорадикального окисления липидов в миокарде при адаптации к физическим нагрузкам. Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2015; 101 (9): 1007–1012.
2. Бурых Э.А., Сороко С.И. Различия в стратегиях и возможностях адаптации человека к гипоксическому воздействию. Физиология человека. 2007; 33 (3): 63–74.
3. Ainslie P.N., Duffin J. Integration of cerebrovascular CO₂ reactivity and chemoreflex control of breathing: mechanisms of regulation, measurement and interpretation. Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol. 2009; 296: R1473–R1495.
4. Stewart J.M., Rivera E., Clarke D.A. Ventilatory baroreflex sensitivity in humans is not modulated by chemoreflex activation. Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol. 2011; 300: H1492.
5. Gilmartin G.S., Lynch M., Tamisier R., Weiss J.W. Chronic intermittent hypoxia in humans during 28 nights results in blood pressure elevation and increased muscle sympathetic nerve activity. Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol. 2010; 299: H925.
6. Steinback C.D., Salzer D., Medeiros P.J. Hypercapnic vs. hypoxic control of cardiovascular, cardiovagal, and sympathetic function. Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol. 2009; 296: R402.
7. Leissner K.B., Mahmood F.U. Physiology and pathophysiology at high altitude: considerations for the anesthesiologist. J. Anesth. 2009; 23: 543.
8. Wilson M.H., Edsell M.E., Davagnanam I. Cerebral artery dilatation maintains cerebral oxygenation at extreme altitude and in acute hypoxia – an ultrasound and MRI study. J. Cereb. Blood Flow Metab. 2011; 31 (10): 2019.
9. Shoemaker J.K., Vovk A., Cunningham D.A. Peripheral chemoreceptor contributions to sympathetic and cardiovascular responses during hypercapnia. Can. J. Physiol. Pharmacol. 2002; 80: 1136–1143.
10. Guyenet P.G. Regulation of Breathing and Autonomic Outflows by Chemoreceptors. Compr. Physiol. 2014; 4 (4): 1511–1562.
11. Пупырева Е.Д., Балькин М.В. Механизмы кислородного обеспечения организма спортсменов в покое и при нагрузках максимальной мощности. Ульяновский медико-биологический журнал. 2013; 1: 124–130.
12. Диверт В.Э., Кривошеков С.Г., Водяницкий С.Н. Индивидуально-типологическая оценка реакций кардиореспираторной системы на гипоксию и гиперкапнию у здоровых молодых мужчин. Физиология человека. 2015; 40 (2): 63–74.

INTERSYSTEM INTEGRATION AND CHEMORESPONSIVENESS OF CARDIORESPIRATORY SYSTEM IN ATHLETES ACCORDING TO THEIR SPORTS QUALIFICATION

N.V. Balioz, V.I. Baranov, Yu.V. Bobrova, V.E. Divert, S.G. Krivoschekov

State Scientific-Research Institute of Physiology and Basic Medicine, Novosibirsk, Russia

e-mail: krivosch@physiol.ru

It is very important to understanding adaptive changes in the mechanisms of gas exchange regulation and oxygen supply of the organism, depending on sports mastery, to manage the training activity. The purpose of the paper is to study the peculiarities of adaptive reactions in cyclic sports athletes of different fitness levels in response to hypoxic and hypercapnic load. Materials and Methods. Swimmers and track-athletes (only men), aged 18–23, high and medium levels of sports qualification, were examined. The cardiorespiratory parameters were registered by the ergospirometric system OxyconPro @ (Erich Jaeger). Swimmers were subjected to: a) gradually increasing (from 20.9 to 10 % O₂) 25-minute hypoxia; b) smoothly increasing 25-minute hypercapnia (breathing into a confined space). Track-athletes experienced 10-minute acute (10 % O₂) hypoxia. Results. It is typical that highly qualified swimmers demonstrate the reduction of heart response to hypoxia and less sensitivity to changes in the partial oxygen pressure in the alveolar gas. At the same

time, high-qualified swimmers improve the mechanisms of inter-system integration, which provides an increase in the "accuracy" of physiological adjustment in changes in ventilator and cardiac responses to hypoxic and hypercapnic effects. For high-qualified track-athletes (middle-distance runners), there are no differences in absolute values of cardiorespiratory parameters in response to respiration with a hypoxic mixture in comparison with low-qualified athletes, but, like swimmers, they demonstrate perfection of inter-system integration mechanisms: adjustment of gas exchange regulation to internal hypoxic hypercapnia, manifested in increased pulmonary ventilation and CO₂ pressure in arterial blood.

Conclusion. Intensification of inter-system integration optimizes chemoreactive responses to hypoxic and hypercapnic perturbations of the body's gas homeostasis and reflects the "accuracy" of cardiorespiratory system adaptation in high-qualified athletes under intensive aerobic load.

Keywords: high-qualified athletes, chemoreactivity, hypoxia, hypercapnia, cardiorespiratory system.

References

1. Balykin M.V., Sagidova S.A., Zharkov A.V. Izmeneniya gazovogo sostava krovi i protsessy svobodno-radikal'nogo okisleniya lipidov v miokarde pri adaptatsii k fizicheskim nagruzkam [Changes in blood gas and free radical lipid oxidation in the myocardium during adaptation to physical stress]. *Rossiyskiy fiziologicheskiy zhurnal im. I.M. Sechenova*. 2015; 101 (9): 1007–1012 (in Russian).
2. Burykh E.A., Soroko S.I. Razlichiya v strategiyakh i vozmozhnostyakh adaptatsii cheloveka k gipoksi-cheskomu vozdeystviyu [Differences in the strategies and potentials of human adaptation to hypoxia]. *Fiziologiya cheloveka*. 2007; 33 (3): 63–74 (in Russian).
3. Ainslie P.N., Duffin J. Integration of cerebrovascular CO₂ reactivity and chemoreflex control of breathing: mechanisms of regulation, measurement and interpretation. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2009; 296: R1473–R1495.
4. Stewart J.M., Rivera E., Clarke D.A. Ventilatory baroreflex sensitivity in humans is not modulated by chemoreflex activation. *Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol.* 2011; 300: H1492.
5. Gilmartin G.S., Lynch M., Tamisier R., Weiss J.W. Chronic intermittent hypoxia in humans during 28 nights results in blood pressure elevation and increased muscle sympathetic nerve activity. *Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol.* 2010; 299: H925.
6. Steinback C.D., Salzer D., Medeiros P.J. Hypercapnic vs. hypoxic control of cardiovascular, cardiovagal, and sympathetic function. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2009; 296: R402.
7. Leissner K.B., Mahmood F.U. Physiology and pathophysiology at high altitude: considerations for the anesthesiologist. *J. Anesth.* 2009; 23: 543.
8. Wilson M.H., Edsell M.E., Davagnanam I. Cerebral artery dilatation maintains cerebral oxygenation at extreme altitude and in acute hypoxia – an ultrasound and MRI study. *J. Cereb. Blood Flow Metab.* 2011; 31 (10): 2019.
9. Shoemaker J.K., Vovk A., Cunningham D.A. Peripheral chemoreceptor contributions to sympathetic and cardiovascular responses during hypercapnia. *Can. J. Physiol. Pharmacol.* 2002; 80: 1136–1143.
10. Guyenet P.G. Regulation of Breathing and Autonomic Outflows by Chemoreceptors. *Compr. Physiol.* 2014; 4 (4): 1511–1562.
11. Pupyreva E.D., Balykin M.V. Mekhanizmy kislородnogo obespecheniya organizma sportsmenov v pokoe i pri nagruzkakh maksimal'noy moshchnosti [Mechanisms of oxygen supply of athletes at rest and under maximal loads]. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskiy zhurnal*. 2013; 1: 124–130 (in Russian).
12. Divert V.E., Krivoshchekov S.G., Vodyanitskiy S.N. Individual'no-tipologicheskaya otsenka reaktsiy kardiorespiratornoy sistemy na gipoksiyu i giperkapniyu u zdorovykh molodykh muzhchin [Individual and typological assessment of cardiorespiratory responses to hypoxia and hypercapnia in young healthy men]. *Fiziologiya cheloveka*. 2015; 40 (2): 63–74 (in Russian).