

УДК 612.2:612.13:612.22/23:612.89:612.017.11

## РЕАКТИВНОСТЬ И ЭКОНОМИЧНОСТЬ КАРДИОРЕСПИРАТОРНОЙ СИСТЕМЫ НА ГИПОКСИЮ И ФИЗИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ У ПЛОВЦОВ И ЛЫЖНИКОВ

С.Г. Кривошеков<sup>1</sup>, С.Н. Водяницкий<sup>1</sup>, В.Э. Диверт<sup>1</sup>, Л.А. Гиренко<sup>2</sup><sup>1</sup>НИИ физиологии СО РАМН, г. Новосибирск,<sup>2</sup>Новосибирский государственный педагогический университет

В работе проведено сравнение реактивности и экономичности кардиореспираторной системы на пролонгированное нарастающее по силе гипоксическое воздействие и физическую работу на уровне порога анаэробного обмена у пловцов, лыжников и физически не тренированных лиц. Установлены особенности структуры ответов кардиореспираторной системы на физическую нагрузку и гипоксию. Выявлены различия в состоянии вегетативной нервной системы у пловцов и лыжников, которые влияют на механизмы формирования ответных реакций кардиореспираторной системы на предъявляемую гипоксию и физическую нагрузку. Установлено, что адаптивные изменения деятельности кардиореспираторной системы у лыжников идут преимущественно по пути повышения экономичности функционирования кислородного обеспечения, а у пловцов – по пути повышения реактивности ответных реакций. Эти отличия проявляются как при физических нагрузках, так и при гипоксическом воздействии.

**Ключевые слова:** гипоксия, анаэробный порог, кардиореспираторная система, вегетативная нервная система.

**Введение.** Гипоксическое состояние при выполнении физической работы (гипоксия нагрузки) является одним из главных лимитирующих факторов, приводящих к гипоксемии и ограничению работоспособности [1, 2, 7]. Реакции организма на развивающуюся гипоксию нагрузки носят системный характер и отражают специфику фенотипической адаптации к гипоксическим состояниям.

Специальные физические тренировки (фенотипическая адаптация) могут адаптивно изменять функциональные резервы организма и показатели реактивности кислород-транспортной системы, что наиболее ярко представлено в спортивной деятельности [1, 7, 12]. На примерах физической тренировки различной направленности, таких как плавание и лыжные гонки, возможно изучение отдельных функциональных изменений в кардиореспираторной системе организма, оказывающих влияние на индивидуальную реактивность и экономичность ответных реакций.

При занятиях бегом на лыжах тренировка проходит в условиях неограниченного ис-

пользования кислородных ресурсов окружающей среды и холодовых воздействий. Вследствие систематически возникающих повышенных кислородных запросов адаптивным изменениям подвергаются системы транспорта кислорода и утилизации его в тканях, в т.ч. и нервная регуляция соответствующих функций. При занятиях плаванием регуляция дыхания подчинена ритму специфических движений, что формирует способность ограничивать уровень легочной вентиляции за счет редких и неглубоких вдохов [20], что в свою очередь обеспечивается перенастройкой нервной регуляции дыхания.

Оценку реактивных свойств реакции кардиореспираторной системы организма на гипоксию можно проводить с помощью ингаляции нормобарических гипоксических газовых смесей. Анализ научной литературы [3, 18, 29] показывает выраженную индивидуальную вариабельность ответных реакций, в основе которой могут лежать как фенотипические, так и генетические особенности [9, 14].

Важную роль в регуляции ответов кардиореспираторной системы на гипоксическое воздействие играет преобладание симпатического либо парасимпатического влияния вегетативной нервной системы (ВНС). В свою очередь физические тренировки с различным паттерном дыхания, вероятно, могут по-разному влиять на баланс активности отделов ВНС. Перестройки вегетативной регуляции функций в условиях гипоксии обнаружены при острой умеренной барокамерной гипоксии, при длительной высокогорной акклиматизации, в курсе интегральной гипоксической тренировки [3–5, 19, 22–24]. Влияние регулярных физических нагрузок, сопровождающихся гипоксией нагрузки, в сочетании с ограничением поступления кислорода из внешней среды (плавание), а также баланс активности симпатической и парасимпатической регуляции изучены недостаточно. Неясно, как изменяется реактивность ответа кардиореспираторной системы при систематических физических нагрузках высокой интенсивности и какое влияние при этом оказывает ограничение поступления кислорода во время плавания на другие показатели кардиореспираторной системы. Также неясно, как изменяется экономичность и реактивность кардиореспираторной системы у спортсменов с разным уровнем аэробных резервов организма.

**Цель исследования.** Сравнительное изучение реакций внешнего дыхания, газообмена и деятельности сердца на пролонгированное гипоксическое воздействие и роли вегетативного баланса в этом процессе у здоровых людей в зависимости от типа дыхания при физической нагрузке и особенностей вегетативной регуляции нервной системы.

**Материалы и методы.** Обследовано 11 спортсменов-пловцов, 14 спортсменов-лыжников и 12 лиц, специально спортом не занимавшихся (контроль). Средний возраст обследованных в группе пловцов составил  $20,7 \pm 0,9$  года, рост  $177,4 \pm 2,0$  см, масса тела  $74,1 \pm 2,4$  кг; в группе лыжников –  $19,3 \pm 0,3$  года,  $179,9 \pm 1,8$  см,  $70,3 \pm 1,7$  кг; в контрольной группе –  $21,9 \pm 0,7$  года,  $178,3 \pm 2,3$  см,  $75,8 \pm 3,5$  кг соответственно. Структура групп спортсменов по квалификации сопоставима. Все об-

следованные лица – жители г. Новосибирска, студенты.

Предварительно все испытуемые были ознакомлены со схемой эксперимента, одобренной этической комиссией Института физиологии СО РАМН, и дали согласие на участие в исследовании.

Для оценки газообмена и функционального состояния кардиореспираторной системы при гипоксии и во время физической нагрузки использовалась эргоспирометрическая система Охусон Pro® фирмы Erich Jaeger (Германия) в комплектации с велоэргометром Ergoline и пульсоксиметром BCI Autocorr фирмы Smiths Medical PM, Inc. (США).

**Гипоксический тест.** Применялось постепенное 25-минутное снижение содержания кислорода в дыхательной смеси по экспоненциальному закону с 20,8 до 11,0 %, которое достигалось путем разбавления атмосферного воздуха в мешке емкостью 250 л гипоксической газовой смесью (9,9 %  $O_2$ , 0,03 %  $CO_2$ ), получаемой на кислородном концентраторе Companion 590i (Nellcor Puritan Bennett, USA), переоборудованном в гипоксикатор согласно свидетельству на полезную модель № 24098 от 27 июля 2002 г. (модель устройства «Тибет-4»).

В течение обследования регистрировали легочную вентиляцию (VE, л/мин), частоту дыхания (BF, ед./мин), дыхательный объем (VT, л), скорость потребления кислорода ( $VO_2$ , л/мин), скорость выделения углекислого газа ( $VCO_2$ , л/мин), вентиляторный эквивалент  $O_2$  ( $EqO_2$ , л/л), парциальное давление  $CO_2$  в конечной порции выдыхаемого воздуха ( $PetCO_2$ , кПа), частоту сердечных сокращений (HR, уд./мин) и сатурацию гемоглобина крови кислородом ( $SaO_2$ , %).

На I этапе (1 день) непосредственно перед экспериментом в течение получаса проводились росто-весовые замеры и заполнялись анкетные данные, у испытуемых измеряли артериальное давление и частоту сердечных сокращений с помощью устройства MT-40 (MediTech, USA). Затем испытуемые усаживались в кресло и подключались через маску к эргоспирометрической системе Охусон Pro и ушному пульсоксиметру. В течение первых 10 мин регистрировали показате-

тели для оценки исходного состояния. В дальнейшем через маску в течение 25 мин подавалась гипоксическая газовая смесь.

Анализ результатов гипоксического теста проводили путем усреднения 10 последовательных значений показателей за последние 5 мин исходного состояния, трех последовательных значений на 19–20-й мин гипоксического воздействия.

На II этапе (2 день) исследования после получасовой адаптации к лабораторным условиям испытуемые садились на велоэргометр, надевали маску и ушной датчик пульсоксиметра. После 5 мин записи показателей в исходном состоянии обследуемые выполняли физическую нагрузку со ступенчатым повышением мощности (5 ватт каждые 30 с, скорость педалирования 60 об./мин). По достижении анаэробного порога испытуемым предлагалось остановиться или продолжить работу до отказа.

Порог анаэробного обмена (АТ) определяли по алгоритму штатной расчетной программы газоанализатора Oхуson Pro (метод V-slope), когда на графике зависимости  $VE/VO_2$  ( $=EqO_2$ ) от мощности нагрузки возникла точка перегиба, за которой вентиляторный эквивалент  $O_2$  начинал резко увеличиваться [21]. Дополнительно расчетным путем по В.Л. Карпману с соавт. [6] определяли индивидуальный уровень максимального потребления кислорода ( $VO_{2max}$ ), а также долю  $VO_{2AT}$  от  $VO_{2max}$ .

При велоэргометрическом тесте использовали значения показателей в момент достижения АТ. Экономичность мышечной работы рассчитывали как отношение валового потребления кислорода до момента наступления АТ ко всему объему выполненной работы (кислородная стоимость работы (КСР), мл  $O_2$ /Вт×мин).

Для оценки функционального состояния ВНС использовали вегетативный индекс Кердо (ИК), который рассчитывали по формуле:

$$ИК = (1 - P_{dia} / HR) \times 100,$$

где  $P_{dia}$  – диастолическое артериальное давление, HR – частота сердечных сокращений на момент измерения артериального давления.

Статистическую обработку проводили с использованием пакета программ STATISTICA 9.0.

Рассчитывали групповые средние значения и их стандартные ошибки. Для сравнения средних использовали t-критерий Стьюдента. Расчетные данные представлены в виде  $M \pm m$ .

**Результаты и обсуждение.** Типичная динамика показателей кардиореспираторной системы в условиях гипоксического теста у испытуемого К-ва представлена на рис. 1. Обращает внимание двухфазность реакций всех показателей, которая проявляется в смене направленности изменений показателей  $VO_2$ , RER,  $EqO_2$ ,  $SaO_2$  по мере снижения содержания  $O_2$  во вдыхаемом воздухе. Смена динамики происходит приблизительно на уровне 14–16 об.%. У разных испытуемых это происходит с разной скоростью, в связи с чем к 20-й мин гипоксии показатели у разных лиц демонстрируют по отношению к исходному уровню как положительный, так и отрицательный сдвиг. Вследствие этого межгрупповые различия динамики реакций не достоверны. Однако двухфазность ответа присутствует у всех испытуемых.

В табл. 1 и 2 приведены показатели внешнего дыхания, газообмена и HR в различных группах (физически не тренированных лиц, пловцов и лыжников) в состоянии покоя и на 20-й мин гипоксического воздействия, а также отклонения показателей от исходного значения в покое.

Как видно из табл. 1, в исходном состоянии пловцы не отличаются от контроля. У лыжников HR меньше, чем в контроле, а BF и VE – меньше, чем у пловцов. Эффективность дыхания у лыжников больше по сравнению с другими сравниваемыми группами.

Анализ табл. 1 и 2 показывает, что на 20-й мин гипоксического воздействия  $VO_2$  во всех группах не отличаются от исходного уровня, несмотря на снижение концентрации кислорода во вдыхаемом воздухе до 11 %. Эффективность дыхания ( $EqO_2$ ) как у нетренированных лиц, так и у спортсменов снижается. В группах контроля и лыжников возрастает глубина (VT), а у пловцов частота (BF) дыхания, что приводит к снижению  $PetCO_2$  во всех группах.

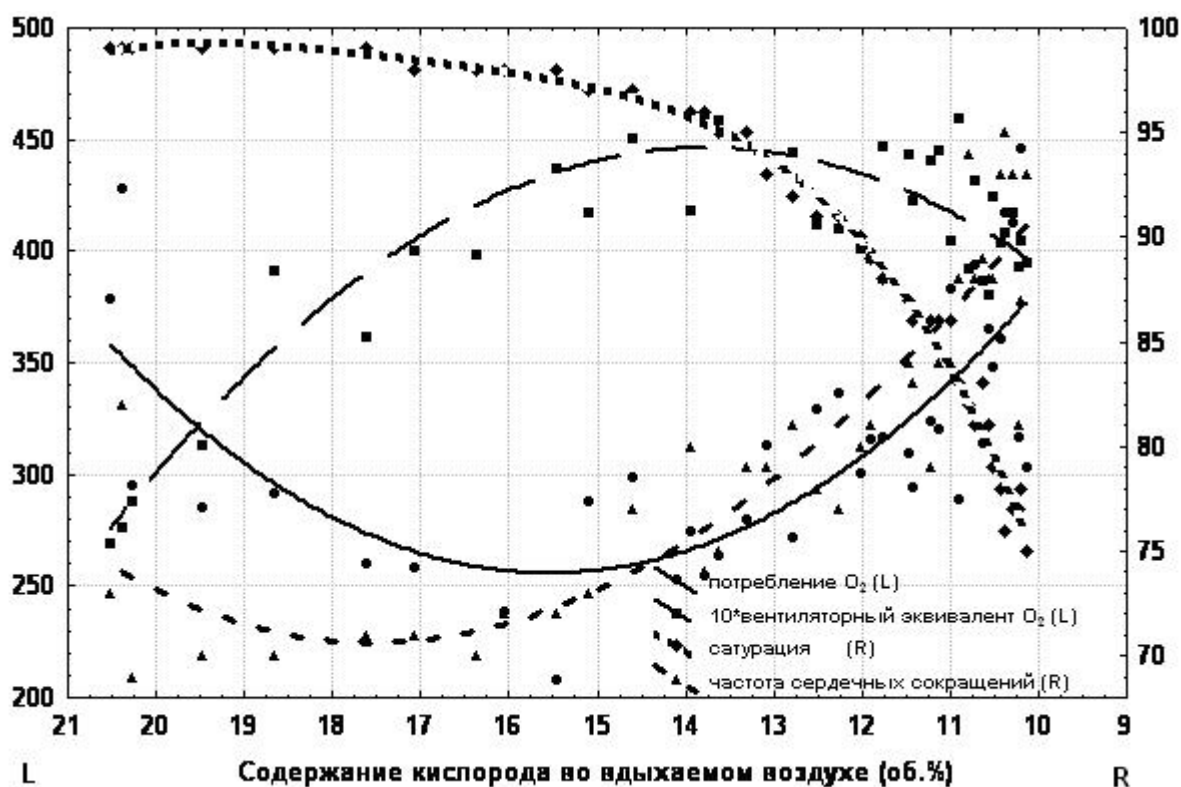


Рис. 1. Пример динамики потребления  $O_2$ , вентиляторного эквивалента  $O_2$ , сатурации гемоглобина и частоты сердечных сокращений в условиях гипоксического теста (L – левая шкала и R – правая шкала)

Таблица 1

Показатели внешнего дыхания, газообмена и функции сердца у физически не тренированных лиц (контроль), пловцов и лыжников в состоянии покоя ( $M \pm m$ )

| Показатель               | Контроль  | Пловцы    | Лыжники                |
|--------------------------|-----------|-----------|------------------------|
| BF, ед./мин              | 14,8±0,9  | 17,9±1,5  | 12,5±1,1 <sup>^</sup>  |
| VT, л                    | 0,80±0,06 | 0,74±0,05 | 0,85±0,06              |
| VE, л/мин                | 11,5±2,6  | 12,6±0,6  | 10,1±0,5 <sup>^^</sup> |
| $VO_2$ , л/мин           | 0,27±0,02 | 0,22±0,01 | 0,29±0,01              |
| $EqO_2$ , л/л            | 36,9±1,9  | 36,7±1,6  | 30,9±1,3 <sup>*^</sup> |
| $VCO_2$ , л/мин          | 0,25±0,02 | 0,27±0,02 | 0,25±0,01              |
| SaO <sub>2</sub> , %     | 98,3±0,4  | 98,2±0,2  | 98,0±0,3               |
| PetCO <sub>2</sub> , кПа | 5,42±0,13 | 4,99±0,11 | 5,14±0,08              |
| HR, уд./мин              | 77,4±2,4  | 73,3±3,9  | 65,8±2,4 <sup>**</sup> |

Примечание. \*, \*\* –  $p \leq 0,05$ ; 0,01 – уровень значимости отличий от контрольной группы; <sup>^</sup>, <sup>^^</sup> –  $p \leq 0,05$ ; 0,01 – уровень значимости различий между лыжниками и пловцами.

Более высокий  $P_{et}CO_2$  у лыжников (на 20-й мин гипоксии и по отклонению показателя от исходного) говорит о более низкой у них реактивности (чувствительности) дыхательного центра.

В табл. 3 приведены значения показателей внешнего дыхания, газообмена и сердечно-сосудистой системы у лиц контрольной группы, пловцов и лыжников для порога анаэробного обмена и их отклонения от исходного уровня (см. табл. 1). Здесь важно отметить, что все испытуемые достигали АТ при разных мощностях нагрузки. В среднем нетренированные лица достигают АТ при нагрузке мощностью  $92,5 \pm 8,0$  Вт, при этом прирост VE составляет 240 % (в основном за счет VT, который увеличивается на 140 %, BF возрастает на 42 %).

У пловцов АТ наступает при нагрузке мощностью  $119,0 \pm 16,2$  Вт, VE при этом увеличивается на 330 %, в большей степени за счет роста VT (169 %), чем BF (56 %).

АТ у лыжников достигается при мощности нагрузки  $187,5 \pm 18,0$  Вт. VE в этот момент на 580 % выше, чем в покое. VT увеличивается на 180 %, BF – на 120 %, т.е. прирост легочной вентиляции в группе лыжников обеспечивается приростом глубины и частоты дыхания почти в равной степени. Прирост потребления кислорода, выделения углекислого газа и частоты сердечных сокращений больше по сравнению с пловцами.

Для сравнения эффективности (экономичности) реакций кардиореспираторной системы мы произвели расчет кислородной стоимости работы до уровня АТ для каждой группы. Расчет КСР (табл. 3) показывает более экономичное выполнение работы лыжниками по уровню кислородного обмена. Это объясняет тот факт, что уровень АТ достигается у лыжников при значительно большей мощности и длительности мышечной нагрузки.

Таким образом, в исходном состоянии по исследуемым показателям пловцы не отличаются от контрольной группы физически не тренированных лиц, но отличаются от лыжников по BF, VE,  $E_{qO_2}$  и HR (табл. 1). Лыжники имеют меньшую величину HR относительно нетренированных лиц при повышен-

ной эффективности дыхания ( $E_{qO_2}$ ). Сравнение лыжников и пловцов показало, что у лыжников ниже VE при более высокой эффективности дыхания.

В целом, меньшее напряжение функций в покое у лыжников свидетельствует о большей эффективности работы органов кардиореспираторной системы. Известно, что уменьшение частоты сердечных сокращений у спортсменов обычно сочетается со структурными изменениями миокарда: его гипертрофией и формированием «спортивного сердца» [11]. Доставка кислорода кровью улучшается при усилении эритропоэза и росте тканевых резервов утилизации кислорода в скелетных мышцах: повышение васкуляризации, мощный митохондриальный аппарат, увеличение запасов миоглобина и креатинфосфата, что облегчает использование  $O_2$  из крови при больших уровнях гипоксемии [8, 25, 30]. Возрастает эффективность внешнего дыхания, о чем говорит сниженный вентиляторный эквивалент  $O_2$ , отражающий, по мнению В. Saltin [27], более благоприятные условия для связывания кислорода гемоглобином и улучшение вентиляторно-перфузионных соотношений в легких. По-видимому, условия тренировки, характерные для лыжного спорта, приводят к таким адаптациям системы дыхания, которые обеспечивают формирование необходимых резервов для увеличения газообмена при выполнении физической работы.

Тестирование нарастающей по силе нормобарической гипоксией показало, что у всех обследованных лиц на 20-й мин воздействия потребление кислорода достоверно не отличается от уровня, соответствующего нормоксии. Эффективность дыхания на 20-й мин гипоксии ниже, чем в фоне, а ее изменения в ответ на гипоксическое воздействие одинаковы во всех группах (табл. 2).

Вентиляторная реакция наиболее выражена в группе пловцов (табл. 2) за счет роста BF. На 20-й мин гипоксического воздействия этот показатель у пловцов выше по сравнению с нетренированными лицами и лыжниками, у которых возрастает только VT. Известно, что недостаток кислорода при гипоксии может компенсироваться преимущест-

венно увеличением как легочной (BF, VT), так и альвеолярной (VT) вентиляции через механизм изменения реактивности дыхательного центра [9, 10]. Вероятно, регулярные занятия плаванием с дозированным дыханием [20] повышают реактивность вентиляторного ответа на гипоксию, в основе которого, по видимому, лежит изменение чувствительности нервных центров дыхания на дефицит кислорода. За счет этого насыщение гемоглобина крови кислородом поддерживается на высоком уровне. У лыжников, несмотря на то, что эффективность внешнего дыхания ( $EqO_2$ ) высокая как в исходном состоянии, так и в конце гипоксии, а реактивность ответных реакций кардиореспираторной системы на гипоксию снижена (высокие величины  $PetCO_2$ ), в условиях гипоксического теста сатурация гемоглобина крови кислородом падает наиболее сильно (табл. 2). Это указывает на более высокую тканевую эффективность потребления кислорода при сниженном его уровне в крови.

Обнаруженные в состоянии покоя функциональные особенности газообмена и кардиореспираторной системы у пловцов и лыжников, вероятно, обусловлены механизмами эндофенотипической адаптации под влиянием регулярных физических тренировок специфического характера. Наиболее отчетливо они проявляются во время физической нагрузки (табл. 3).

Способность кислородтранспортной системы удовлетворять повышенный кислородный запрос дает возможность справиться с большей физической нагрузкой на уровне АТ и увеличивать  $VO_{2max}$  [15, 26]. Это подтверждается и нами, когда у лыжников порог анаэробного обмена достигается при работе большей мощности.

Показатель аэробно-анаэробных соотношений, который рассчитывается как процентная доля потребления кислорода при АТ от  $VO_{2max}$ , у лыжников наибольший и составляет  $72,7 \pm 5,4$  %, у пловцов –  $54,1 \pm 6,1$  %, у нетренированных лиц –  $45,4 \pm 3,1$  %. Полученные результаты отражают аэробные условия тренировок лыжников и, вероятно, особенности

возникающих при этом функциональных адаптивных изменений. Так, у лыжников АТ и HR выше в сравнении с нетренированными лицами. Функциональные резервы сердца (судя по приросту HR) у лыжников составляют 111 %, у пловцов – 80 %, для контроля – только 51 %. Это говорит о более высоких функциональных возможностях сердца у спортсменов. У лыжников  $PetCO_2$  при АТ больше по сравнению с пловцами (табл. 3), что, согласно эффекту Вериге-Бора [2], говорит о большей отдаче кислорода гемоглобином в работающих мышцах.

Таким образом, в покое лыжники имеют повышенную эффективность дыхания по кислороду и пониженную частоту сердечных сокращений. В условиях гипоксии они не столько увеличивают легочную вентиляцию (низкая реактивность), сколько углубляют дыхание. Лыжники допускают большое снижение насыщения гемоглобина крови кислородом. Пловцы, наоборот, не изменяя эффективность дыхания и частоту сердечных сокращений в покое (по сравнению с контролем), показывают активную вентиляторную реакцию (высокая реактивность) в ответ на гипоксию и поддерживают сатурацию на более высоком уровне. При физической нагрузке лыжники развивают большую аэробную мощность по сравнению с пловцами за счет большей отдачи кислорода гемоглобином.

Корреляционно-регрессионный анализ не выявил сопряжения между КСР, показателями внешнего дыхания, газообмена и частотой сердечных сокращений на 20-й мин гипоксического воздействия отдельно в группе контроля и группе пловцов. Для группы лыжников найдена корреляция между КСР и VT,  $VO_2$ ,  $VCO_2$ , HR при гипоксии (табл. 4). КСР является характеристикой экономичности (эффективности) мышечной работы, поэтому выявленные корреляции указывают на то, что адаптации в лыжном спорте идут по пути повышения экономичности мышечной работы. Это свойство также проявляется в гипоксическом тесте.

Таблица 2

**Показатели внешнего дыхания, газообмена и функции сердца  
у физически не тренированных лиц (контроль), пловцов и лыжников  
на 20-й мин гипоксического воздействия, отклонения показателей от исходного значения в покое (M ± m)**

| Показатель               | 20-я мин гипоксии |           |              | Отклонения от исходного уровня |                       |                          |
|--------------------------|-------------------|-----------|--------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|
|                          | Контроль          | Пловцы    | Лыжники      | Контроль                       | Пловцы                | Лыжники                  |
| BF, ед./мин              | 14,2±1,1          | 20,6±3,0* | 11,7±1,5^    | -0,65±0,42                     | 2,67±0,73 [ ]**       | -0,84±0,65^^             |
| VT, л                    | 0,97±0,13         | 0,79±0,06 | 1,05±0,08^   | 0,17±0,08 [ ]                  | 0,04±0,04             | 0,20±0,06 [ ]^           |
| VE, л/мин                | 12,7±1,2          | 15,1±1,4  | 11,1±0,8^    | 1,22±0,66                      | 2,46±0,22 [ ]         | 1,02±0,51                |
| VO <sub>2</sub> , л/мин  | 0,25±0,02         | 0,31±0,02 | 0,29±0,01    | -0,02±0,04                     | 0,01±0,07             | -0,01±0,03               |
| EqO <sub>2</sub> , л/л   | 45,4±2,3          | 42,8±2,2  | 36,1±1,5***^ | 8,50±1,62 [ ] [ ] [ ]          | 6,11±2,05 [ ]         | 5,20±1,00 [ ] [ ] [ ]    |
| VCO <sub>2</sub> , л/мин | 0,28±0,03         | 0,31±0,02 | 0,30±0,02    | 0,03±0,05                      | 0,05±0,05 [ ]         | 0,05±0,04 [ ] [ ] [ ]    |
| SaO <sub>2</sub> , %     | 78,8±1,9          | 81,6±0,6  | 76,7±1,1^^^  | -19,5±1,6 [ ] [ ] [ ]          | -16,6±0,5 [ ] [ ] [ ] | -21,3±1,0 [ ] [ ] [ ]^^^ |
| PetCO <sub>2</sub> , кПа | 4,67±0,13         | 4,57±0,08 | 4,88±0,08^   | -0,40±0,08 [ ] [ ] [ ]         | -0,43±0,09 [ ] [ ]    | -0,27±0,08 [ ]           |
| HR, уд./мин              | 96,7±2,0          | 90,9±3,4  | 81,0±3,1***^ | 19,2±1,8 [ ] [ ] [ ]           | 17,6±1,3 [ ] [ ] [ ]  | 15,2±2,3 [ ] [ ] [ ]     |

**Примечание.** \*, \*\*, \*\*\* – p ≤ 0,05; 0,01; 0,001 – уровень значимости отличий от контрольной группы; ^, ^^, ^^ – p ≤ 0,05; 0,01; 0,001 – уровень значимости различий между лыжниками и пловцами; [ ], [ ] [ ], [ ] [ ] [ ] – p ≤ 0,05; 0,01; 0,001 – уровень значимости отличий прироста от нулевого значения.

Таблица 3

**Показатели внешнего дыхания, газообмена и функции сердца  
у лиц контрольной группы, пловцов и лыжников для порога анаэробного обмена и их отклонения от исходного уровня**

| Показатель                        | Физическая нагрузка на уровне АТ |           |               | Отклонения от исходного уровня |                   |                      |
|-----------------------------------|----------------------------------|-----------|---------------|--------------------------------|-------------------|----------------------|
|                                   | Контроль                         | Пловцы    | Лыжники       | Контроль                       | Пловцы            | Лыжники              |
| ВФ, ед./мин                       | 20,9±1,3                         | 27,1±2,1* | 28,5±2,5*     | 6,2±1,1 [ [ [ [                | 10,0±2,5 [ [      | 14,8±2,6 [ [ [ **    |
| VT, л                             | 1,95±0,16                        | 1,93±0,13 | 2,48±0,12*^^  | 1,13±0,15 [ [ [ [              | 1,25±0,13 [ [ [ [ | 1,57±0,14 [ [ [ [*   |
| VE, л/мин                         | 39,4±2,9                         | 52,4±5,5* | 70,2±7,4***   | 27,7±2,8 [ [ [ [               | 41,1±5,9 [ [ [ [* | 58,9±7,6 [ [ [ ***   |
| VO <sub>2</sub> , л/мин           | 1,47±0,10                        | 1,82±0,22 | 2,64±0,24***^ | 1,13±0,10 [ [ [ [              | 1,51±0,22 [ [ [ [ | 2,31±0,25 [ [ [ ***^ |
| EqO <sub>2</sub> , л/л            | 25,7±0,7                         | 27,1±0,4  | 25,2±0,7^     | -11,2±0,9 [ [ [ [              | -12,9±1,0 [ [ [ [ | -4,9±1,8 [ [ [ ***^  |
| VCO <sub>2</sub> , л/мин          | 1,51±0,11                        | 1,90±0,21 | 2,75±0,24***^ | 1,20±0,11 [ [ [ [              | 1,63±0,23 [ [ [ [ | 2,45±0,25 [ [ [ ***^ |
| PetCO <sub>2</sub> , кПа          | 5,8±0,2                          | 5,6±0,1   | 6,2±0,1^^     | 1,1±1,2 [ [ [ [                | 1,1±0,2 [ [ [ [   | 1,4±0,2 [ [ [ [      |
| HR, уд./мин                       | 126,2±5,4                        | 139,6±7,6 | 153,3±5,0**   | 44,7±5,2 [ [ [ [               | 62,0±8,0 [ [ [ [  | 85,1±6,1 [ [ [ ***^  |
| КСР,<br>мл O <sub>2</sub> /ВТ×мин | 18,1±0,75                        | 17,3±1,49 | 14,1±0,32***^ | –                              | –                 | –                    |

**Примечание:** \*, \*\* – p ≤ 0,05; 0,01 – уровень значимости отличий от контрольной группы; ^, ^^ – p ≤ 0,05; 0,01 – уровень значимости различий между лыжниками и пловцами; [ [ , [ [ [ [ – p ≤ 0,01; 0,001 – уровень значимости отличий прироста от нулевого значения.



Таблица 4

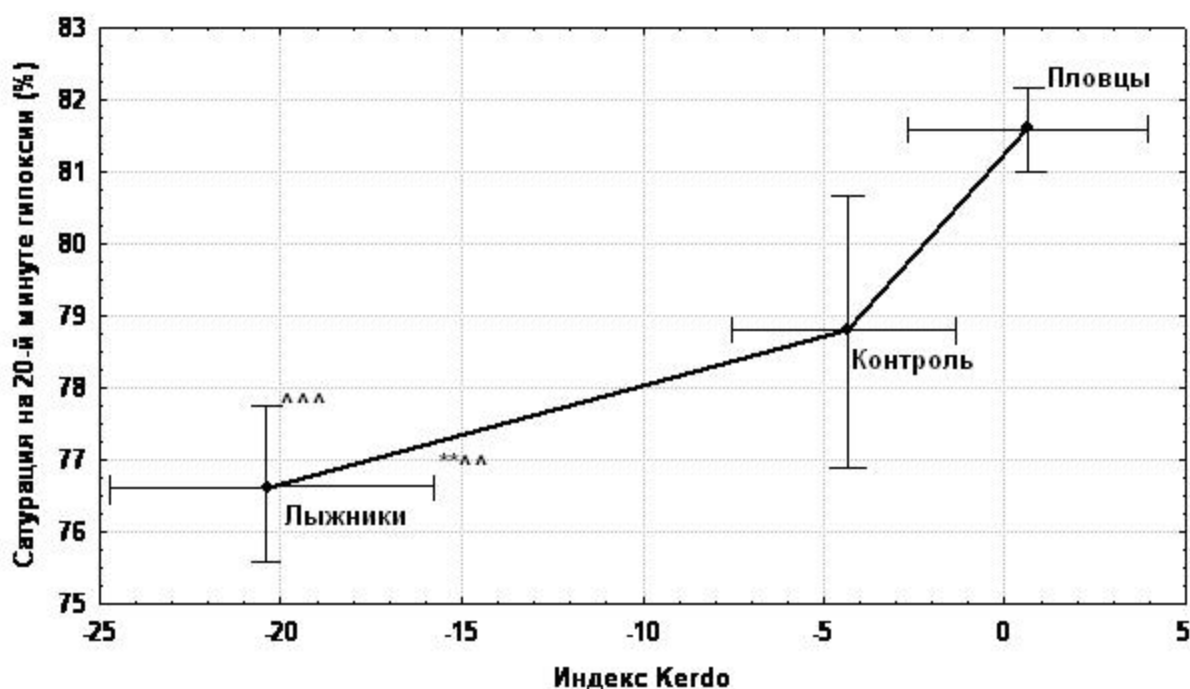
**Коэффициенты корреляций (r) внутри группы лыжников  
между показателями внешнего дыхания, газообмена, функции сердца  
на 20-й мин гипоксии и КСР**

| Показатели<br>на 20-й мин гипоксии | Кислородная стоимость работы |
|------------------------------------|------------------------------|
| BF, ед./мин                        | –                            |
| VT, л                              | -0,6393                      |
| VE, л/мин                          | –                            |
| VO <sub>2</sub> , л/мин            | -0,5378                      |
| EqO <sub>2</sub> , л/л             | –                            |
| VCO <sub>2</sub> , л/мин           | -0,5447                      |
| SaO <sub>2</sub> , %               | –                            |
| PetCO <sub>2</sub> , кПа           | –                            |
| HR, уд./мин                        | 0,7045                       |

Межгрупповой анализ функционального состояния ВНС в условиях фона показал, что в контрольной группе, судя по индексу Кердо (ИК), несколько повышена парасимпатическая активность ( $-4,33 \pm 2,98$ ). Среди пловцов есть лица с преобладанием как симпатического, так и парасимпатического влияния, но в среднем по группе  $ИК = 0,63 \pm 3,34$ , что говорит в пользу активирующего влияния ВНС на функции кардиореспираторной системы. У лыжников сильно выражены парасимпатические влияния:  $ИК = -20,36 \pm 4,58$ , что достоверно меньше, чем в контроле и у пловцов ( $p < 0,01$ ). Это может быть одной из причин менее выраженного ответа внешнего дыхания и сердца на гипоксию (табл. 2) и большего падения SaO<sub>2</sub>. В результате насыщение гемоглобина крови кислородом снижается сильнее. Вероятно, характер лыжных тренировок формирует рост парасимпатической активности и, как следствие, снижение реактивности кардиореспираторной системы при парал-

лельном повышении эффективности дыхания. Одной из причин такой перестройки является то, что мышечная работа на холоде (лыжники) оказывает специфическое влияние на регуляцию дыхания. Адаптивные изменения направлены, с одной стороны, на удовлетворение повышенной потребности в кислороде для выполнения мышечной работы, а с другой – на ограничение вентиляции для снижения теплотерь на холоде.

Таким образом, при пролонгированном гипоксическом воздействии пловцы поддерживают высокий уровень сатурации за счет повышенного симпатического тонуса и повышенной вентиляторной реакции. В отличие от этого лыжники, имеющие повышенный парасимпатический тонус, дают менее выраженную активацию вентиляторной функции в ответ на гипоксию, сопровождающуюся большим понижением SaO<sub>2</sub>. Эти результаты отражены на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость среднегрупповых значений насыщения гемоглобина крови кислородом на 20-й мин гипоксии от среднегрупповых значений индекса Кердо в покое (\*\* –  $p < 0,01$  – уровень значимости отличий от контрольной группы; ^^, ^^^ –  $p < 0,01$ ; 0,001 – уровень значимости различий между лыжниками и пловцами, соответственно осям координат)

#### Выводы:

1. Характер тренировочного процесса в видах спорта с аэробной направленностью и различающихся по структуре дыхательного акта (плавание и лыжные гонки), а также температурных условий среды влияет на реактивность и экономичность работы кардиореспираторной системы. Адаптивные изменения деятельности кардиореспираторной системы у лыжников идут по пути повышения экономичности, а у пловцов – по пути повышения реактивности кардиореспираторной системы на гипоксию. Эти отличия проявляются при физических и гипоксических нагрузках.

2. Занятия лыжным спортом приводят к доминированию парасимпатических влияний, вследствие чего реактивность внешнего дыхания и сердца на постепенно нарастающую гипоксию снижается. У лыжников больше понижается насыщение гемоглобина крови кислородом, которое, очевидно, компенсируется более эффективным тканевым метаболизмом.

3. У пловцов, при сравнении с лыжниками, вегетативный баланс смещен в сторону повышения симпатического тонуса, в результате чего поддерживается повышенная вен-

тиляторная реактивность на гипоксию. Это позволяет лучше поддерживать уровень насыщения гемоглобина крови кислородом при пролонгированном гипоксическом воздействии, что значимо в условиях плавательной деятельности.

4. Применение двух типов нагрузок (гипоксической и мышечной) позволяет раскрыть тонкие механизмы индивидуальных функциональных резервов организма, а также сопряжение ответных реакций на гипоксическое и мышечное воздействия, в основе которых лежат реактивность и экономичность работы кардиореспираторной системы.

1. Балыкин М. В., Пупырева Е. Д., Балыкин Ю. М. Влияние гипоксической тренировки на физическую работоспособность и функциональные резервы организма спортсменов // Вестник ТвГУ. Сер. «Биология и экология». 2011. № 2. С. 7–16.

2. Балыкин М. В., Каркобатов Х. Д. Системные и органые механизмы кислородного обеспечения организма в условиях высокогорья // Российский физиологический журн. им. И. М. Сеченова. 2012. № 1. С. 127–136.

3. Бочаров М. И. Реакция гемодинамики человека на разные по величине гипоксические воз-

действия // Ульяновский медико-биологический журнал. 2012. № 3. С. 138–145.

4. *Бобылева О. В., Глазачев О. С.* Динамика показателей вегетативной реактивности и устойчивости к острой дозированной гипоксии в курсе интервальной гипоксической тренировки // Физиология человека. 2007. Т. 33, № 2. С. 81–89.

5. *Горанчук В. В., Сапова Н. И., Иванов А. О.* Гипокситерапия. СПб., 2003. 536 с.

6. *Карлман В. Л., Белоцерковский З. Б., Гудков И. А.* Исследование физической работоспособности у спортсменов. М. : Физкультура и спорт, 1974. 95 с.

7. *Колчинская А. З.* Гипоксическая гипоксия, гипоксия нагрузки: повреждающий и конструктивный эффекты // *Nuroxia Med. J.* 1993. № 3. С. 8.

8. *Колчинская А. З.* Дыхание при гипоксии // Физиология дыхания. СПб. : Наука, 1994. 589 с.

9. *Кривошеков С. Г., Диверт Г. М., Диверт В. Э.* Индивидуальные особенности внешнего дыхания при прерывистой нормобарической гипоксии // Физиология человека. 2006. Т. 32, № 3. С. 62–69.

10. *Кривошеков С. Г., Диверт Г. М., Диверт В. Э.* Расширение функционального диапазона реакций дыхания и газообмена при повторных гипоксических воздействиях // Физиология человека. 2005. Т. 31, № 3. С. 100–107.

11. *Марушко Ю. В., Гищак Т. В., Козловский В. А.* Состояние сердечно-сосудистой системы у спортсменов (спортивное сердце) // Спортивная медицина. 2008. Т. 2. С. 21–42.

12. *Мищенко В. С., Лысенко Е. Н., Виноградов В. Е.* Реактивные свойства кардиореспираторной системы как отражение адаптации к напряженной физической тренировке в спорте. Киев : Науковий світ, 2007. 350 с.

13. *Нестеров С. В.* Особенности вегетативной регуляции сердечного ритма в условиях воздействия острой экспериментальной гипоксии // Физиология человека. 2007. Т. 31, № 1. С. 82–87.

14. *Серебровская Т. В.* Чувствительность к гиперкапническому и гипоксическому стимулам как отражение индивидуальной резистентности организма человека // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 1985. № 5. С. 65.

15. *Уилмор Дж. Х., Костил Д. Л.* Физиология спорта. Киев : Олимпийская литература, 2005. 504 с.

16. Физиология. Основы и функциональные системы : курс лекций / под ред. К. В. Судаква. М. : Медицина, 2000. 781 с.

17. *Цанаев В. Г., Бельская М. И.* Механизмы нервной регуляции транспорта и утилизации ки-

слорода при ишемической болезни сердца // Физиология человека. 1995. Т. 21, № 3. С. 101–105.

18. *Чижов А. Я., Блудов А. А.* Механизмы и основы резонансной нормобарической гипоксии // Проблемы гипоксии: молекулярные, физиологические и медицинские аспекты / под ред. Л. Д. Лукьяновой, И. Б. Ушакова. М. ; Воронеж : Истоки, 2004. 585 с.

19. Autonomic response to hypobaric hypoxia assessed by time-dependent frequency decomposition of heart rate / Y. Barak [et al.] // *Aviat. Space Environ. Med.* 2001. Vol. 72, № 11. P. 992–1000.

20. *Counsilman J. E.* Competitive swimming manual for coaches and swimmers. Bloomington, Indiana, Counsilman Co, 1977. 165 p.

21. Determination of the anaerobic threshold by gas exchange: biochemical considerations, methodology and physiological effects / K. Wasserman [et al.] // *Z Kardiol.* 1994. Vol. 83. Suppl. 3. P. 1–12.

22. Effects of high altitude acclimatization on heart rate variability in resting humans / R. Perini [et al.] // *Eur. J. Appl. Physiol.* 1996. Vol. 73, № 6. P. 521–528.

23. Effects of intermittent hypoxia on heart rate variability during rest and exercise / C. Povea [et al.] // *High Alt. Med. Biol.* 2005. Vol. 6, № 3. P. 215–225.

24. Effects of intermittent normobaric hypoxia training on heart rate variability / X. Xu [et al.] // *Space Med. Eng. (Beijing).* 2004. Vol. 17, № 5. P. 334–339.

25. Increased substrate oxidation and mitochondrial uncoupling in skeletal muscle of endurance-trained individuals / D. E. Befroy [et al.] // *PNAS.* 2008. Vol. 105, № 43. P. 16701–16706.

26. *Kubukeli Z. N., Noakes T. D., Dennis S. C.* Training techniques to improve endurance exercise performances // *Sports medicine.* 2002. Vol. 32, № 8. P. 489–509.

27. *Saltin, B.* Cardiovascular and pulmonary adaptation to physical activity // *Exercise, Fitness and Health* / R. J. Bouchard [et al.] (Eds.). Champaign IL : Human Kinetic Books, 1988. P. 187–203.

28. Synchronous and baroreceptor-sensitive oscillations in skin microcirculation: evidence for central autonomic control / L. Bernardi [et al.] // *Amber. J. Physiol.* 1997. V. 273. P. 1867–1878.

29. *Tsvetkova A. M., Tkatchouk E. N.* The methodological justification of the mode of the interval hypoxic training application // *Hyp. Med. J.* 1999. Vol. 7, № 1–2. P. 15–17.

30. *Zolanz J. A., Korzeniewsky B., Grassi B.* Training induced acceleration of oxygen uptake kinetics in skeletal muscle: the underlying mechanisms // *J. Physiol. Pharmacol.* 2006. Vol. 57. Suppl. 10. P. 67–84.

## REACTIVITY AND EFFECTIVITY OF THE CARDIORESPIRATORY SYSTEM TO HYPOXIA AND PHYSICAL EXERCISE SWIMMERS AND SKIERS

S.G. Krivoschekov<sup>1</sup>, S.N. Vodyanitsky<sup>1</sup>, V.E. Divert<sup>1</sup>, L.A. Girenko<sup>2</sup>

*<sup>1</sup>Research Institute of Physiology SB RAMS, Novosibirsk,*

*<sup>2</sup>Novosibirsk State Teachers Training University, Novosibirsk*

The paper compared the reactivity and effectivity of cardiorespiratory responses to prolonged increasing in power hypoxia and physical exercise at the anaerobic threshold of swimmers, skiers and physically untrained individuals. The features of the structure of cardiorespiratory responses to exercise and hypoxia were established. Found differences in the function state of the autonomic nervous system of swimmers and skiers, which influence to mechanisms of formation of cardiorespiratory responses to hypoxia and physical exercises. Found that result of adaptive changes of the cardio-respiratory system in skiers is economy the functioning of oxygen supply, but swimmers – to increasing the reactivity of responses. These differences are manifested during exercise and during hypoxia.

**Keywords:** hypoxia, anaerobic threshold, cardiorespiratory system, autonomic nervous system.