

ФИЗИОЛОГИЯ

УДК 612.273; 612.217

DOI 10.23648/UMBJ.2017.26.6226

ПРОЯВЛЕНИЕ ГИПОМЕТАБОЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В РЕАКЦИЯХ СИСТЕМЫ ДЫХАНИЯ У СПОРТСМЕНОВ НА ФИЗИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ ПРИ АДАПТАЦИИ В СРЕДНЕГОРЬЕ

В.И. Портниченко¹, В.Н. Ильин^{1,2}, М.М. Филиппов^{1,2}¹Международный центр астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины,
г. Киев, Украина;²Национальный университет физического воспитания и спорта Украины, г. Киев, Украина

e-mail: filmish@ukr.net

Вопросы подготовки в горах спортсменов, у которых аэробная работоспособность не является ведущей, до сих пор остаются противоречивыми и не до конца изученными. Однако спортивные специалисты проводят тренировочные сборы в условиях среднегорья, предполагая получить положительный эффект в расширении функциональных возможностей спортсменов. В связи с этим комплекс физиологических механизмов, задействованных при физических нагрузках у таких спортсменов в процессе адаптации к среднегорью, продолжает интересовать спортивных физиологов.

Цель. Изучить особенности функционирования системы дыхания и энергетического метаболизма у спортсменов при физической нагрузке в процессе адаптации к среднегорью.

Материалы и методы. Обследовали 12 спортсменов-борцов в начале (2-е сут) и в конце тренировочного сбора (21-е сут) в Приэльбрусье (2100 м над ур. м.). Определяли газовый состав выдыхаемого и альвеолярного воздуха, легочную вентиляцию и ее компоненты в процессе работы ступенчато-возрастающей мощности (от 50 до 250 Вт в течение 5 мин) на велоэргометре и в период восстановления (10 мин). Рассчитывали вклад аэробных и анаэробных компонентов в энергообмен при работе. Статистическую обработку результатов проводили с использованием программного пакета SPSS 21.0 (IBM) и Microsoft Excel 2010.

Результаты. Характер изменений потребления кислорода при работе и восстановлении в начале и в конце тренировочного сбора был похожим, но при повторном обследовании скорость переходных процессов возросла, кислородная стоимость работы снизилась, что явилось проявлением гипометаболической перестройки энергообмена. Выявлено, что в начале работы резко снижалось $\dot{V}AO_2$ и увеличивалось $\dot{V}ACO_2$, что свидетельствует о повышении диффузионной способности легких. В результате активной адаптации при работе возрастала эффективность легочного газообмена – уменьшался вентиляционный эквивалент по O_2 . Показано, что сочетанное воздействие гипобарической гипоксии и гипоксии нагрузки расширяет функциональные возможности организма, а тренировочный эффект достигается за счет ремоделирования энергетических ресурсов.

Ключевые слова: адаптация, физическая работа, гипометаболизм, аэробный и анаэробный обмен, внешнее дыхание, газообмен, спортсмены, среднегорье.

Введение. Известно, что проведение тренировочных сборов в горах используется в подготовке спортсменов как один из активирующих факторов повышения работоспособности [1], однако физиологические механиз-

мы влияния горного климата на организм спортсменов, у которых аэробная работоспособность не является ведущей, до сих пор остаются малоизученными [2–5]. Тем не менее тренеры по тем видам спорта, в которых ра-

ботоспособность не зависит от чисто аэробного метаболизма, также предпринимают попытки проведения тренировочных сборов в условиях среднегорья, желая получить положительный эффект в последующей спортивной результативности, зачастую основываясь на принципе «know how».

Цель исследования. Изучение особенностей функционирования системы дыхания у спортсменов и изменений энергетического метаболизма при работе аэробно-анаэробного характера на начальном и конечном этапах трехнедельного пребывания в горах.

Материалы и методы. В обследовании приняли участие 12 спортсменов (мастеров и кандидатов в мастера спорта), специализирующихся в вольной борьбе, которые в летний период в течение трех недель находились на учебно-тренировочном сборе в среднегорье (2100–2300 м над ур. м.).

Спортсмены обследовались на базе Эльбрусской медико-биологической станции Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины (Приэльбрусье, высота 2100 м над ур. м.) на 2-е и 21-е сут пребывания. Физическая работа ступенчато-возрастающей мощности (от 50 Вт на 1-й мин с повышением на 50 Вт каждую минуту в течение 5 мин, т.е. до 250 Вт) моделировалась с помощью велоэргометра. Соблюдалась следующая схема обследования: 5 мин – оценка исходного состояния, 5 мин – изменения во время работы, 5 мин – восстановление функций после работы. Непрерывно в течение всего периода обследования с помощью масс-спектрографа MX 6202 (Украина) определялась концентрация O_2 и CO_2 в выдыхаемом и альвеолярном воздухе, с помощью волюметра 45084 (Германия) – легочная вентиляция (V_E). Газообмен (потребление O_2 и выделение CO_2) рассчитывался с приведением полученных значений к стандартным условиям (STPD), легочная и альвеолярная вентиляция (V_A) – к условиям тела (BTPS). По значениям потребления O_2 (VO_2) и выделения CO_2 (VCO_2) оценивался вклад аэробных и анаэробных источников в энергообмен [3]. Также рассчитывался вентиляционный эквивалент (VE), характеризую-

щий величину легочной вентиляции, соответствующую потреблению одного литра O_2 .

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием программного пакета SPSS 21.0 (IBM) и пакета Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение. Анализ показателей функции внешнего дыхания при физической работе в начальный период пребывания в горах показал, что VO_2 при работе значительно увеличивалось в период вработывания, затем рост замедлялся. Аналогичный характер изменений наблюдался при повторном обследовании, однако скорость переходного процесса возросла, а VO_2 – уменьшилось. Последнее свидетельствует о снижении кислородной стоимости работы, т.е. о проявлении гипометаболического эффекта энергообмена в результате активной адаптации в горах.

Общий характер изменения VO_2 и VCO_2 в динамике работы и восстановления был разным при первом и втором обследованиях (рис. 1). Так, после приезда в горы было зафиксировано отставание VCO_2 от VO_2 в процессе работы, затем – его превышение в период восстановления. Такая динамика газообмена характеризует смешанный аэробно-анаэробный характер метаболических процессов: постепенное истощение окислительных процессов при повышающейся нагрузке и явное накопление продуктов метаболизма, что проявилось в период восстановления.

В альвеолярном воздухе при начальном обследовании в течение первой минуты работы происходило резкое падение парциального давления кислорода (P_{AO_2}) со 101 до 72 мм рт. ст. и значительное повышение парциального давления углекислого газа (P_{ACO_2}) с 33 до 54 мм рт. ст. (рис. 2). В конце тренировочного сбора диапазон таких изменений был меньшим.

В процессе продолжения работы, особенно в период восстановления, P_{AO_2} постепенно возрастало до значений покоя, а P_{ACO_2} снижалось даже ниже исходных значений. Характер таких изменений в начале работы свидетельствует о резком повышении диффузионной способности легких как для O_2 , так и для CO_2 .

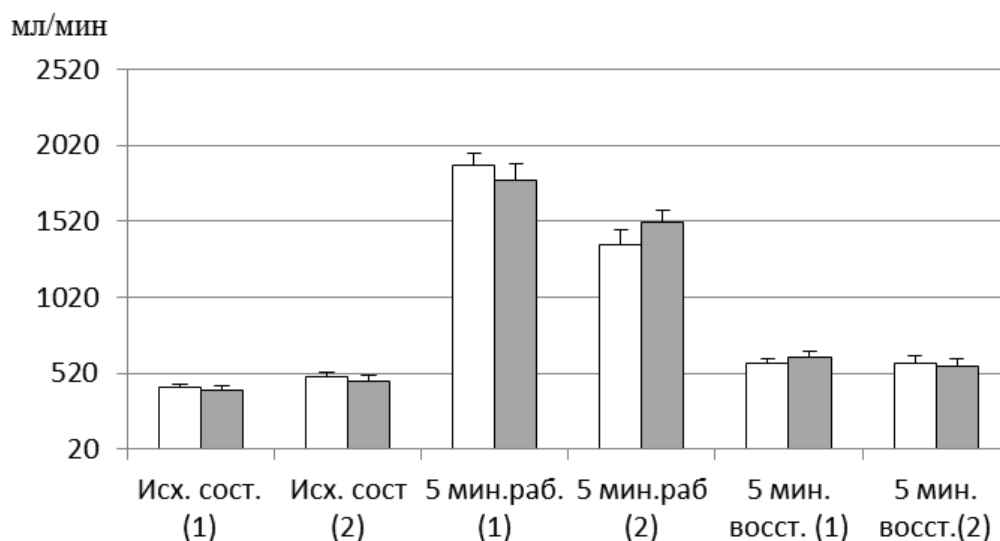


Рис. 1. Потребление O_2 (□) и выделение CO_2 (■) в начальный (1) и заключительный (2) периоды пребывания в горах

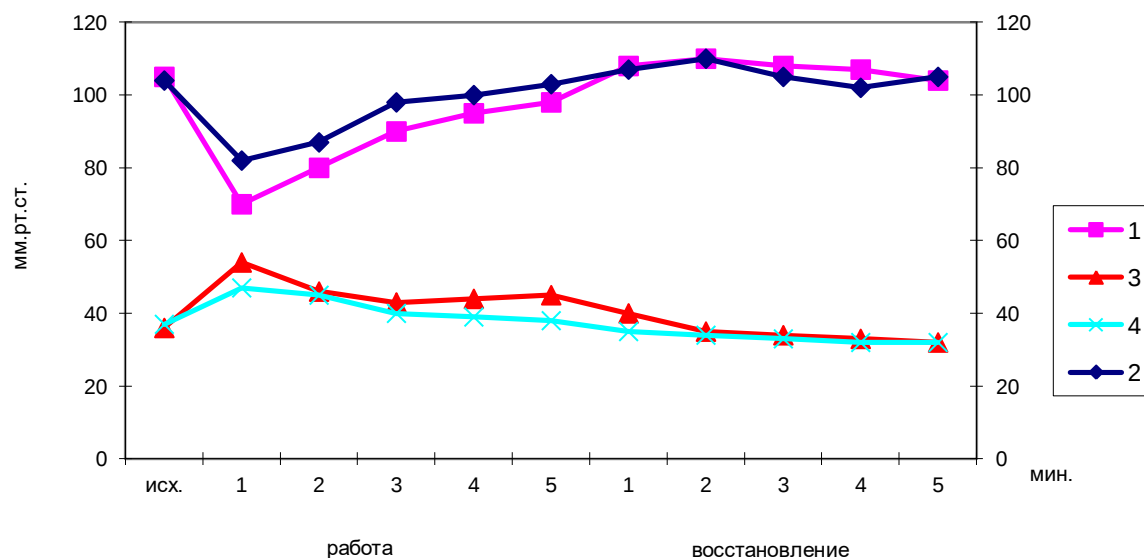


Рис. 2. Парциальное давление O_2 и CO_2 в альвеолярном воздухе во время работы и в период восстановления в разные сроки пребывания в горах:
1 – P_{AO_2} в начальный период; 2 – P_{AO_2} в заключительный период;
3 – P_{ACO_2} в начальный период; 4 – P_{ACO_2} в заключительный период

Подобный эффект наблюдается и на равнине, только степень его выраженности значительно меньше [6, 7].

В период вработывания, при первом обследовании, наблюдалось экспоненциальное возрастание V_E (рис. 3) наряду с параллельным ростом V_A .

После адаптации такой параллельности не было, что может объясняться уменьшени-

ем физиологического мертвого дыхательного пространства и свидетельствовать о повышении эффективности легочного газообмена. То есть трехнедельное пребывание спортсменов в среднегорье характеризовалось значительной оптимизацией функционирования системы внешнего дыхания. Об этом также свидетельствовало уменьшение вентиляционного эквивалента (рис. 4).

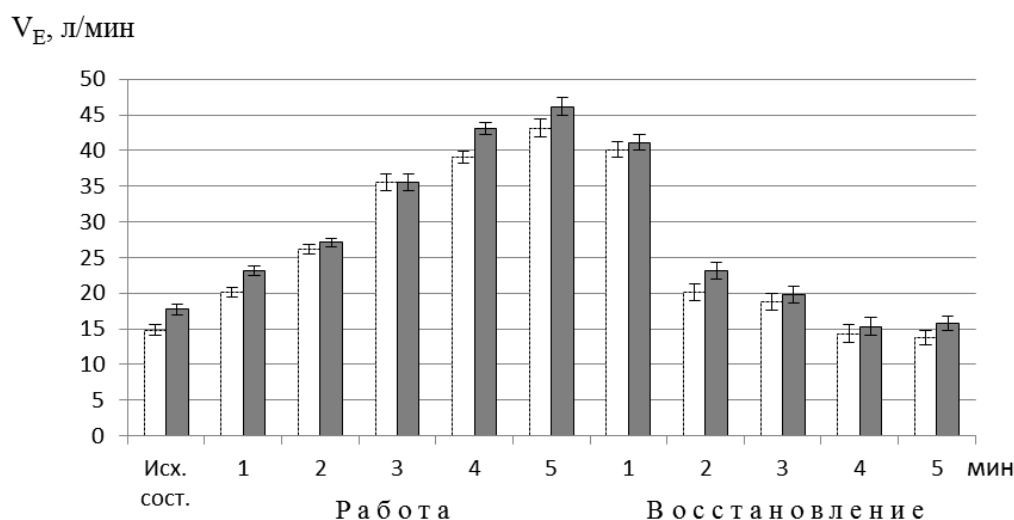


Рис. 3. Минутный объем дыхания в начальный (□) и заключительный (■) периоды пребывания в горах

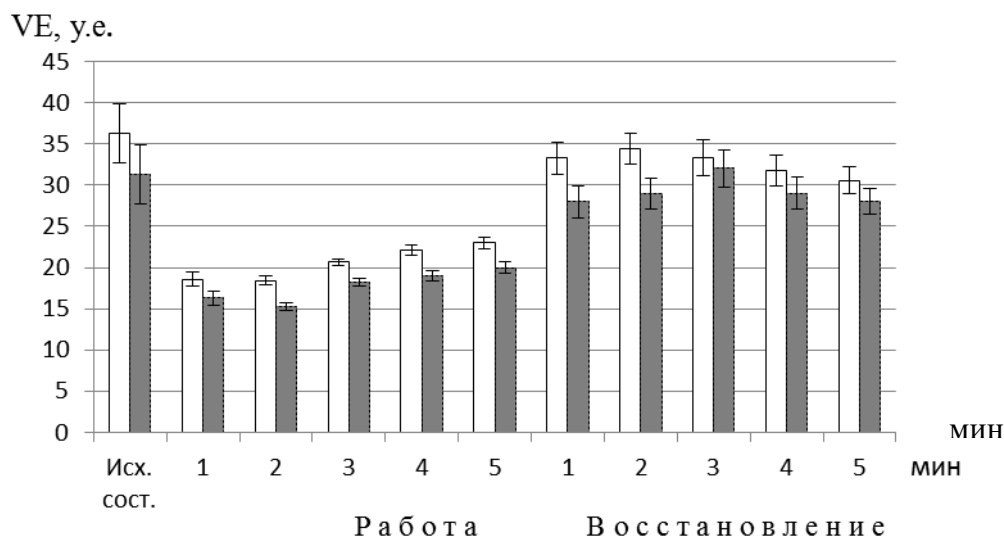


Рис. 4. Вентиляционный эквивалент в начальный (□) и заключительный (■) периоды пребывания в горах

Отношение V_A/V_E как при первом, так и при повторном обследовании в начале нагрузки резко возрастало и сохранялось таким до конца (рис. 5).

Выраженный прирост показателя в начале работы в горах приводит к резкому вымыванию CO_2 [8], при этом наклон графика зависимости V_E от VCO_2 в горах изменяется [2], происходит перестройка регуляции дыхания, в результате чего возрастает использование кислорода в легких [9]. То есть увеличение отношения V_A/V_E при работе в условиях гипоксической гипоксии необходимо не только для того, чтобы увеличить PO_2 , но и

для того, чтобы обеспечить поступление необходимого количества O_2 в альвеолы.

Также известно, что при пребывании в горах рефлекторно повышается тонус сосудов малого круга кровообращения [3, 9], поэтому при работе преодолением такого состояния может быть формирующийся венозный гиперкапнический стимул, приводящий к снижению тонуса сосудов легких и таким образом способствующий увеличению объемного кровотока, улучшению диффузии газов в легких и, следовательно, повышению скорости транспорта O_2 артериальной кровью.

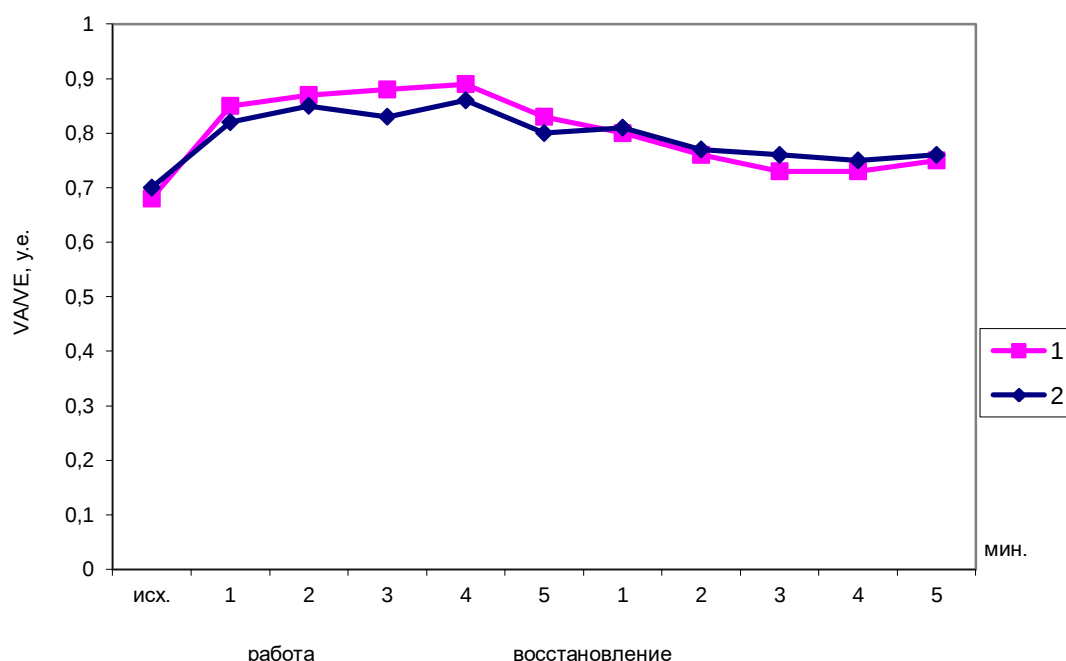


Рис. 5. Отношение V_A/V_E во время работы и в период восстановления в разные сроки пребывания в горах:
1 – начальный период (2-е сут); 2 – заключительный период (21-е сут)

Характерной особенностью изменений функционирования системы дыхания при повторном обследовании после работы является практически полное восстановление паттерна дыхания, о чем свидетельствовала нормализация концентраций O_2 и CO_2 в альвеолярном воздухе.

Более высокое по сравнению с покоем отношение V_A/V_E в период восстановления косвенно могло свидетельствовать о повышении тонуса бронхиол [3]. И хотя факт повышения V_A/V_E рассматривается физиологами и клиницистами как положительный фактор, характеризующий экономизацию функции внешнего дыхания, он при работе может свидетельствовать о предельном использовании резервных возможностей внешнего дыхания [3].

Возникающая при мышечной деятельности тканевая гипоксия является пусковым механизмом для включения целого каскада клеточного ремоделирования: появления новых видов митохондрий и белков [10], активации новых генов, компенсирующих недостаток O_2 повышением анаэробного обмена [11, 12]. В горных условиях развивающаяся в результате усиленного при работе расходо-

вания O_2 в мышцах первичная тканевая гипоксия (гипоксия нагрузки [9]) усугубляется ограничением возможностей кислородтранспортной системы организма в результате гипоксической гипоксии. Именно сочетание этих двух воздействий и оказывает тренирующий физиологический эффект – расширяет функциональные возможности организма в спортивной деятельности.

Таким образом, можно констатировать, что трехнедельная тренировка спортсменов в среднегорье привела к экономизации функции системы дыхания при мышечной деятельности, развитию гипометаболических реакций, расширению, кроме аэробного энергообмена, и анаэробных механизмов, что в целом обеспечило устойчивость к гипоксии и переносимость физических нагрузок.

Подтверждением такого заключения явились результаты проведенного нами анализа изменений метаболической структуры энергетического обмена у обследованных спортсменов при физической нагрузке. Так, если при первом обследовании начиная со 2-й мин работы отношение вклада аэробных и анаэробных компонентов в энергообмен было приблизительно одинаковым (50/50), то

при повторном оно на 5–7 % сместилось в сторону анаэробного обмена (рис. 6).

В литературе имеются сведения об увеличении кровоснабжения внутренних органов (сердца, печени, почек, эндокринных желез) в горных условиях на фоне его снижения в скелетных мышцах [12, 13]. Увеличение кровотока через работающие мышцы, сердце и диафрагму при мышечной деятельности в условиях гипоксии сопровождается более резким, чем при нормальном PO_2 во вдыхаемом воздухе, его снижением через органы желудочно-кишечного тракта, печень и почки [14]. Кажется бы, такое распределение является мощным компенсаторным механизмом, направленным на увеличение скорости доставки O_2 к работающим тканям, однако оно имеет и свои отрицательные стороны. В результате ограничения кровотока через печень и почки в значительной степени снижается

скорость утилизации образующейся в работающих мышцах молочной кислоты, увеличивается концентрация ионов водорода в крови, сдвигается кислотно-основное состояние в мышцах и крови, нарушаются условия для утилизации O_2 [9]. В горах в здоровом организме в покое наблюдается газовый алкалоз, вызванный усилением функции внешнего дыхания и развивающейся гипокапнией, при этом усиленно вымываются почками щелочи [3], уменьшается емкость бикарбонатного резерва. Это приводит к тому, что при мышечной деятельности ухудшается способность почек и печени утилизировать молочную кислоту. Так, известно, что на высоте 1700 м над ур. м. после нагрузки содержание лактата в крови оказывается значительно выше, чем на уровне моря [15]. Аналогичные результаты были получены и на больших высотах (2100 и 3500 м над ур. м.) [9].

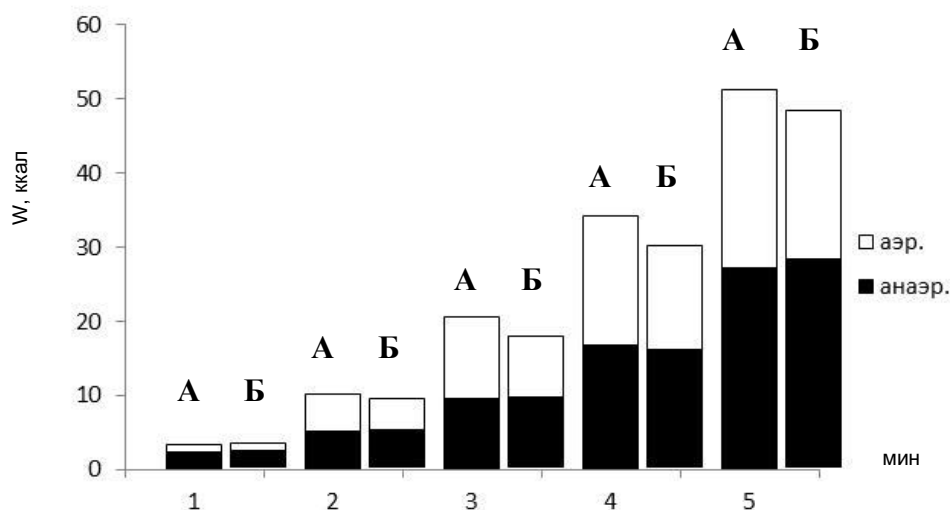


Рис. 6. Отношение аэробных и анаэробных компонентов в энергообмене при работе в начале (А) и в конце (Б) пребывания в горах

Заключение. В результате пребывания спортсменов-борцов на тренировочном сборе в среднегорье в организме при работе произошли следующие положительные функциональные изменения, характеризующие гипометаболический эффект: более экономной стала функция внешнего дыхания, сни-

зился относительный вклад в общую систему энергообеспечения организма аэробного компонента на фоне возрастания анаэробного, повысилась устойчивость как к гипоксической гипоксии, так и к гипоксии нагрузки, что важно для спортивной результативности.

Литература

1. Булатова М.М., Платонов В.Н. Спортсмен в различных климатогеографических условиях. Киев: Олимпийская литература; 1996. 177.
2. Ільїн В.М., Портніченко В.І., Черкес Л.І. Особливості змін зовнішнього дихання у висококваліфікованих спортсменів в умовах середньогір'я. Фізіологічний журнал НАН України. 2006; 52 (2): 201–202.
3. Robergs R.A., Roberts S.O. Fisiologia de Exercício. San Paulo: Phorte Editore; 2002. 490.
4. Loffredo B.M., Glazer J.L. The ergogenics of hypoxia training in athletes. Curr. Sports. Med. Rep. 2006; 5 (4): 203–209.
5. Wilber R.L. Application of altitude/hypoxic training by elite athletes. Med. Sci. Sports. Exerc. 2007; 39 (9): 1610–1624.
6. Мищенко В.С., Левин Р.Я., Ноур А.М. Лактатный порог и его использование для управления тренировочным процессом: метод. рекоменд. Киев: Абрис; 1997.
7. 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. 352.
8. Friedmann B., Frese F., Menold E., Bärtsch P. Effects of acute moderate hypoxia on anaerobic capacity in endurance-trained runners. Eur. J. Appl. Physiol. 2007; 101 (1): 67–73.
9. Филиппов М.М., Давиденко Д.Н. Физиологические механизмы развития и компенсации гипоксии в процессе адаптации к мышечной деятельности. СПб.; Киев: БЛА; 2010. 260.
10. Semenza G.L. Mitochondrial autophagy: life and breath of the cell. Autophagy. 2008; 4 (4): 534–536.
11. Mason S.D., Rundqvist H., Papandreou I. HIF-1alpha in endurance training: suppression of oxidative metabolism. Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol. 2007; 293 (5): 2059–2069.
12. Semenza G.L. Regulation of physiological responses to continuous and intermittent hypoxia by hypoxia-inducible factor 1. Exp. Physiol. 2006; 91 (5): 803–806.
13. Балыкин М.В., Каркобатов Х.Д. Системные и органные механизмы кислородного обеспечения организма в условиях высокогорья. Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2012; 98 (1): 127–136.
14. Балыкин М.В., Каркобатов Х.Д., Орлова Е.В. Газы крови и органный кровоток у собак при физических нагрузках в горах. Физиологический журнал СССР. 1993; 79 (11): 77–85.
15. Финогенов В.С., Козловская В.С., Любимова В.С. Особенности некоторых метаболических процессов и их взаимосвязь с мощностью работы, выполняемой в различные сроки приспособления гребцов к среднегорью. Медико-биологические проблемы физической культуры и спорта. 1978; 6: 107–118.

HYPOMETABOLIC EFFECT IN SPORTSMEN RESPIRATORY SYSTEM REACTIONS TO PHYSICAL LOAD ADAPTATION IN MIDDLE ALTITUDE

V.I. Portnichenko¹, V.N. Il'in^{1,2}, M.M. Filippov^{1,2}

¹International Center for Astronomical, Medical and Ecological Research,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine;

^{1,2}National University of Physical Education and Sport of Ukraine, Kiev, Ukraine

e-mail: filmish@ukr.net

The problem of altitude training for athletes without leading aerobic capacity remains controversial and badly studied. However, training camps are usually situated in mid-mountain areas. Thus, athletes are expected to get a positive effect in expanding their functional. In this context, sport physiologists are still interested in physiological mechanisms involved in physical activity during athletes' adaptation to physical loads at middle altitude.

Objective. The main purpose of the study is to examine the characteristics of respiratory system and energy metabolism in athletes under physical load during adaptation to staying in middle mountains.

Materials and Methods. Twelve wrestlers were examined at the beginning (2nd day) and at the end

(21st day) of staying in training camps in Elbrus region (2100 m a.s.l.) The authors registered gas exchange and pulmonary ventilation in athletes subjected to stepwise increasing workloads after 5 minute-work on the bicycle ergometer and during recovery period (10 min). The contribution of aerobic and anaerobic components in the energy metabolism under physical load was calculated. Statistical analysis was performed using software packages SPSS 21.0 (IBM) and Microsoft Excel 2010.

Results. The changes in oxygen consumption on exertion and during recovery periods at the beginning and at the end of staying at a training camp were similar. However, the repeated examination showed increased rate of transient processes, and decreased oxygen cost of work. These indices evidenced hypometabolic changes in energy metabolism. It was revealed that at the beginning of exercise lung diffusing capacity dramatically decreased. The efficiency of pulmonary gas exchange increased as a result of active adaptation. At the same time, O₂ ventilation equivalent decreased. The combined effect of hypobaric hypoxia and loading hypoxia proved to extend body functional, while training effects are achieved due to remodeling of energy resources.

Keywords: adaptation, physical load, hypometabolism, aerobic and anaerobic metabolism, external respiration, gas exchange, athletes, middle altitude.

References

1. Bulatova M.M., Platonov V.N. *Sportsmen v razlichnykh klimatogeograficheskikh usloviyakh* [Athlete under different climatographic condition]. Kiev: Olimpiyskaya literatura; 1996. 177 (in Russian).
2. Il'in V.M., Portnichenko V.I., Cherkes L.I. Osoblivosti zmin zovnishn'ogo dikhannya u visokokvalifikovanih sportsmeniv v umovakh seredn'ogir'ya [Characteristics of external breathing in professional athletes at middle altitude]. *Fiziologichnyi zhurnal NAN Ukraïni*. 2006; 52 (2): 201–202 (in Ukrainian).
3. Robergs R.A., Roberts S.O. *Fisiologia de Exercicio*. San Paulo: Phorte Editore; 2002. 490.
4. Loffredo B.M., Glazer J.L. The ergogenics of hypoxia training in athletes. *Curr. Sports. Med. Rep.* 2006; 5 (4): 203–209.
5. Wilber R.L. Application of altitude/hypoxic training by elite athletes. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 2007; 39 (9): 1610–1624.
6. Mishchenko V.S., Levin R.Ya., Nour A.M. *Laktatnyy porog i ego ispol'zovanie dlya upravleniya trenirovochnym protsessom: metod. rekomend* [Lactate threshold and its use for work-out session management]. Kiev: Abris; 1997 (in Russian).
7. Mishchenko V.S., Lysenko E.N., Vinogradov V.E. *Reaktivnye svoystva kardiorespiratornoy sistemy kak otrazhenie adaptatsii k napryazhennoy fizicheskoy trenirovke v sporte* [Cardiorespiratory system reactive properties as adaptation to heavy physical training in sports]. Kiev: Naukoviy svit; 2007. 352 (in Russian).
8. Friedmann B., Frese F., Menold E., Bärtzsch P. Effects of acute moderate hypoxia on anaerobic capacity in endurance-trained runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2007; 101 (1): 67–73.
9. Filippov M.M., Davidenko D.N. *Fiziologicheskie mekhanizmy razvitiya i kompensatsii gipoksii v protsesse adaptatsii k myshechnoy deyatel'nosti* [Physiological mechanisms of hypoxia development and compensation in the process to muscle activity adaptation]. St Petersburg; Kiev: BLA; 2010. 260 (in Russian).
10. Semenza G.L. Mitochondrial autophagy: life and breath of the cell. *Autophagy*. 2008; 4 (4): 534–536.
11. Mason S.D., Rundqvist H., Papandreou I. HIF-1α in endurance training: suppression of oxidative metabolism. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2007; 293 (5): 2059–2069.
12. Semenza G.L. Regulation of physiological responses to continuous and intermittent hypoxia by hypoxia-inducible factor 1. *Exp. Physiol.* 2006; 91 (5): 803–806.
13. Balykin M.V., Karkobato Kh.D. Sistemnye i organnye mekhanizmy kislorodnogo obespecheniya organizma v usloviyakh vysokogor'ya [Systemic and organ mechanisms of body oxygen supply in high altitude]. *Rossiyskiy fiziologicheskii zhurnal im. I.M. Sechenova*. 2012; 98 (1): 127–136 (in Russian).
14. Balykin M.V., Karkobato Kh.D., Orlova E.V. Gazy krovi i organnyy krovotok u sobak pri fizicheskikh nagruzkakh v gorakh [Blood gases and organ blood flow in dogs under physical load in high altitude]. *Fiziologicheskii zhurnal SSSR*. 1993; 79 (11): 77–85 (in Russian).
15. Finogenov V.S., Kozlovskaya V.S., Lyubimova V.S. Osobennosti nekotorykh metabolicheskikh protsessov i ikh vzaimosvyaz' s moshchnost'yu raboty, vypolnyaemoy v razlichnye sroki prispособleniya grebtsov k srednegor'yu [Characteristics of some metabolic processes and their interrelation with work intensity performed at various times of oarsmen adaptation to middle altitude]. *Mediko-biologicheskie problemy fizicheskoy kul'tury i sporta*. 1978; 6: 107–118 (in Russian).