

УДК 612.172.2;612.16;612.29;57.042

КАРДИО-РЕСПИРАТОРНАЯ КООРДИНАЦИЯ ПРИ ОСТРОЙ ГИПОКСИИ У ЛЕГКОАТЛЕТОВ-БЕГУНОВ

© 2021 г. С. Г. Кривошеков¹, Д. Ю. Урюмцев¹, В. В. Гульяева¹, *, М. И. Зинченко¹

¹ФГБНУ Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины,
Новосибирск, Россия

*E-mail: gulyaevavv@physiol.ru

Поступила в редакцию 10.12.2020 г.

После доработки 24.12.2020 г.

Принята к публикации 24.12.2020 г.

Целью данного исследования было определить кардио-респираторную координацию под влиянием острой гипоксии у легкоатлетов с разным уровнем спортивной квалификации. 18 мужчин легкоатлетов-бегунов (в возрасте от 17 до 25 лет) подвергались воздействию острой (10% O₂) гипоксии в течение 10 мин. Во время нормоксии и гипоксии измеряли показатели дыхания, газообмена и сердечного ритма. Для оценки кардио-респираторной координации использовали метод главных компонент (ГК), стабильность которых при воздействии гипоксии оценивали по коэффициенту конгруэнтности Такера. Анализ был проведен по временным рядам длительностью 10 мин нормоксии и гипоксии с включением частоты сердечных сокращений (ЧСС), минутного объема дыхания (МОД), фракционной концентрации O₂ и CO₂ на выдохе. По уровню квалификации спортсменов разделили на 2 группы – высокотренированные (ВТ, не ниже I разряда, $n = 9$) и среднетренированные (СТ, II разряд, $n = 9$). В условиях нормоксии кардио-респираторная координация у легкоатлетов обеих групп была выше, чем при нормобарической гипоксии ($p = 0.001$): у 44% спортсменов при нормоксии по критерию Кайзера модель включала один ГК из скоординированных переменных, а при гипоксии у 100% легкоатлетов модель состояла из двух ГК. Во время гипоксии достоверно ($p < 0.001$) увеличился процент общей дисперсии, объясняемый ГК2, независимо от уровня тренированности. При гипоксии произошло перераспределение вкладов показателей в ГК1 и ГК2, более выраженное в группе СТ: вклад ЧСС в ГК1 увеличился, а концентрации CO₂ на выдохе снизился ($p < 0.001$). Коэффициент конгруэнтности первого ГК между исходным состоянием и гипоксией в группе ВТ показал высокий уровень подобия (медиана = 0.88; 25/75% = 0.84/0.93), и был достоверно ($p < 0.05$) выше, чем в СТ (0.82; 0.46/0.94). Таким образом, у легкоатлетов высокой квалификации кардио-респираторная стабильность при гипоксическом воздействии выше. Это может служить дополнительным прогностическим признаком хороших спортивных результатов.

Ключевые слова: легкоатлеты, гипоксия, кардио-респираторная координация, метод главных компонент.

DOI: 10.31857/S0131164621030085

Двигательная активность в условиях осевой статической нагрузки является необходимым условием для поддержания физического здоровья, а также универсальным средством, противодействующим неблагоприятным факторам внешней среды. И.Б. Козловской с коллегами были разработаны принципы профилактики снижения работоспособности, силовой и общей выносливости, синтеза мышечных белков, развития мышечной атрофии и деминерализации костной ткани, ортостатической и физической толерантности, развивающихся под влиянием невесомости [1]. Эти же принципы, основанные на «объективизации оценки уровня тренированности и работоспособности, соответствии этого уровня текущей и планируемой деятельности; индивиду-

ализации проведения профилактических мероприятий с учетом исходного и текущего общего и физического состояния» [1], могут лечь в основу системы поддержания здоровья современного человека. В этом направлении И.Б. Козловская с коллегами проводили уникальные экспериментальные работы, направленные на изучение сердечно-сосудистых реакций в условиях невесомости. В частности, было показано [2], что потеря мышечного и сосудистого тонуса вследствие модельной адаптации к состоянию невесомости приводит к секвестрации крови в нижней части тела, а длительное отсутствие ортостатических стимулов – к вегетативной дисфункции. Авторы пришли к выводу, что снижение постурального мышечного тонуса в ответ на снижение опорной

афферентации может быть ответственно за ортостатическое нарушение через снижение эффективности мышечного насоса, способствующего венозному возврату. Немаловажное значение также имеет координация сердечно-сосудистой и дыхательной системы, обеспечивающая более широкий спектр адаптации организма к изменяющимся условиям. Циклические изменения артериального и внутригрудного давления, связанные с дыханием, имеют прямые и не прямые влияния на работу сердца. Можно полагать, что исследование межсистемной интеграции может сыграть ключевую роль при оценке уровня тренированности, общего и физического состояния человека. Сопряженность сердечно-сосудистой и дыхательной систем может обеспечивать более широкий спектр адаптации организма к изменяющимся условиям и зависит от функционального состояния человека [3–6]. На моделях адаптации организма к физической нагрузке у спортсменов разных видов спорта можно изучать, как изменяется кардио-респираторное взаимодействие в процессе тренировки. Поскольку объединяющим фактором для сердечно-сосудистой и дыхательной анатомических систем является обеспечение организма кислородом, создание экспериментального острого гипоксического стресса как адекватного стимула позволяет исследовать построение взаимосвязей в сердечно-сосудистой и дыхательной системах в процессе физических тренировок. Ранее нами было показано, что взаимосвязи между реакциями сердечно-сосудистой и дыхательной систем характеризуют вид спорта и уровень спортивного мастерства [7, 8]. Так, пловцы высокого мастерства, в отличие от тех, кто имеет более низкий разряд, показывают высокую групповую корреляцию в кардио-респираторных показателях в ответ на гипоксические и гиперкапнические острые нагрузки [8], подобная ситуация наблюдается у лыжников [7]. Эти результаты были получены на уровне корреляций усредненных показателей. Также было показано с помощью кросс-спектрального анализа временных рядов сердечного и дыхательного ритмов, что кардио-респираторная когерентность увеличивается при гипоксии на частоте (0.07–0.08 Гц) только у бегунов, которые в будущем достигли высокого мастерства, в отличие от тех, кто не достиг [6].

Наиболее изученный феномен, являющийся результатом кардио-респираторного взаимодействия – это респираторная синусовая аритмия (РСА, учащение сердцебиений на вдохе и урежение на выдохе), которая проявляется в условиях покоя и сна, а при увеличении метаболического запроса ингибируется [9]. Известно, что при умеренном гипоксическом стрессе у человека РСА не изменяется [10, 11], а при нарастающей нормакапнической гипоксии у собак прогрессивно снижается [12]. Однако, помимо РСА, встает во-

прос о координации других, не менее информативных для описания процесса газообмена, показателей сердечно-сосудистой и дыхательной систем.

Одним из опробованных в пилотных исследованиях методов изучения влияния тренировок на кардио-респираторную координацию является анализ главных компонент (ГК), определяющий переменные, которые совместно изменяются во времени [13]. Анализ ГК – это статистический метод, который уменьшает размерность данных взаимосвязанных систем, извлекая наименьшее число компонент, которые составляют большую часть вариации исходных многомерных данных с минимальной потерей информации. Авторы показали применимость метода ГК при физической нагрузке [13, 14]. Как изменяется координация в кардио-респираторной системе при гипоксическом стрессе у спортсменов с разным уровнем мастерства, остается неизвестным. Можно предположить, что для видов спорта, в которых результат значительно зависит от состояния кислород-транспортной системы и ее регуляции, адаптация этой системы к регулярному увеличению метаболического запроса до максимально возможного уровня приведет к перекрестной адаптации к гипоксемии. Поэтому настоящее исследование было нацелено на изучение характеристик ГК, описывающих кардио-респираторную координацию, в условиях как нормоксии, так и при остром гипоксическом стрессе, в зависимости от тренированности спортсменов-бегунов.

МЕТОДИКА

В исследовании участвовали 18 мужчин легкоатлетов-бегунов на средние дистанции в возрасте от 18 до 25 лет. По уровню квалификации спортсменов разделили на 2 группы – высокотренированные (ВТ, не ниже I разряда, $n = 9$) и среднетренированные (СТ, II разряд, $n = 9$).

После заполнения антропометрических данных и 30-минутного отдыха, включая адаптацию к дыханию в маске, начинали запись показателей газообмена, вентиляции, сердечного ритма и насыщения крови кислородом. Испытуемые находились в положении сидя в кресле. Исследование состояло из двух этапов, следующих один за другим: 10 мин записи при нормоксии (21% O₂) и 10 мин в условиях ингаляционной нормобарической гипоксии (10% O₂). Переход от нормоксического дыхания к гипоксическому осуществлялся через маску. Снижение концентрации кислорода обеспечивали устройством Тибет-4 (Россия, свидетельство на полезную модель № 24098 от 27 июля 2002 года).

Регистрация данных. Регистрацию кардио-респираторных показателей проводили на эргоспирометрической системе *Oxycon Pro* (Erich Jaeger, Германия). Непрерывно регистрировали: частоту дыхания (ЧД), дыхательный объем (ДО), минутный объем дыхания (МОД), фракционную концентрацию O_2 и CO_2 во вдыхаемой (FiO_2 и $FiCO_2$) и выдыхаемой газовой смеси (FeO_2 и $FeCO_2$), скорость потребления кислорода (PO_2) и выделения углекислого газа (BCO_2). Данные частоты сердечных сокращений (ЧСС) и насыщения крови кислородом (So_2) измеряли с помощью пульсоксиметра *BCI 3304 Autocorr* (Smiths Medical, США) и автоматически передавали на *Oxycon Pro*. Программное обеспечение *Oxycon Pro* усредняло данные от респираторной системы и ЧСС и выводило их с частотой 0.2 Гц (период 5 с).

Анализ данных. Учитывая низкочастотные колебания показателей газотранспортной системы с периодом в состоянии покоя сидя около 2 мин [15], а также их нестационарное состояние в первые несколько минут гипоксии, для оценки влияния гипоксии на абсолютные значения кардио-респираторных показателей, производили их усреднение за последние 2 мин в состояниях нормоксии и гипоксии.

Для изучения кардио-респираторной координации использовали анализ ГК, отражающий степень совпадения временных паттернов физиологических реакций, т.е. насколько их увеличение и уменьшение статистически синхронизированы. Кардио-респираторные переменные, которые изменяются во времени, могут демонстрировать различную степень ковариации. Общая дисперсия позволяет представлять временные паттерны отдельных кардио-респираторных переменных, используя меньшее количество координатных переменных, или ГК. ГК извлекаются в порядке убывания важности так, что первый ГК (ГК1) составляет максимальную часть дисперсии, а каждый последующий компонент – меньшую. Число ГК отражает размерность системы, так что уменьшение числа ГК свидетельствует о большей координации, и наоборот. Число ГК изменяется, когда система претерпевает реконфигурацию. Переход от многих исходных переменных к меньшему числу ГК позволяет облегчить моделирование исследуемой системы и получить представление о степени взаимосвязанности или ее отсутствии между исследуемыми переменными. Анализ проводили для каждого испытуемого по временным рядам длительностью 10 мин нормоксии и 10 мин гипоксии с включением следующих переменных: ЧСС, МОД, фракционная концентрация O_2 (FeO_2) и CO_2 ($FeCO_2$) на выдохе. Другие регистрируемые переменные были исключены из анализа в связи с их детерминированной математической связью с вышеупомяну-

тыми переменными. Значения переменных при анализе ГК были стандартизованы, новые значения переменных в нормализованных единицах (н. е.) рассчитывали как $X_{н. е.} = (x - M)/SD$. Стандартизацию проводили на всем промежутке времени в 20 мин, включающем как нормоксию, так и гипоксию. На рис. 1 и 2 показан пример того, как анализ ГК уменьшает размерность четырех исходных кардио-респираторных переменных (рис. 1) в одну ГК в условиях нормоксии и две ГК – при гипоксии (рис. 2).

Число обобщаемых ГК определяли критерием Кайзера, который рассматривает как значимые ГК с собственными значениями ≥ 1.00 . Для сравнения структуры извлеченных ГК во время нормоксии и гипоксии использовали коэффициент конгруэнтности (КК), который является мерой подобия, применяемой к ГК. Как и в случае коэффициента корреляции, чем ближе КК к единице, тем лучше подобие. Значение КК в диапазоне 0.85–0.94 указывает на высокое сходство ГК, а значения от 0.95 до 1 указывают на то, что их можно считать равными [16]. Для определения структуры ГК проанализировали вклады переменных в формирование ГК. Для удобства восприятия вклады умножали на 100.

Для оценки влияния уровня тренированности (ВТ и СТ) и содержания O_2 во вдыхаемом воздухе (2 состояния: нормоксия и гипоксия), а также взаимодействия факторов “Тренированность $\times O_2$ ” на исходные кардио-респираторные показатели и их вклады в ГК, использовали дисперсионный анализ для повторных наблюдений (*repeated measures ANOVA*) с уровнем тренированности (ВТ и СТ) в качестве категориального предиктора. В случае опровержения нулевой гипотезы использовали *post hoc* анализ по критерию Фишера. Сравнение антропометрических показателей в группах ВТ и СТ проводили по *t*-тесту Стьюдента. Частоты встречаемости сравнивали по критерию хи-квадрат (χ^2). Для оценки статистически значимых различий КК в группах ВТ и СТ был проведен *U* тест Манна-Уитни.

Анализ дынных выполняли с использованием пакета прикладных программ “*Statistica 10*”. Уровень значимости, принятый в исследовании – 5% ($p < 0.05$). При этом значения $0.05 \leq p < 0.10$ также приведены в таблицах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Антропометрическая характеристика обследованных. По возрасту, росту и массе тела ВТ и СТ не различались (табл. 1). Однако по индексу массы тела (ИМТ) ВТ отличались в большую сторону от СТ ($p < 0.05$), что, по-видимому, объясняется большим вкладом мышечной массы в состав тела,

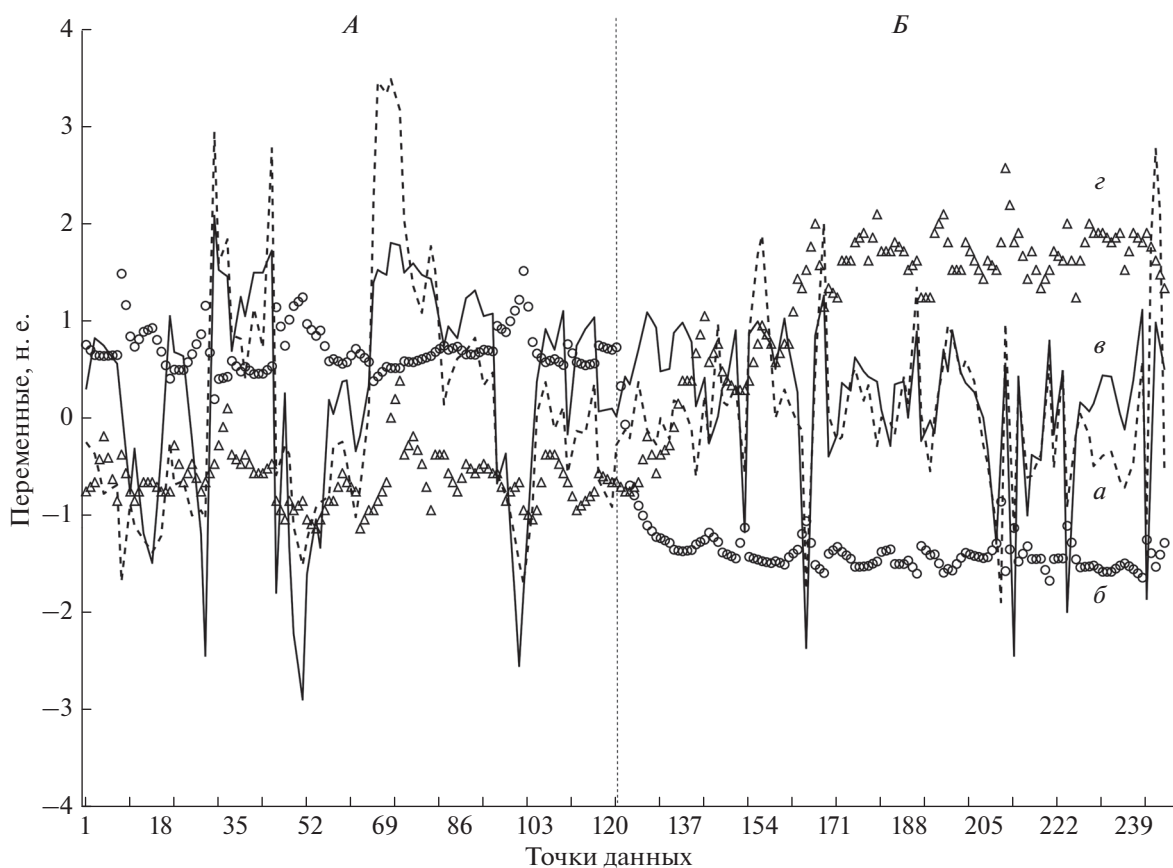


Рис. 1. Пример исходных временных рядов четырех переменных в нормализованных единицах (н. е.). А – нормоксия 21% O₂, Б – гипоксия 10% O₂; а – минутный объем дыхания (МОД), б – фракционная концентрация O₂ в выдыхаемом воздухе, в – фракционная концентрация CO₂ в выдыхаемом воздухе, з – частота сердечных сокращений (ЧСС). Одна точка данных – 5 с.

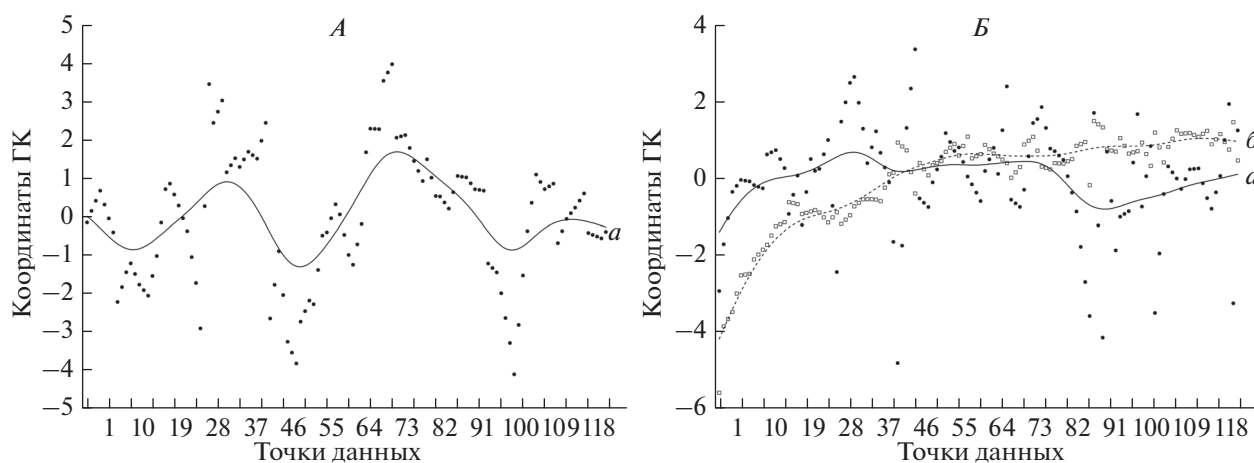


Рис. 2. Пример временных рядов главных компонент (ГК), полученных из переменных, изображенных на рис. 1. А – нормоксия 21% O₂, Б – гипоксия 10% O₂; а – ГК1, б – ГК2.

так как содержание мышц возрастает при увеличении повседневной физической активности [17].

Сравнение средних показателей газообмена, дыхания и сердцебиения. Дисперсионный анализ показал, что влияние тренированности на усред-

Таблица 1. Антропометрическая характеристика обследованной группы: M (SD)

Группы	Возраст	Рост, см	Масса тела, кг	ИМТ, кг/м ²
ВТ, $n = 9$	21.1 (2.3)	181.4 (5.7)	71.6 (7.9)	21.9 (1.7)
СТ, $n = 9$	20.1 (2.4)	181.0 (4.6)	66.9 (7.5)	20.3 (1.4)*

Примечание: ВТ – высокоотренированные, СТ – среднетренированные, ИМТ – индекс массы тела, M – среднее, SD – стандартное отклонение, * – $p = 0.042$ (t -тест).

Таблица 2. Кардио-респираторные показатели, усредненные за 2 последние минуты нормоксии и гипоксии, в зависимости от тренированности

Показатели	Трен.	21% O ₂		10% O ₂		ANOVA, p		
		M	(SD)	M	(SD)	Трен.	O ₂	Трен. × O ₂
SaO ₂ , %	ВТ	97.4	(0.9)	72.6**	(8.9)	НД	<0.001	НД
	СТ	98.2	(1.0)	71.4**	(7.9)			
ЧСС, мин ⁻¹	ВТ	62.1	(11.0)	84.8**	(17.7)	НД	<0.001	НД
	СТ	67.4	(4.5)	87.9**	(5.2)			
МОД, л/мин	ВТ	9.9	(2.9)	12.1**	(3.6)	НД	0.042	0.035
	СТ	10.5	(1.8)	10.4	(1.9)			
ЧД, мин ⁻¹	ВТ	14.6	(4.2)	13.8	(5.4)	НД	НД	НД
	СТ	14.2	(3.7)	13.3	(3.7)			
ДО, мл	ВТ	722	(211)	983**	(314)	НД	<0.001	0.052
	СТ	810	(278)	892	(302)			
FeO ₂ , %	ВТ	18.3	(0.8)	8.3**	(0.6)	НД	<0.001	НД
	СТ	18.0	(0.6)	8.1**	(0.7)			
FeCO ₂ , %	ВТ	2.5	(0.7)	2.6	(0.6)	НД	НД	НД
	СТ	2.8	(0.6)	2.6	(0.6)			

Примечание: Трен. – тренированность, НД – недостоверно, SaO₂ – насыщение крови кислородом, ЧСС – частота сердечных сокращений, МОД – минутный объем дыхания, ЧД – частота дыхания, ДО – дыхательный объем, FeO₂ и FeCO₂ – фракционная концентрация O₂ и CO₂ в выдыхаемой газовой смеси, ** – достоверное изменение от нормоксии к гипоксии ($p < 0.01$). Остальные обозначения см. табл. 1.

ненные за 2 мин показатели газообмена, дыхания и сердцебиения не было достоверно: ВТ- и СТ-легкоатлеты не различались по величинам изучаемых показателей как при нормоксии, так и при гипоксии (табл. 2). Содержание кислорода во вдыхаемом воздухе повлияло на насыщение крови кислородом, содержание кислорода в выдыхаемом воздухе и ЧСС независимо от тренированности. На минутную вентиляцию и ДО гипоксия повлияла по-разному, в зависимости от уровня тренированности (достоверное взаимодействие факторов). Только в группе ВТ к концу гипоксического исследования эти показатели превышали исходный уровень.

Анализ главных компонент. В нормоксических условиях у 8 чел. из 18, модель ГК, объясняющая большую часть дисперсии всех четырех кардио-респираторных показателей, состояла всего из одной ГК1 (рис. 3). Поскольку для определения количества ГК в модели пользовались критерием

Кайзера, следующие ГК (ГК2 и т.д.) имели собственные значения меньше единицы, т.е. объясняли меньше дисперсии, чем исходные переменные. В группах ВТ и СТ количество спортсменов с одним ГК было одинаковым (по 4 чел.). При гипоксии у всех бегунов модель стала состоять из двух ГК (ГК1 и ГК2). Различие между частотой встречаемости бегунов с одним ГК в условиях нормоксии и гипоксии достоверно ($p = 0.001$). Поскольку в один ГК входят скоординированные переменные, можно заключить, что координация кардио-респираторных переменных при острой гипоксии снижается по сравнению с нормоксией как у ВТ-, так и СТ-бегунов.

При нормоксии ГК1 объясняет около половины всей дисперсии, а ГК2 – около четверти (табл. 3). Достоверное влияние уровня тренированности и взаимодействия факторов “Тренированность × O₂” обнаружено не было. Дисперсионный анализ выявил влияние содержания кислорода во вдыхаемом

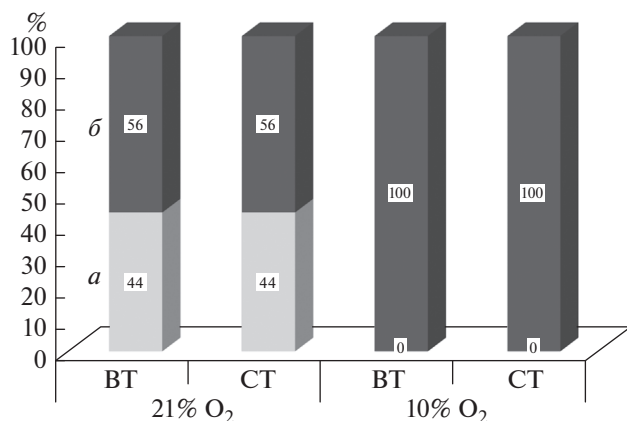


Рис. 3. Процент бегунов с одним главным компонентом (ГК) и двумя ГК в нормоксических и гипоксических условиях.

VT – высокотренированные, ST – среднетренированные; а – 1 ГК, б – 2 ГК.

мом воздухе на ГК2. Во время гипоксии достоверно увеличивается процент общей дисперсии, объясняемый ГК2, в основном за счет снижения первого ГК, не зависимо от уровня тренированности. Это также указывает на снижение координации при гипоксии. Процент дисперсии, объясняемый двумя ГК в сумме, не изменяется достоверно.

Вклады переменных в формирование ГК. В условиях нормоксии (21% O₂) между группами VT и ST нет достоверной разницы по вкладам всех четырех показателей в дисперсию ГК1 и ГК2 (табл. 4). Газовый состав выдыхаемого воздуха (FeCO₂ и FeO₂) является определяющим в формировании ГК1 в обеих группах. Причем максимальный из всех четырех показателей вклад вносит концентрация углекислого газа на выдохе – 38–39%. Вклад легочной вентиляции в дисперсию ГК1 составляет около пятой части, а вклад ЧСС – в среднем 5%. В формирование ГК2 основной вклад вносит ЧСС (67–77%). При этом ГК2 при нор-

моксии почти у половины обследованных легкоатлетов можно было пренебречь по критерию Кайзера, оставив в модели только ГК1.

Выявлено **влияние гипоксии (10% O₂)** на вклад FeCO₂ в ГК1 и ГК2 в обеих группах тренированности. Вклад FeCO₂ в ГК1 при гипоксии снижается, а в ГК2 – увеличивается. Противоположная ситуация происходит с ЧСС. Однако на вклад ЧСС в ГК1 достоверно влияет не только концентрация O₂, но и уровень тренированности, а также обнаружено взаимодействие факторов “Тренированность × O₂”, указывающее на различающуюся реакцию на гипоксию в исследуемых группах. Вклад ЧСС в ГК1 достоверно увеличивается в ответ на гипоксию только в группе ST. Концентрация O₂ и взаимодействие факторов “Тренированность × O₂” также влияют на вклад ЧСС в ГК2, что указывает на различающуюся реакцию на гипоксию в группах VT и ST. *Post-hoc* анализ показал, что снижение вклада ЧСС в ГК2 происходит в обеих группах, но в группе ST достоверно сильнее. Кроме того, в условиях гипоксии только в группе ST достоверно ($p = 0.031$) возрастает вклад МОД в формирование ГК2.

Таким образом, в условиях нормоксии в обеих группах тренированности скоординированы показатели газового состава выдыхаемого воздуха и легочной вентиляции, составляющие ГК1. ЧСС составляет основу ГК2, объясняющего в 2 раза меньше суммарной дисперсии, чем ГК1. При гипоксии происходит перераспределение вкладов показателей в ГК1 и ГК2, более выраженное в группе ST: вклад ЧСС в ГК1 увеличивается, а концентрации CO₂ снижается.

Коэффициент конгруэнтности Такера. Коэффициент конгруэнтности, рассчитанный для ГК1 в двух состояниях (нормоксии и гипоксии), достоверно больше в группе VT, чем ST (табл. 5). Это подтверждает предыдущие результаты, основанные на сравнении вкладов отдельных показателей, указывая на то, что в группе VT структура ГК1 при нормоксии более подобна таковой при

Таблица 3. Процент общей дисперсии, объясняемой ГК1 и ГК2 в условиях нормоксии и гипоксии

Компоненты	Трен.	21% O ₂		10% O ₂		ANOVA, <i>p</i>		
		<i>M</i>	(<i>SD</i>)	<i>M</i>	(<i>SD</i>)	Трен.	O ₂	Трен. × O ₂
ГК1	VT	51.6	(9.11)	48.1	(5.09)	НД	0.084	НД
	ST	50.2	(7.83)	45.0	(5.00)			
ГК2	VT	25.8	(4.27)	31.4	(5.30)	НД	0.001	НД
	ST	26.0	(2.66)	33.5	(3.25)			
Σ	VT	77.3	(6.46)	79.4	(8.04)	НД	НД	НД
	ST	76.2	(2.66)	78.5	(5.65)			

Примечание: ГК – главный компонент. Остальные обозначения см. табл. 1 и 2.

Таблица 4. Вклады переменных в ГК1 и ГК2 в условиях нормоксии и гипоксии

Показатели	Трен.	21% O ₂		10% O ₂		ANOVA, p		
		M	(SD)	M	(SD)	Трен.	O ₂	Трен. × O ₂
Вклад в ГК1 × 100								
ЧСС	ВТ	6	(6)	13	(10)	0.022	<0.001	0.006
	СТ	4	(3)	32** ^{##}	(15)			
МОД	ВТ	23	(14)	27	(10)	НД	НД	НД
	СТ	20	(13)	14	(14)			
FeO ₂	ВТ	33	(12)	33	(9)	НД	НД	НД
	СТ	37	(7)	35	(13)			
FeCO ₂	ВТ	38	(9)	27*	(12)	НД	<0.001	НД
	СТ	39	(8)	19**	(13)			
Вклад в ГК2 × 100								
ЧСС	ВТ	67	(22)	48*	(17)	НД	<0.001	0.005
	СТ	77	(20)	20** ^{##}	(22)			
МОД	ВТ	18	(21)	20	(20)	НД	0.086	НД
	СТ	17	(21)	38*	(21)			
FeO ₂	ВТ	13	(19)	13	(11)	НД	НД	НД
	СТ	5	(7)	14	(15)			
FeCO ₂	ВТ	2	(2)	20**	(15)	НД	<0.001	НД
	СТ	2	(2)	29**	(15)			

Примечание: * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$ – отличие от нормоксии; ^{##} – отличие между ВТ и СТ, $p < 0.001$ (post-hoc LSD Фишера). Остальные обозначения см. табл. 1, 2 и 3.

Таблица 5. Сравнение коэффициентов конгруэнтности (КК) нормоксия-гипоксия в группах ВТ и СТ

Группы	КК ГК1		КК ГК2		Манн-Уитни U тест, p	
	Me	Q1/Q3	Me	Q1/Q3	ГК1	ГК2
ВТ, n = 9	0.88	0.84/0.93	0.47	0.33/0.71	0.045	НД
СТ, n = 9	0.82	0.46/0.94	0.32	0.20/0.62		

Примечание: КК ГК – коэффициент конгруэнтности главных компонент, Me – медиана, Q1, Q3 – нижний и верхний квартили. Остальные обозначения см. табл. 1 и 2.

гипоксии, т.е. претерпевает меньше изменений. Различия КК ГК2 между группами ВТ и СТ не значимы.

Результаты исследования, направленного на изучение характеристик ГК, характеризующих кардио-респираторную координацию, в условиях как нормоксии, так и при остром гипоксическом стрессе, в зависимости от тренированности спортсменов-бегунов, показали 3 новых факта. Во-первых, в покое в условиях нормоксии кардио-респираторная координация у легкоатлетов выше, чем при острой нормобарической гипоксии. Второй факт касается уточнения вкладов исходных кардио-респираторных переменных в новые ГК. В условиях нормоксии скоординиро-

ваны показатели газового состава выдыхаемого воздуха и легочной вентиляции, составляющие ГК1. ЧСС составляет основу ГК2, объясняющего в 2 раза меньше суммарной дисперсии, чем ГК1. При гипоксии происходит перераспределение вкладов показателей в ГК1 и ГК2: вклад ЧСС в ГК1 увеличивается, а концентрации CO₂ снижается. Третий факт зависит от спортивного мастерства: у ВТ-легкоатлетов структура ГК1 при нормоксии более подобна таковой при гипоксии, т.е. претерпевает меньше изменений, чем у СТ-легкоатлетов.

Необходимо отметить, что примененный в данной работе анализ ГК позволяет рассматривать временные ряды данных за все 20 мин обсле-

дования. Поэтому полученные результаты учитывают координацию за весь временной интервал. Ранее исследователи рассматривали влияние гипоксии на отдельные кардио-респираторные показатели в определенные временные точки или усредняли показатели за некоторый промежуток времени [7], что при гипоксии приводило к потере информации из-за нестационарности процессов при этом воздействии.

Анализ ГК применялся в исследованиях с физической нагрузкой [13]. Это оправдано с точки зрения того, как сердечно-сосудистая и дыхательная системы скоординированы относительно плавно нарастающего метаболического запроса. Результат увеличения тренированности также закономерен — при адаптации к физической нагрузке, т.е. физической тренировке, координация этих систем увеличивается. Причем, увеличивается как при аэробной тренировке, так и резистивной. В настоящем исследовании применили этот метод в отсутствии двигательной активности, используя гипоксическое воздействие. Можно предположить, что для бега как вида спорта, в котором результат значительно зависит от состояния кислородтранспортной системы и ее регуляции, адаптация этой системы к регулярному увеличению метаболического запроса до максимально возможного уровня приведет к перекрестной адаптации к гипоксемии. Подтверждением этой гипотезы служит обнаруженный в настоящей работе факт, что структура ГК1 более подобна таковой в группе ВТ-бегунов. Возможно, что сравнение более отстоящих друг от друга по тренированности групп, например, лица вообще без двигательной активности и мастера спорта, выявило бы более сильные различия. Однако то, что даже бегуны 1 и 2 разряда показали различия с помощью примененного методического подхода, является свидетельством использования анализа ГК для оценки кардио-респираторной координации при стрессорном воздействии в фундаментальных исследованиях и как дополнительного метода прогнозирования в спорте.

Известно, что физическая тренировка приводит к изменению в кардио-респираторной координации в условиях нормоксии. С использованием теста причинности Грэнджера удалось разделить спортсменов и не спортсменов в состоянии покоя с точностью 83% [5]. В другой работе исследователи продемонстрировали модифицированный нейронный контроль сердечного ритма у спортсменов по сравнению с нетренированными испытуемыми [18]. Показано также увеличение кардио-респираторной координации с помощью уменьшения количества ГК с двух до одного в велоэргометрическом тесте после 6 нед. аэробных и даже резистивных тренировок [13]. Причем этот эффект наблюдался приблизительно у половины испытуемых. В нашем исследовании более

и менее тренированные легкоатлеты не различались по количеству ГК в условиях нормоксического или гипоксического покоя. Различие касалось вкладов ГК и меры подобия ГК между нормоксией и гипоксией — т.е. изменением между этими состояниями. Выявляемая анализом ГК реакция кардио-респираторной системы у ВТ не такая выраженная, как у СТ.

Необходимо подчеркнуть, что в настоящей работе не рассматривается респираторная синусовая аритмия, наблюдаемая в норме в условиях покоя у здоровых людей. Частота снятия данных (0.2 Гц) не позволяет рассматривать этот аспект кардио-респираторного сопряжения. В то же время, с помощью примененного в данной работе метода, удалось найти различия между ВТ- и СТ-легкоатлетами в реакции на гипоксию, при отсутствии различий в кардио-респираторных показателях между группами ВТ и СТ как в покое, так и при гипоксии.

В настоящем исследовании спортсмены-бегуны различаются в нормоксии только по уровню спортивного мастерства, однако удалось показать отличие между ними по результатам анализа ГК в ответ на гипоксический стресс. Можно считать, что рост спортивного мастерства происходит не только за счет изменений абсолютных значений кардио-респираторных показателей, но и за счет изменения механизмов, обеспечивающих оптимальность межсистемной координации хеморецепторных реакций на развивающуюся гипоксемию. На основании полученных данных можно предполагать, что бегуны с оптимальным ответом на тестирующее гипоксическое воздействие, имеют большие перспективы профессионального спортивного роста. Тот факт, что у более подготовленных бегунов структура кардио-респираторной координации претерпевает меньшие изменения в ответ на гипоксию, вероятно, играет аналогичную роль: “Настройка и синхронизация ритмов экономит энергию” [19]. Известно, что физиологическая сеть претерпевает топологические переходы, связанные с быстрой реорганизацией взаимодействий на временных масштабах в несколько минут [20]. Вероятно, что меньшие изменения при гипоксическом стрессе в более тренированной группе связаны с более высокой скоростью перестройки сети. 10-минутной гипоксии спортсменам из этой группы было достаточно для формирования новых межсистемных взаимодействий, в отличие от менее подготовленных бегунов. В противном случае можно предположить, что бегуны более высокого уровня выработали более точно скоординированные реакции на воздействие.

Ранее в лаборатории было показано [7], что в зависимости от индивидуальной хемореактивности, при проведении гипоксических и гиперкап-

нических тестов, происходит разделение спортсменов на группы в зависимости от вида спорта. Разработка этого вопроса привела 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 [21]. Показано, что характер тренировочного процесса и особенности паттерна дыхания, возникающие как следствие специфики тренировочного процесса, модулируют чувствительность мозговых структур к гипоксии, что находит отражение в динамике ритмов α -диапазона ЭЭГ в условиях гипоксии [22]. Результаты настоящего исследования позволяют предполагать, что по мере роста спортивной квалификации происходит совершенствование механизмов межсистемной координации, которое проявляется в оптимизации ответа физиологических систем на изменение уровня кислорода в крови. Возможно, что для разных видов спорта существуют свои функциональные оптимумы, которые могут служить ориентиром для выявления перспективных спортсменов.

К ограничениям данного исследования можно отнести отсутствие в модели временных рядов АД, которые могли бы восстановить более полно модель кардио-респираторной координации. Кроме того, недавно показано, что генетическая предрасположенность (полиморфизм генов *NOTCH4* и *CAT*) может частично объяснить гетерогенность гипоксического ответа [23]. Поэтому для дифференцирования эффектов тренировки от генетических аспектов, необходимы лонгитюдные исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, у высококлассных легкоатлетов-бегунов на средние дистанции наблюдается совершенствование механизмов межсистемной кардио-респираторной координации при гипоксии, которое проявляется в высокой степени стабильности главных компонент при гипоксическом стрессе. Это обеспечивает оптимальность хемореактивных ответов на гипоксические воздействия и отражает адаптивные настройки кардио-респираторной системы у спортсменов высокого класса при интенсивных аэробных нагрузках и может служить дополнительным прогностическим признаком хороших спортивных результатов.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлений, и одобрены Этическим комитетом

Научно-исследовательского института нейронаук и медицины (г. Новосибирск), протокол № 1 от 21.01.2016.

Информированное согласие. Каждый участник исследования предоставил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Работа выполнена за счет средств федерального бюджета на проведение фундаментальных научных исследований (тема № АААА-А21-121011990040-8).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козловская И.Б., Егоров А.Д., Сонькин В.Д. Некоторые подходы к системе профилактики для марсианской экспедиции // Физиология человека. 2010. Т. 36. № 3. С. 12.
Kozlovskaya I.B., Egorov A.D., Sonkin V.D. Some approaches to prophylactic measures in a martian expedition // Human Physiology. 2010. V. 36. № 3. P. 259.
2. Amirova L., Navasiolava N., Rukavishnikov I. et al. Cardiovascular system under simulated weightlessness: head-down bed rest vs. dry immersion // Front. Physiol. 2020. V. 11. P. 395.
3. Krohova J., Czippelova B., Turianikova Z. et al. Information domain analysis of respiratory sinus arrhythmia mechanisms // Physiological Research. 2018. V. 67 (Suppl. 4). P. S611.
4. Kiselev A.R., Borovkova E.I., Simonyan M.A. et al. Autonomic control of cardiorespiratory coupling in healthy subjects under moderate physical exercises // Russ. Open Med. J. 2019. V. 8. № 4. P. e0403.
5. Mlynczak M., Krysztofiak H. Cardiorespiratory temporal causal links and the differences by sport or lack thereof // Front. Physiol. 2019. V. 10. P. 45.
6. Uryumtsev D.Y., Gulyaeva V.V., Zinchenko M.I. et al. Effect of acute hypoxia on cardiorespiratory coherence in male runners // Front. Physiol. 2020. V. 11. P. 630.
7. Диверт В.Э., Кривощекоев С.Г., Водяницкий С.Н. Индивидуально-типологическая оценка реакций кардиореспираторной системы на гипоксию и гиперкапнию у здоровых молодых мужчин // Физиология человека. 2015. Т. 41. № 2. С. 64.
Divert V.E., Krivoshekov S.G., Vodyanitsky S.N. Individual-typological assessment of cardiorespiratory responses to hypoxia and hypercapnia in young healthy men // Human Physiology. 2015. V. 41. № 2. P. 166.
8. Диверт В.Э., Комлягина Т.Г., Красникова Н.В. и др. Кардиореспираторные реакции на гипоксию и гиперкапнию у пловцов // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. 2017. Т. 7. № 5. С. 207.
Divert V.E., Komlyagina T.G., Krasnikova N.V. et al. [Cardiorespiratory responses of swimmers to hypoxia

- and hypercapnia] // Novosibirsk State Pedagogical University Bulletin. 2017. V. 7. № 5. P. 207.
9. Hayano J., Yuda E. Pitfalls of assessment of autonomic function by heart rate variability // J. Physiol. Anthropol. 2019. V. 38. № 1. P. 3.
 10. Tzeng Y.C., Larsen P.D., Galletly D.C. Effects of hypercapnia and hypoxia on respiratory sinus arrhythmia in conscious humans during spontaneous respiration // Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol. 2007. V. 292. № 5. P. H2397.
 11. Brown S.J., Barnes M.J., Mündel T. Effects of hypoxia and hypercapnia on human HRV and respiratory sinus arrhythmia // Acta Physiol. Hung. 2014. V. 101. № 3. P. 263.
 12. Yasuma F., Hayano J. Impact of acute hypoxia on heart rate and blood pressure variability in conscious dogs // Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol. 2000. V. 279. № 5. P. H2344.
 13. Balagué N., González J., Javierre C. et al. Cardiorespiratory coordination after training and detraining. A principal component analysis approach // Front. Physiol. 2016. V. 7. P. 35.
 14. Garcia-Retortillo S., Javierre C., Hristovski R. et al. Cardiorespiratory coordination in repeated maximal exercise // Front. Physiol. 2017. V. 8. P. 387.
 15. Гришин В.Г., Гришин О.В., Гультяева В.В. и др. Низкочастотные колебания показателей системы транспорта кислорода у человека в покое // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2019. Т. 105. № 9. С. 1154.
Grishin V.G., Grishin O.V., Gulyaeva V.V. et al. Very-low frequency oscillations of oxygen transport in resting humans // Russian Journal of Physiology. 2019. V. 105. № 9. P. 1154.
 16. Lorenzo-Seva U., Berge J. Tucker's congruence coefficient as a meaningful index of factor similarity // Methodology. 2006. V. 2. № 2. P. 57.
 17. Гультяева В.В., Зинченко М.И., Урюмцев Д.Ю. и др. Физическая активность и реакция артериального давления на кистевую нагрузку // Физиология человека. 2019. Т. 45. № 1. С. 73.
Gulyaeva V.V., Zinchenko M.I., Uryumtsev D.Y. et al. Physical activity and arterial blood pressure response to handgrip exercisy // Human Physiology. 2019. V. 45. № 1. P. 62.
 18. Platiša M.M., Bojić T., Mazić S., Kalauzi A. Generalized Poincaréplots analysis of heart period dynamics in different physiological conditions: Trained vs. untrained men // Plos One. 2019. V. 14. № 7. P. e0219281.
 19. Moser M., Frühwirth M., Penter R., Winker R. Why life oscillates – from a topographical towards a functional chronobiology // Canc. Causes Contr. 2006. V. 17. № 4. P. 591.
 20. Bashan A., Bartsch R.P., Kantelhardt J.W. et al. Network physiology reveals relations between network topology and physiological function // Nature Communications. 2012. V. 3. P. 702.
 21. Melnikov V.N., Krivoschekov S.G., Divert V.E. et al. Baseline values of cardiovascular and respiratory parameters predict response to acute hypoxia in young healthy men // Physiol. Res. 2017. V. 66. № 3. P. 467.
 22. Балиоз Н.В., Баранов В.И., Боброва Ю.В. и др. Особенности межсистемной интеграции и гемореактивности кардио-респираторной системы спортсменов в зависимости от уровня спортивной квалификации // Ульяновский медико-биологический журнал. 2018. № 3. С. 133.
Balioz N.V., Baranov V.I., Bobrova Yu.V. et al. Intersystem integration and chemoresponsiveness of cardiorespiratory system in athletes according to their sports qualification // Ulyanovsk Medico-Biological Journal. 2018. № 3. P. 133.
 23. Lancaster G., Debevec T., Millet G.P. et al. Relationship between cardiorespiratory phase coherence during hypoxia and genetic polymorphism in humans // J. Physiol. 2020. V. 598. № 10. P. 2001.

Cardiorespiratory Coordination in Acute Hypoxia in Runners

S. G. Krivoschekov^a, D. Yu. Uryumtsev^a, V. V. Gulyaeva^{a,*}, M. I. Zinchenko^a

^aFederal State Budgetary Scientific Institution “Scientific Research Institute of Neuroscience and Medicine”, Novosibirsk, Russia

*E-mail: gulyaevavv@physiol.ru

The aim of the study was to determine cardiorespiratory coordination under the influence of acute hypoxia in athletes with different levels of sports qualifications. Eighteen runners aged 17 to 25 were exposed to acute (10% O₂) hypoxia for 10 minutes. Respiration, gas exchange, and heart rate were measured during normoxia and hypoxia. To assess cardiorespiratory coordination, the principal component (PC) analysis was used; the stability of the PCs under the influence of hypoxia was evaluated by the Tucker's Congruence Coefficient. The analysis was performed on a time series of 10 minutes of normoxia and hypoxia with the inclusion of heart rate, minute ventilation, expired fraction of O₂ and CO₂. According to the level of qualification, athletes were divided into 2 groups – highly trained (HT, not lower than I category, n = 9) and medium-trained (MT, II category, n = 9). Under normoxia, cardiorespiratory coordination in athletes of both groups was higher than in normobaric hypoxia (p = 0.001): during normoxia the model included one PC from coordinated variables according to the Kaiser criterion in 44% of the athletes; during hypoxia the model consisted of two PCs in 100% of the athletes. During hypoxia, the percentage of total variance explained by PC2 increased signifi-

cantly ($p < 0.001$), regardless the level of qualification. In hypoxia, there was a change in the variable contributions to PC1 and PC2, more pronounced in the MT group: the contribution of heart rate to PC1 increased, and the expired fraction of CO_2 decreased ($p < 0.001$). The congruence coefficient of the first PC between the normoxia and hypoxia in the HT group showed a high level of similarity (median = 0.88; 25/75% = 0.84/0.93), and was significantly ($p < 0.05$) higher than in MT (0.82; 0.46/0.94). Thus, highly qualified athletes have higher cardio-respiratory stability under hypoxic exposure. This can serve as an additional predictive sign of good athletic performance.

Keywords: athletes, hypoxia, cardio-respiratory coordination, principal component analysis.