

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКОМОТОРНО-РЕСПИРАТОРНОГО СОПРЯЖЕНИЯ В ФИЗИЧЕСКИХ УПРАЖНЕНИЯХ

В.Ф. Тихонов, letterpa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7320-718X>

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

Аннотация. Цель исследования: определение роли физических усилий человека в возникновении локомоторно-респираторного сопряжения (ЛРС) при выполнении циклических физических упражнений. **Материалы и методы.** В исследовании принимали участие 12 студентов в возрасте 19–20 лет. Испытуемые выполняли два упражнения: «приседание» и «прыжки на месте». Упражнения выполнялись на стационарной тензоплатформе. В качестве интегрального показателя усилий у испытуемых было принято значение вертикальной составляющей опоры ($F_{\text{верт}}(t), N$). Скорость потока дыхательного воздуха ($\bar{V}(t)$, л/с) у испытуемых измерялась с помощью установленного на шлеме датчика спирометра. Датчик подключался к универсальному устройству сбора данных, который помещался на спине испытуемого. Сигналы передавались на компьютер через Bluetooth. Методом аппроксимации сравнивались круговые частоты колебаний $\bar{V}(t)$ и $F_{\text{верт}}(t)$. **Результаты.** Применение метода аппроксимации было корректным у 8 испытуемых. Анализ графиков показал, что у этих испытуемых круговые частоты $\bar{V}(t)$ и $F_{\text{верт}}(t)$ совпадали и были примерно равны во время выполнения упражнений. **Заключение.** Основным фактором ЛРС при выполнении упражнений «приседание» и «прыжки на месте» являются циклические физические усилия человека. В тренировочной практике степень совпадения круговой частоты потока дыхательного воздуха и круговой частоты усилий спортсмена можно применять в качестве одного из критериев эффективности техники выполнения циклических физических упражнений.

Ключевые слова: физические упражнения, дыхание, локомоторно-респираторное сопряжение (ЛРС), поток дыхательного воздуха, тензоплатформа

Для цитирования: Тихонов В.Ф. Исследование локомоторно-респираторного сопряжения в физических упражнениях // Человек. Спорт. Медицина. 2022. Т. 22, № 3. С. 152–157. DOI: 10.14529/hsm220318

Original article
DOI: 10.14529/hsm220318

RESEARCH OF LOCOMOTOR-RESPIRATORY COUPLING IN PHYSICAL EXERCISE

V.F. Tikhonov, letterpa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7320-718X>

I.N. Ulianov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

Abstract. Aim: the paper aims to identify the role of physical efforts in locomotor-respiratory coupling (LRC) during cyclic exercise. **Materials and methods.** The study involved 12 university students aged 19–20 years. The students performed squat and jumping on the spot exercises. These exercises were performed on the force platform. Ground reaction forces in the vertical direction ($F_{\text{vert}}(t), N$) were taken as an integral indicator of efforts. Airflow rate ($\bar{V}(t)$, l/s) measurements were performed using a helmet-mounted spirometer. The spirometer was connected to a universal data acquisition device, which was placed on the back of the subject. The signals were transmitted to the computer via Bluetooth. The $\bar{V}(t)$ and $F_{\text{vert}}(t)$ vibration frequencies were compared by Curve Fit. **Results.** The data obtained with Curve Fit were correct in 8 subjects. The graphs demonstrate that for these subjects the models of $\bar{V}(t)$ and $F_{\text{vert}}(t)$ frequencies coincided and were approximately equal under exercise. **Conclusion.** Cyclic efforts are the main factor of LRC during

squat and jumping on the spot exercises. The frequency coincidence between airflow rate and effort data can be used as one of the criteria for an effective cyclic exercise.

Keywords: physical exercise, breathing, locomotor-respiratory coupling, LRC, airflow rate, force platform

For citation: Tikhonov V.F. Research of locomotor-respiratory coupling in physical exercise. *Human. Sport. Medicine.* 2022;22(3):152–157. (In Russ.) DOI: 10.14529/hsm220318

Введение. Спортивные соревновательные физические упражнения и общеразвивающие упражнения, выполняемые в подготовительной части занятия, повышают функции всех систем организма, в том числе и дыхательной. В свою очередь, система дыхания также воздействует и на систему управления движениями. В связи с этим возникает проблема взаимосвязи дыхания с двигательными действиями с целью повышения эффективности и экономичности физических упражнений [1, 2, 7, 12]. Повышение эффективности двигательных действий спортсмена пытаются достичь различными методами. Предлагаемые методы связаны с применением специальных дыхательных упражнений [3], дыхание гиперкапническими и гипоксическими газовыми смесями [5, 7], дыхание с добавочным сопротивлением [1] и др. Обобщенно эти методы применяются с целью повышения показателей функции внешнего дыхания, повышения работоспособности респираторной мускулатуры, повышения устойчивости организма к гипоксии, оптимизации тканевого дыхания и транспорта газов в организме у спортсмена при мышечной деятельности [1]. Все указанные методы тренировки дыхания не связаны непосредственно с конкретными физическими упражнениями. Физические упражнения здесь служат только для повышения степени активности дыхательной системы в целом.

Однако во многих исследованиях приводятся примеры локомоторно-респираторного сопряжения (влияния ритмики движений на ритмику дыхания) [2, 7, 8, 10, 11]. Это явление имеет несколько названий: «захват», «вовлечение», «взаимосвязь», «сопряжение», «entrainment», «locomotor-respiratory coupling (LRC)» и др. Но, несмотря на убедительные доказательства его существования, механизмы, лежащие в основе и последствия локомоторно-респираторного сопряжения (или не сопряжения) (ЛРС), все еще недостаточно изучены [6, 9]. В одном из наиболее полных обзоров данной проблемы отмечается, что «с биомеханической точки зрения для объяснения LRC

были выдвинуты три возможные гипотезы: (1) движение внутренних органов с локомоцией физически влияет на движение диафрагмы (то есть теория «висцерального поршня»), (2) давление и / или изменения объема в грудной полости в результате сотрясения, связанного с контактом с землей, и (3) изменения давления и / или объема в грудной полости в результате пояснично-крестцового сгибания и разгибания» [9, с. 109]. В нашем исследовании будет сделана попытка принять или опровергнуть гипотезу (2). В ряде источников [4, 6] приводятся данные, подтверждающие предположение, что двигательная система реагирует и избирает ту частоту движений, которая совпадает с резонансной частотой отдельных кинематических звеньев. «Теоретически колебания при резонансе мышечно-сухожильной структуры дают максимальную амплитуду движения при наименьших усилиях и энергетических затратах» [4]. Таким образом, для повышения эффективности и экономичности в физических упражнениях нужно спортсмену обрести ту двигательную систему, при которой дыхательные движения придут в состояние, близкое к резонансному с результирующей волной усилий, проходящей по кинематическим звеньям двигательного аппарата.

Материалы и методы. В исследовании принимали участие 12 студентов в возрасте 19–20 лет. Испытуемые выполняли два упражнения: «приседание» (не более 15–20 повторений) и «прыжки на месте» (не более 30 секунд). Для исключения влияния фактора утомления испытуемые выполняли упражнения в предпочтительном для себя темпе. Упражнения выполнялись на стационарной тензоплатформе. В качестве интегрального показателя усилий испытуемых было принято значение вертикальной составляющей опоры ($F_{\text{верт}}(t)$, N). В физиологии общий объем воздуха, вдыхаемого в легкие и выдыхаемого из легких за 1 минуту, называется минутной вентиляцией (МОД, V_E , л/мин) и представляет собой произведение среднего объема каждого вдоха (дыхательный объем ДО, V_T , л) и часто-

ты дыхания (ЧД, f_b , 1/мин). В отечественных и зарубежных исследованиях эти показатели принимаются за основу при определении ЛРС. Однако, на наш взгляд, наиболее информативным показателем является скорость потока дыхательного воздуха ($\bar{V}(t)$, л/с), так как он более чувствителен к динамическому характеру двигательных действий. $\bar{V}(t)$ у испытуемых измерялась с помощью установленного на шлеме датчика спирометра. Датчик подключался к универсальному устройству сбора данных, который помещался на спине испытуемого. Сигналы передавались на компьютер через Bluetooth. Для сбора и анализа данных использовалось программное обеспечение Logger Pro® 3. С помощью этой программы методом аппроксимации по общему уравнению: $A \cdot \sin(Bx + C) + D$ сравнивались круговые частоты (В) колебаний $\bar{V}(t)$ и $F_{\text{верт}}(t)$. На рис. 1 и 2 графики $\bar{V}(t)$ имеют название «Поток», а $F_{\text{верт}}(t)$ – «Усилие». Значения $\bar{V}(t)$ на выдохе идут вверх, а на вдохе – вниз.

Результаты. Необходимо отметить, что у 4 испытуемых связь колебаний $\bar{V}(t)$ и $F_{\text{верт}}(t)$ обнаружить не удалось. Применение метода аппроксимации было корректным у 8 испытуемых. Анализ графиков в упражнении «присе-

дание» (см. рис. 1) и в упражнении «прыжки на месте» (см. рис. 2) показал, что у этих испытуемых круговые частоты колебаний $\bar{V}(t)$ и $F_{\text{верт}}(t)$ совпадали и были примерно равны во время выполнения упражнений. На рис. 1 и 2 в прямоугольных полях на графиках помещены названия графиков, общая формула аппроксимации графиков $A \cdot \sin(Bx + C) + D$, значения вычисленных коэффициентов А, В, С и D, Correlation – степень корреляции синусоиды с реальным графиком и RMSE – среднеквадратичное отклонение.

Коэффициенты в общей формуле означают аппроксимированные (приближенные) значения показателей $\bar{V}(t)$ и $F_{\text{верт}}(t)$: А – амплитуда колебания значений (л/с или N); В – круговая частота; С – начальная фаза колебаний; D – положение («высота») графика относительно оси абсцисс (л/с или N). Следует отметить, что коэффициент А для скорости потока дыхательного воздуха и вертикальной составляющей реакции опоры нельзя сравнивать, так как они означают разные физические величины. Поэтому здесь сравниваются только коэффициенты В, имеющие общую частотную размерность – радиан в секунду (рад/с). На рис. 1 коэффициенты В в графиках «Поток»

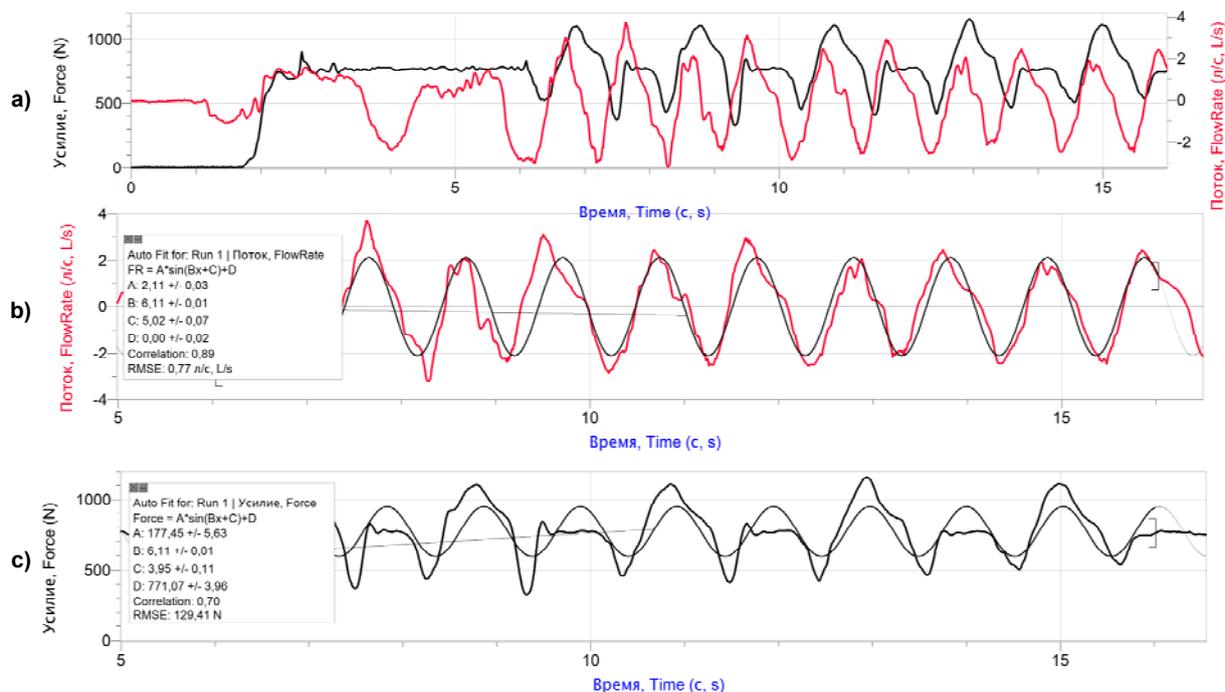


Рис. 1. Графики вертикальной составляющей реакции опоры «Усилие» и скорости потока дыхательного воздуха «Поток» в упражнении «приседание»: а – общий вид «сырых» графиков; б – график «Поток» и результаты аппроксимации; в – график «Усилие» и результаты аппроксимации

Fig. 1. Ground reaction forces in the vertical direction with respect to efforts and airflow rate measurements and their approximation during the squat exercise: а – raw data; б – airflow rate measurements and their approximation; в – effort measurements and their approximation

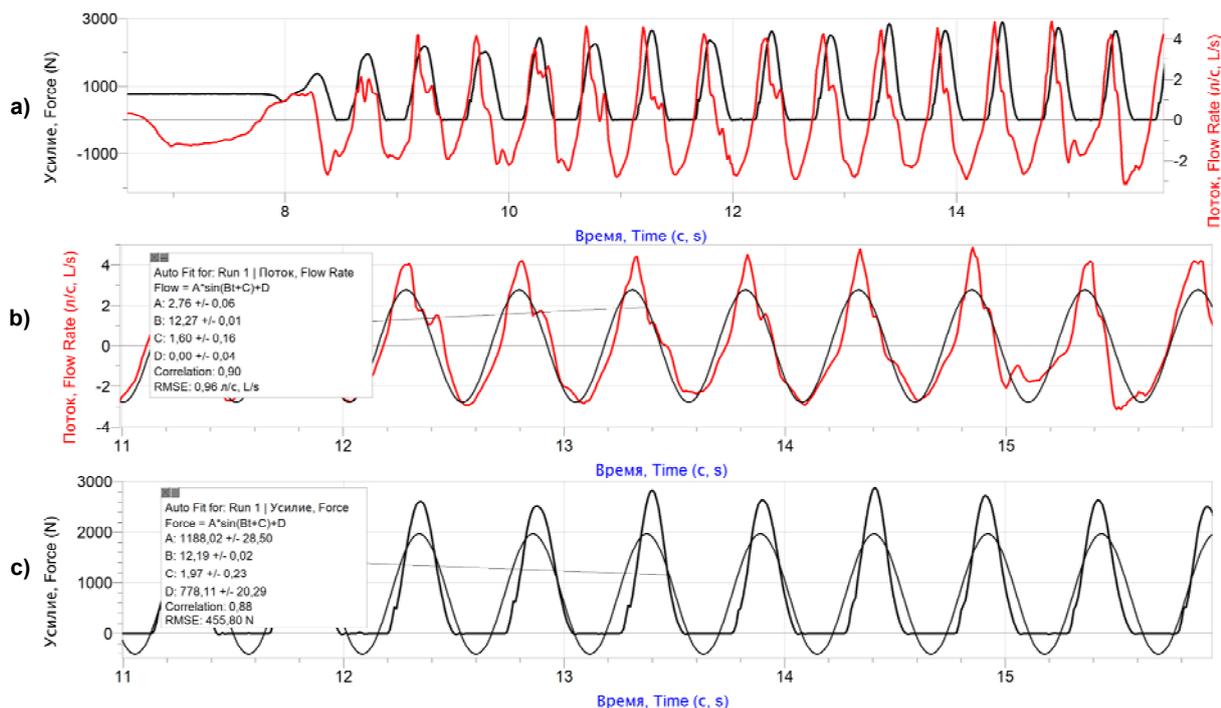


Рис. 2. Графики вертикальной составляющей реакции опоры «Усилие» и скорости потока дыхательного воздуха «Поток» в упражнении «прыжки на месте»: а – общий вид «сырых» графиков; б – график «Поток» и результаты аппроксимации; с – график «Усилие» и результаты аппроксимации

Fig. 2. Ground reaction forces in the vertical direction with respect to efforts and airflow rate during the jumping on the spot exercise: a – raw data; b – airflow rate measurements and their approximation; c – effort measurements and their approximation

и «Усилие» равны (6,11 рад/с). Это означает, что частота усилий в упражнении совпадает с частотой движения потока дыхательного воздуха.

Чтобы перевести значения коэффициента В из рад/с в частоту движения в минуту, необходимо произвести простое арифметическое вычисление: $(B/2\pi) \cdot 60$. Таким образом, в упражнении «приседание» совершается примерно $(6,11/6,28) \cdot 60 \approx 53$ усилий в минуту и столько же циклов вдоха-выдоха (рис. 1в, с). Но на рис. 1а видно, что испытуемый за 10 секунд (с 6-й до 16-й секунды) выполнил 5 приседаний (5 высоких пика), т. е. темпом 30 приседаний в минуту. Здесь необходимо отметить, что на один цикл приседания у испытуемого приходится два усилия (рис. 1с). Первое усилие происходит при амортизации при приседании (высокий пик) и второе усилие – при выпрямлении ног (невысокий пик). Поэтому циклов $\bar{V}(t)$ в два раза больше, чем циклов приседания. На рис. 2 коэффициенты В показателей также примерно равны (12,27 и 12,19 рад/с). Испытуемый выполнял прыжки в темпе примерно $(12,19/6,28) \cdot 60 \approx 115$ прыжков в минуту, а дыхательных циклов $(12,27/6,28) \cdot 60 \approx 117$ в минуту. Это также означает, что частота

та усилий в упражнении «прыжки на месте» близки к частоте движения потока дыхательного воздуха.

Начальная фаза колебаний коэффициента С зависит от того, с какого положения начинается аппроксимация – от фазы дыхания (вдох или выдох) и от фазы упражнения (начало, середина или завершение движения). Коэффициент С не влияет на степень локомоторно-респираторного сопряжения, но указывает на то, что сигналы $\bar{V}(t)$ и $F_{\text{верт}}(t)$ могут иметь небольшой сдвиг по оси абсцисс относительно друг друга. Разница в показателях начальной фазы может зависеть от уровня двигательного опыта, однако этот факт требует дальнейших исследований.

Коэффициент D на графиках «Поток» (0,00 л/с, рис. 1б, рис. 2б) показывает, что вдох и выдох производится от нулевого уровня оси ординат. Коэффициент D на графиках «Усилие» (771,07 N, рис. 1б; 778,11 N, рис. 2б) показывает, что масса испытуемого равнялась примерно 77 кг.

Закключение. Объяснение локомоторно-респираторного сопряжения, с точки зрения авторов выше указанной гипотезы «давления и / или изменения объема в грудной полости

в результате сотрясения, связанного с контактом с землей», подтверждается в упражнении «прыжки на месте» и не подтверждается в упражнении «приседание». Однако анализ графиков методом аппроксимации в том и другом упражнении показывает тесную связь частот $\bar{V}(t)$ и $F_{\text{верт}}(t)$, а следовательно, сопряженность этих показателей. Таким образом, в упражнениях «приседание» и «прыжки на месте» циклические усилия оказывают возмущающее воздействие на функцию внешнего дыхания. Вследствие такого воздействия дыхательные движения в физических упражнениях проявляются у человека как вынужденные колебания потока дыхательного воздуха. Поэтому следует выдвинуть гипотезу о том,

что именно результирующая волна усилия, которая проходит через кинематические звенья, является фактором локомоторно-респираторного сопряжения. Результаты исследования свидетельствуют о том, что дыхательные и локомоторные ритмы связаны, однако закономерности и последствия локомоторно-респираторного сопряжения (ЛРС, LRC) требуют дальнейшего и более углубленного изучения.

В тренировочной практике степень совпадения круговой частоты потока дыхательного воздуха и круговой частоты усилий спортсмена можно применять в качестве одного из критериев эффективности техники выполнения циклических физических упражнений.

Список литературы

1. Бреслав, И.С. Дыхание и мышечная активность человека в спорте: рук. для изучающих физиологию человека / И.С. Бреслав, Н.И. Волков, Р.В. Тамбовцева – М.: Совет. спорт, 2013. – 336 с. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25761264> (дата обращения: 15.01.2021).
2. Бреслав, И.С. Регуляция дыхания: висцеральная и поведенческая составляющие / И.С. Бреслав, А.Д. Ноздрачев // Успехи физиол. наук – 2007. – Т. 38, № 2. – С. 26–45. – https://www.elibrary.ru/download/elibrary_9495405_28935983.pdf (дата обращения: 15.01.2021).
3. Вейкуть, А.Г. Об авторской методике применения в учебно-тренировочном процессе профессиональных теннисистов дыхательных упражнений / А.Г. Вейкуть // Человек. Спорт. Медицина. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 61–66. DOI: 10.14529/hsm170307
4. Попов, Г.И. Ударные волновые процессы в опорных взаимодействиях в спорте / Г.И. Попов, В.С. Маркарян // Теория и практика физ. культуры. – 2018. – № 10. – С. 88–91. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35583575> (дата обращения: 15.01.2021).
5. Потапов, В.Н. Влияние средств гиперкапнической гипоксии на функциональную и специальную физическую подготовленность юных дзюдоистов / В.Н. Потапов, Д.О. Малеев // Человек. Спорт. Медицина. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 93–98. DOI: 10.14529/hsm160410
6. Тихонов, В.Ф. Исследование взаимосвязи непроизвольного дыхания у человека с вертикальными ускорениями движения туловища / В.Ф. Тихонов // Современ. наукоемкие технологии. – 2016. – № 2-1. – С. 171–175. – <https://doi.org/10.17513/snt.35596> (дата обращения: 15.03.2021).
7. Фарфель, В.С. Управление движениями в спорте / В.С. Фарфель. – 2-е изд., стереотип. – М.: Совет. спорт, 2011. – 202 с. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20125069> (дата обращения: 15.01.2021).
8. A Flexible and Accurate Method to Estimate the Mode and Stability of Spontaneous Coordinated Behaviors: The Index-of-Stability (IS) Analysis / G. Zelic, D. Varoqui, J. Kim et al. // Behav Res. – 2018. – Vol. 50. – P. 182–194. – <https://doi.org/10.3758/s13428-017-0861-2> (дата обращения: 15.01.2021).
9. Effect of Cadence on Locomotor-Respiratory Coupling During Upper-Body Exercise / N.B. Tiller, M.J. Price, I.G. Campbell et al. // Eur J Appl Physiol. – 2017. – Vol. 117. – P. 279–287. – <https://doi.org/10.1007/s00421-016-3517-5> (дата обращения: 15.01.2021).
10. Kevin Boldt. Quadrupedal Locomotion-Respiration Entrainment and Metabolic Economy in Cross-Country Skiers / Kevin Boldt, Anthony Killick, and Walter Herzog // Journal of Applied Biomechanics. – 2016. – Vol. 32, Iss. 1. – P. 1–6. – <https://doi.org/10.1123/jab.2014-0243> (дата обращения: 15.01.2021).
11. Respiratory Frequency as a Marker of Physical Effort During High-Intensity Interval Training in Soccer Players / Andrea Nicolò, Marco Montini, Michele Girardi, Francesco Felici, Ilenia Bazzucchi and Massimo Sacchetti // International Journal of Sports Physiology and Performance. – 2020. – Vol. 15, Iss. 1. – P. 73–80. – <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0028> (дата обращения: 15.01.2021).

12. Stickford, A.S.L. *Ventilation and Locomotion in Humans: Mechanisms, Implications, and Perturbations to the Coupling of These Two Rhythms* / A.S.L. Stickford, J.L. Stickford // *Springer Science Reviews*. – 2014. – Vol. 2. – P. 95–118. – <https://doi.org/10.1007/s40362-014-0020-4> (дата обращения: 15.01.2021).

References

1. Breslav I.S., Volkov N.I., Tambovtseva R.V. *Dykhaniye i myshechnaya aktivnost cheloveka v sporte: Rukovodstvo dlya izuchayschikh fiziologiyu cheloveka* [Breathing and Muscle Activity of a Person in Sports]. Moscow, Soviet Sport Publ., 2013. 336 p.

2. Breslav I.S. Nozdrachev A.D. [Respiration Regulation. Visceral and Behavioral Components]. *Uspekhi fiziologicheskikh nauk* [Advances in Physiological Sciences], 2007, vol. 38, no. 2, pp. 26–45. (in Russ.)

3. Veykut A.G. On the Proprietary Method of Breathing Exercises Applied in Training of Professional Tennis Players. *Human. Sport. Medicine*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 61–66. (in Russ.) DOI: 10.14529/hsm170307

4. Popov G.I., Markarian V.S. [Shock Wave Processes in Support Interactions in Sports]. *Teoriya i praktika fizicheskoy kultury* [Theory and Practice of Physical Culture], 2018, no. 10, pp. 88–91. (in Russ.)

5. Potapov V.N., Maleev D.O. Influence of Hypercapnic Hypoxia on Functional and Special Physical Fitness in Young Judokas. *Human. Sport. Medicine*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 93–98. (in Russ.) DOI: 10.14529/hsm160410

6. Tikhonov V.F. [Investigation of the Relationship of Involuntary Breathing in Humans with Vertical Accelerations of Body Movement]. *Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii* [Modern High Technology], 2016, no. 2–1, pp. 171–175. (in Russ.) DOI: 10.17513/snt.35596

7. Farfel V.S. *Upravlenie dvizheniyami v sporte* [Motion Control in Sports]. Moscow, Soviet Sport Publ., 2011. 202 p.

8. Zelic G., Varoqui D., Kim J. et al. A Flexible and Accurate Method to Estimate the Mode and Stability of Spontaneous Coordinated Behaviors: The Index-of-Stability (IS) Analysis. *Behav Reserch*, 2018, vol. 50, pp. 182–194. DOI: 10.3758/s13428-017-0861-2

9. Tiller N.B., Price M.J., Campbell I.G. et al. Effect of Cadence on Locomotor-Respiratory Coupling During Upper-Body Exercise. *European Journal Appl Physiology*, 2017, vol. 117, pp. 279–287. DOI: 10.1007/s00421-016-3517-5

10. Boldt K., Killick A., Herzog W. Quadrupedal Locomotion-Respiration Entrainment and Metabolic Economy in Cross-Country Skiers. *Journal of Applied Biomechanics*, 2019, vol. 32, iss. 1, pp. 1–6. DOI: 10.1123/jab.2014-0243

11. Nicolò A., Montini M., Girardi M. et al. Respiratory Frequency as a Marker of Physical Effort During High-Intensity Interval Training in Soccer Players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2020, vol. 15, iss. 1, pp. 73–80. DOI: 10.1123/ijsp.2019-0028

12. Stickford A.S.L., Stickford J.L. Ventilation and Locomotion in Humans: Mechanisms, Implications, and Perturbations to the Coupling of These Two Rhythms. *Springer Science Reviews*, 2014, vol. 2, pp. 95–118. DOI: 10.1007/s40362-014-0020-4

Информация об авторе

Тихонов Владимир Федорович, кандидат педагогических наук, заведующий кафедрой физической культуры и спорта, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. Россия, Чувашская Республика, 428015, Чебоксары, Московский проспект, д. 15.

Information about the author

Vladimir F. Tikhonov, Candidate of Pedagogical Sciences, Head of the Department of Physical Education and Sport, I.N. Ulianov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

Статья поступила в редакцию 17.04.2022

The article was submitted 17.04.2022