

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ «ПРЕДСТАРТОВОГО» СОСТОЯНИЯ СПОРТСМЕНА С ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАКЦИЕЙ НА СТАНДАРТИЗИРОВАННУЮ НАГРУЗКУ

А. Е. Чиков^{1,2}✉, А. Л. Куцало¹, А. Д. Киселев¹, В. В. Владимиров¹, М. В. Крылова¹, Д. С. Медведев³, Д. И. Каплун⁴, И. И. Шпаковская⁴

¹ Научно-исследовательский институт гигиены, профпатологии и экологии человека ФМБА России, Санкт-Петербург, Россия

² Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский Институт биорегуляции и геронтологии, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

Интенсивная физическая работа характеризуется активностью физиологических механизмов как взаимосвязанных компонентов, объединенных для выполнения физической нагрузки. Определение набора индивидуально-типологических паттернов активности физиологических механизмов отвечает на вопросы, связанные с повышением эффективности реализации потенциала спортсмена, определением лимитирующих звеньев и резервных возможностей организма, управлением тренировочной нагрузкой. Целью работы было изучение взаимосвязи реакции физиологических механизмов при выполнении стандартизированной физической нагрузки с показателями «предстартового» состояния. Для исследования физиологических закономерностей спортсмен выполнял ступенчато-возрастающий тест на беговой дорожке с фиксацией показателей газообмена, частоты сердечных сокращений. Расчет показателей физиологических реакций производили относительно ключевых фаз нагрузочного тестирования: «предстартового» состояния, аэробного и анаэробного порогов, пика нагрузки, фаз быстрого и медленного восстановления. С использованием алгоритмов понижения размерности T-SNE была разработана математическая модель «Подкова покоя», характеризующая «предстартовое» состояние спортсмена перед выполнением теста. Модель позволяет оценить уровень выделения неметаболического CO₂ за весь период тестирования (MIC — 0,29) и за период нагрузки (MIC — 0,35).

Ключевые слова: спортсмен, физическая нагрузка, «предстартовое» состояние, моделирование энергообеспечения, порог анаэробного обмена, физиологическая реакция, стандартизированная нагрузка

Вклад авторов: А. Е. Чиков — анализ результатов исследования; А. Д. Киселев, В. В. Владимиров — подготовка текста статьи, анализ литературных источников; А. Л. Куцало, Д. С. Медведев — обсуждение результатов исследования, подготовка текста статьи; М. В. Крылова — подготовка данных к анализу; Д. И. Каплун, И. И. Шпаковская — обработка данных, разработка модели предстартового состояния.

Соблюдение этических стандартов: исследование одобрено этическим комитетом ФГУП «НИИ ГПЭЧ» ФМБА России (протокол № 2 от 01 марта 2021 г.).

✉ **Для корреспонденции:** Александр Евгеньевич Чиков
ул. Заводская, зд. 6/2, корп. 93, гп. Кузьмоловский, 188663, Россия; chikov.alexandr@yandex.ru

Статья получена: 21.08.2023 **Статья принята к печати:** 17.09.2023 **Опубликована онлайн:** 30.09.2023

DOI: 10.47183/mes.2023.037

RELATIONSHIP BETWEEN THE ATHLETE'S PRE-START STATE PARAMETERS AND PHYSIOLOGICAL RESPONSE TO STANDARDIZED LOAD

Chikov AE^{1,2}✉, Kutsalo AL¹, Kiselev AD¹, Vladimirov VV¹, Krylova MV¹, Medvedev DS³, Kaplun DI⁴, Shpakovskaya II⁴

¹ Research Institute of Hygiene, Occupational Pathology and Human Ecology of Federal Medical Biological Agency, Saint Petersburg, Russia

² Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia

³ Saint Petersburg Institute of Bioregulation and Gerontology, Saint Petersburg, Russia

⁴ Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia

Intense physical work is characterized by activity of physiological mechanisms as interrelated components joint for physical exertion. Definition of a set of individual and typological patterns of the physiological mechanisms' activity answers the questions related to improvement of the athlete's potential realization efficiency, definition of the limiting components and body's reserve capacity, training load management. The study was aimed to assess the relationship between the responses of physiological mechanisms associated with standardized physical exertion and the pre-start state parameters. The athlete was through the step incremental test with the treadmill involving recording of the gas exchange parameters and heart rate to study physiological patterns. The physiological response parameters were calculated relative to the key phases of the exercise test: pre-start state, aerobic and anaerobic thresholds, peak exertion, rapid and slow recovery phases. The mathematical model "Horseshoe of Rest" characterizing the athlete's pre-start state before performing the test was constructed using the T-SNE dimensionality reduction algorithms. The model enables estimation of the release of non-metabolic CO₂ throughout the testing period (MIC — 0.29) and the exertion period (MIC — 0.35).

Keywords: athlete, physical activity, pre-start state, modeling of energy supply, threshold of anaerobic metabolism, physiological response, standardized load

Author contribution: Chikov AE — analysis of the results; Kiselev AD, Vladimirov VV — manuscript writing, literature review; Kutsalo AL, Medvedev DS — discussion of the results, manuscript writing; Krylova MV — data preparation for analysis; Kaplun DI, Shpakovskaya II — data processing, constructing the pre-start state model.

Compliance with the ethical standards: the study was approved by the Ethics Committee of the Research Institute of Hygiene, Occupational Pathology and Human Ecology of FMBA of Russia (protocol № 2 of 1 March 2021).

✉ **Correspondence should be addressed:** Alexander E. Chikov
Zavodskaja, zd. 6/2, korp. 93, gp. Kuzmolovskij, 188663, Russia; chikov.alexandr@yandex.ru

Received: 21.08.2023 **Accepted:** 17.09.2023 **Published online:** 30.09.2023

DOI: 10.47183/mes.2023.037

Регулярная, значительная по объему и интенсивности мышечная работа обеспечивается согласованной активностью различных физиологических механизмов, отражающих системный характер реакции на нагрузку [1–3]. Под физиологическими механизмами и их реакциями в данном контексте понимается совокупность взаимосвязанных компонентов и их ответ на выполнение стандартизированной возрастающей нагрузки «до отказа». Каждый физиологический механизм имеет однотипную архитектуру и отличается характеристиками входящих в его состав компонентов, к которым, по нашему мнению, целесообразно отнести источники энергообеспечения (аэробные, лактатные и алактатные пути ресинтеза АТФ) и факторы их реализации, характеризующие динамическую, процессуальную сторону энергообеспечения (мощность, емкость, скорость развертывания и переключения между различными путями ресинтеза АТФ). Эти физиологические механизмы обеспечивают ведущую функциональную систему (ВФС), реализующую специализированную целенаправленную деятельность на уровне целостного организма [4, 5]. Для выполнения деятельности требуется должный (зависит от характеристик нагрузки) уровень физиологических резервов организма. Производство энергии обеспечивается согласованной работой сердечно-сосудистой, дыхательной, мышечной, нервной систем, системой крови и др. [6]. Только при должном уровне производства энергии можно обеспечить требуемую интенсивность физической работоспособности [7, 8]. Определение набора индивидуально-типологических паттернов активности физиологических механизмов, обеспечивающих выполнение мышечной работы, позволяет ответить на целый ряд принципиально важных вопросов, связанных с повышением эффективности реализации потенциала спортсмена, определением лимитирующих звеньев и резервных возможностей организма, управлением тренировочной нагрузкой с целью сохранения здоровья и профессионального долголетия [9–11]. В связи со сложной организацией физиологических закономерностей при выполнении мышечной работы представляется перспективным изучение их с использованием математического моделирования и алгоритмов машинного обучения [12–15]. Например, есть ряд успешных решений по предсказанию лактатного порога с помощью рекуррентных нейронных сетей для бегунов-любителей [12, 16].

Следует отметить, что еще до начала выполнения интенсивной физической нагрузки (соревнования или нагрузочное тестирование «до отказа») происходит формирование функциональной системы при участии корковых влияний («предстартовое» состояние). Взаимосвязь «предстартового» состояния с физиологической реакцией на физическую нагрузку, на

наш взгляд, имеет важное значение, так как позволит заранее прогнозировать реакцию систем организма.

Цель исследования — изучить взаимосвязь реакции физиологических механизмов при выполнении стандартизированной физической нагрузки с «предстартовым» состоянием спортсмена.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

В исследовании принимали участие спортсмены в возрасте $24,7 \pm 4,0$ лет, сложнокоординационных и циклических видов спорта с квалификацией первый взрослый разряд, КМС (кандидат в мастера спорта). Критерии включения: наличие медицинского заключения о допуске к участию в физкультурных и спортивных мероприятиях (тренировочных мероприятиях и спортивных соревнованиях). Спортсмены находились на подготовительном этапе годичного цикла подготовки. Для построения моделей были использованы результаты 1495 исследований спортсменов. Обследуемые выполняли стандартизированное нагрузочное тестирование в виде ступенчатовозрастающей нагрузки на беговой дорожке. Протокол нагрузочного тестирования: первая ступень — 5 км/ч, длительность ступени — 2 мин, увеличение скорости на каждой ступени — 1,5 км/ч. В течение 3 мин перед тестированием («предстартовое» состояние), во время него и в период восстановления (15 мин) фиксировались первичные показатели: частоты сердечных сокращений (ЧСС, уд/мин), минутный объем дыхания (VE, л/мин), объем потребления кислорода (VO_2 , л/мин) и выделения углекислого газа (VCO_2 , л/мин), дыхательный коэффициент (RER), кислородный пульс (O_2HR , мл/уд), дыхательный эквивалент кислорода (EqO_2) и углекислого газа (EqCO_2), с использованием эргоспирометрической системы «Oxuscon Pro» (Erich Jaeger; Германия). Критерий исключения (остановки): отказ спортсмена или достижение предельной максимальной расчетной ЧСС (частоты сердечных сокращений) по формуле:

$$\text{ЧСС}_{\text{max}} = 220 - \text{возраст}.$$

Отказ во время выполнения нагрузки был зафиксирован у 1358 спортсменов, 137 спортсменов были остановлены по достижении максимальной ЧСС.

При изучении физиологических реакций учитывались показатели в следующих ключевых фазах нагрузочного тестирования: 1) «предстартовое» состояние; 2) порог аэробного обмена; 3) анаэробный порог; 4) фаза быстрого восстановления.

Вторая, третья и четвертая фазы были выставлены с использованием программы AT_Inter [16], где заложена рекомендательная система определения порогов

Таблица 1. Количественные значения первичных показателей «предстартового» состояния обследуемых спортсменов

Показатель	Среднее значение	Ошибка среднего
ЧСС	86,1	12,9
VE	15,7	3
VO_2	519,1	98,6
VCO_2	417,6	86,3
O_2HR	6,1	1,3
EqO_2	27,1	3,4
EqCO_2	33,6	3,5

аэробного и анаэробного обмена, фазы быстрого восстановления с использованием классических методов и методов машинного обучения (кластерного анализа) [8]. На основе первичных параметров было рассчитано более 100 показателей, характеризующих физиологические реакции организма на стандартизированную нагрузку.

Обработку данных выполняли с использованием языка программирования Python 3 и библиотек scikit-learn (открытая библиотека, предназначенная для машинного обучения). Для оценки нелинейной взаимосвязи между параметрами использовали показатель MIC (максимальный информационный коэффициент, Maximal Information Coefficient) [17]. Показатель принимает значения от 0 до 1, где 0 означает статистическую независимость, а 1 — полную зависимость между параметрами. Критически значимый уровень взаимосвязи в исследовании составляет 0,2 при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состояние организма спортсмена в первую фазу нагрузочного тестирования характеризуется изменением работы физиологических систем организма, в частности, сердечно-сосудистой и дыхательной, вызванным корковыми влияниями в связи с выполнением предстоящей интенсивной физической нагрузки (табл. 1).

Корреляционный анализ не выявил статистически значимых связей первичных показателей «предстартового» состояния с показателями физиологической реакции организма на стандартизированную физическую нагрузку ($p > 0,05$). Поэтому мы решили использовать алгоритм понижения размерности t-SNE до трехмерного пространства для разработки модели «Подкова_покоя», характеризующей «предстартовое» состояние (см. рис.). Алгоритм t-SNE (t-distributed Stochastic Neighbor Embedding, стохастическое вложение соседей с t-распределением) — это нелинейный алгоритм понижения размерности [18, 19]. Основная идея метода заключается в поиске отображения многомерного признакового пространства на плоскость из n -мерного пространства в трехмерное, т. е. выполняется поиск нового представления данных, при котором сохраняется соседство наблюдений [20]. На вход описанного алгоритма подавали первичные показатели «предстартового» состояния. Результатом работы стали новые синтезированные признаки 0, 1 и 2, которые аккумулируют информацию из исходных признаков, но не имеют явной интерпретации. В модели «Подкова_покоя» каждая точка соответствует одному наблюдению с признаками 0, 1 и 2 (см. рис.). Все наблюдения выстроились в форме подковы, указывающей на имеющуюся закономерность в «предстартовом» состоянии спортсменов.

Для оценки нелинейной взаимосвязи между параметрами, полученными в ходе теста в ключевые фазы, и интерпретации полученных новых синтезированных признаков 0, 1 и 2 был рассчитан показатель MIC. По результатам анализа было выявлено, что координаты 0 и 1 не имеют статистически значимых связей (максимальные значения связи не достигают критически значимого уровня,

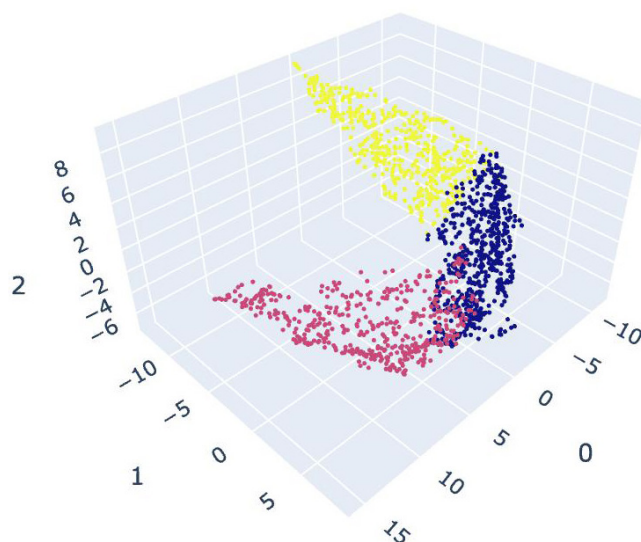


Рис. Модель предстартового состояния «Подкова_покоя»

MIC = 0,2) с результатами нагрузочного тестирования. Признак 2 имеет статистически достоверную связь с показателями выделения неметаболического углекислого газа: 1) за весь период тестирования ($CO_{2_non_physiol_total}$); 2) за период нагрузки ($CO_{2_non_physiol_L}$). Критерий MIC составил 0,29 и 0,35 соответственно (табл. 2). Неметаболический CO_2 рассчитывали для периода выполнения нагрузки и восстановления как количество выделенного углекислого газа сверх уровня при RER = 1.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Неметаболический CO_2 при выполнении интенсивной физической нагрузки появляется в результате активности анаэробного лактатного механизма и нейтрализации его метаболитов буферными системами, в частности, бикарбонатом плазмы крови. Таким образом, по показателям предтестового состояния можно судить об активности данного механизма и систем, поддерживающих гомеостаз за счет выведения CO_2 в легких, нейтрализации повышения кислотности буферными системами крови, в первую очередь бикарбонатной и гемоглобиновой, при участии карбоангидразы [21]. Выведение CO_2 также зависит и от индивидуальных перфузионных свойств альвеол легких [22, 23].

Данных о роли и значении выделения CO_2 при оценке физической работоспособности в литературе представлено крайне мало [24]. В основном исследователи при оценке физической работоспособности уделяют внимание максимальному потреблению кислорода и его потреблению на уровне порога анаэробного обмена. Однако возможности организма спортсмена зависят не только от количества расходуемого O_2 как эквивалента производства энергии, но и от параметров, лимитирующих физическую работоспособность, в частности, выделения CO_2 как интегрального показателя активности анаэробных механизмов [25]. Известно, что повышение CO_2 и понижение pH в результате активности анаэробного лактатного

Таблица 2. Показатели корреляции между неметаболическим CO_2 и признаком 2 модели «Подкова_покоя»

Показатель	Координата 2
$CO_{2_non_physiol_total}$	0,29
$CO_{2_non_physiol_L}$	0,35

механизма до известных значений стимулируют ВФС, а выход количественных значений за пределы оптимального уровня угнетает ее в результате ингибирования активности ферментативных систем, снижения скорости проведения нервного импульса, способности мышц к сокращению и др. [26–28].

ВЫВОДЫ

В результате разработанной модели «Подковы_покоя», характеризующей «предстартовое» состояние спортсмена, выявлена взаимосвязь нового синтезированного признака 2 с показателями выделения неметаболического

углекислого газа при выполнении стандартизированной физической нагрузки. Показатель неметаболического CO_2 представляет собой интегративный параметр активности анаэробного лактатного механизма и механизмов утилизации его метаболитов, которые оказывают существенное влияние на ВФС [27]. В дальнейших работах мы предполагаем показать значение неметаболического CO_2 для длительности выполнения ступенчатовозрастающей нагрузки «до отказа» и внедрить результаты исследования в уже разработанные модели [16] для выявления индивидуально-типологических паттернов активности физиологических механизмов при выполнении стандартизированной физической нагрузки.

Литература

- Ожгибесова М. А., Ганеева Е. Р., Куриляк М. М. Ключевые механизмы мышечного роста. Научное обозрение. Педагогические науки. 2019; 4: 31–4.
- Piuccoa T, Diefenthaler F, Prossera A, Binic R. Validity of different EMG analysis methods to identify aerobic and anaerobic thresholds in speed skaters. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2020; 52.
- Zignoli A, Fornasiero A, Stella F, Pellegrini B, Schena F, Biral F, et al. Expert-level classification of ventilatory thresholds from cardiopulmonary exercising test data with recurrent neural networks. *European Journal of Sport Science*. 2019; 19 (9): 1221–9.
- Анохин П. К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. Принципы системной организации функций. М.: Наука, 1973; 120 с.
- Быков Е. В., Балберова О. В., Коломиец О. И., Чипышев А. В. Ч. Взаимосвязь данных функционального тестирования и результатов соревновательной деятельности спортсменов с различной направленностью физических нагрузок. Ученые записки университета им. П. Ф. Лесгафта. 2018; 8: 32–8.
- Ham J-H, Park H-Y, Kim Y-H, Bae S-K, Ko B-H, Nam S-S. Development of an anaerobic threshold (HRLT, HRVT) estimation equation using the heart rate threshold (HRT) during the treadmill incremental exercise. *J Exerc Nutrition Biochem*. 2017; 21 (3): 43–9.
- Киселев А. Д. Моделирование элементов спортивной деятельности для оценки и развития специальной работоспособности. Физическое воспитание и спортивная тренировка. 2021; 35: 72–80.
- Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer W, Sietsema K, X-G Sun, et al. *Principles of Exercise Testing and Interpretation*. 3rd ed. Lipincott Williams & Wilkins, 1999; p. 551.
- Korzeniewski B. Regulation of ATP supply in mammalian skeletal muscle during resting state intensive work transition. *Biophysical Chemistry*. 2000; 83 (1): 19–34.
- Sales MM, Sousa CV, Alves PM. Response to “A comprehensive integrative perspective of the anaerobic threshold engine”: the driver is not a part of an engine. *Physiology & Behavior*. 2019; 15.
- Giovanelli N, Scaini S, Billat V, Lazzer S. A new field test to estimate the aerobic and anaerobic thresholds and maximum parameters. *European Journal of Sport Science*. 2020; 20 (4): 437–43.
- Etxegaraia U, Portillo E, Irazusta J, Arriandiaga A, Cabanes I, et al. Estimation of lactate threshold with machine learning techniques in recreational runners. *Applied Soft Computing*. 2018; 63: 181–96.
- Moxnes JF, Sandbakk Ø. Mathematical modelling of the oxygen uptake kinetics during whole-body endurance exercise and recovery. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2018; 24 (1): 76–86.
- Morton RH, Billat V. Modelling decremental ramps using 2- and 3-parameter “critical power” models. *Journal of Sports Sciences*. 2013; 31 (7): 731–5.
- Lin C-W, Huang C-F, Wang J, Fu L-L, Mao T-Y. Detection of ventilatory thresholds using near-infrared spectroscopy with a polynomial regression model. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2020; 27 (6): 1637–42.
- Chikov A, Egorov N, Medvedev D, Chikova S, Pavlov E, Drobintsev P, et al. Determination of the athletes' anaerobic threshold using machine learning methods. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2022; 73: 47–53.
- Reshef DN, Reshef YA, Finucane HK, Grossman SR, McVean G, Turnbaugh PJ, et al. Detecting novel associations in large data sets. *Science*. 2011; 334 (6062): 1518–24.
- Van der Maaten L, Hinton G. Visualizing data using t-SNE. *Journal of machine learning research*. 2008; 9: 11.
- James G, Witten D, Hastie T, Tibshirani R. *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R / 1nd ed*. Statistical Theory and Related Fields. 2021; 6 (1): 440.
- McInnes L, Healy J, Melville J. Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction. 2018 Feb. Available from: <https://arxiv.org/abs/1802.03426>.
- Occhipinti R, Boron WF. Role of carbonic anhydrases and inhibitors in acid-base physiology: insights from mathematical modeling. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019; 20 (15): 38–41.
- Науменко Ж. К., Черняк А. В., Неклюдова Г. В., Чучалин А. Г. Вентиляционно-перфузионное отношение. Практическая пульмонология. 2018; 4: 86–90.
- Овсянников Р. Ю., Лебединский К. М. Выбор конечно-экспираторного давления при механической респираторной поддержке (обзор). *Общая реаниматология*. 2022; 18 (6): 50–8.
- Чеснокова Н. П., Понукалина Е. В., Моррисон В. В., Бизенкова М. Н. Лекция 4. Физиология транспорта газов кровью и кислородного обеспечения тканей. Научное обозрение. Медицинские науки. 2017; 2: 40–2.
- Тхоревский В. И., Литвак А. Л. Взаимосвязь между потреблением O_2 и кровоснабжением сокращающихся мышц при работе разной мощности у лиц, тренирующих аэробную выносливость. Теория и практика физической культуры. 2006; 4: 49–54.
- Анаев Э. Х. Лактат и легкие: от теории к практике. Пульмонология. 2014; 6: 108–14.
- Михайлов С. С. Биохимия двигательной деятельности. М.: Спорт, 2016; 296 с.
- Лазарева Э. А. Биосенсорные критерии работоспособности спортсменов, специализирующихся на различных дистанциях легкоатлетического бега. Особенности формирования здорового образа жизни: факторы и условия. 2015; 179–82.

References

- Ozhgibesova MA, Ganeeva ER, Kurilyak MM. Key mechanisms of muscle growth. *Scientific Journal Scientific Review. Pedagogical sciences*. 2019; 4: 31–4. Russian.
- Piuccoa T, Diefenthalerb F, Prossera A, Binic R. Validity of different EMG analysis methods to identify aerobic and anaerobic thresholds in speed skaters. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2020; 52.
- Zignoli A, Fornasiero A, Stella F, Pellegrini B, Schena F, Biral F, et al. Expert-level classification of ventilatory thresholds from cardiopulmonary exercising test data with recurrent neural networks. *European Journal of Sport Science*. 2019; 19 (9): 1221–9.
- Anokhin PK. Printsipial'nye voprosy obshchey teorii funktsional'nykh sistem. Printsipy sistemnoy organizatsii funktsiy. M.: Nauka; 1973. 120 s. Russian.
- Bykov EV, Balberova OV, Kolomiets OI, Chipyshev AVCh. Correlation of functional testing data and results of competitive activities of athletes with different directions of physical activity. *Scientific notes of the University. P.F. Lesgaft*. 2018; 8: 32–8. Russian.
- Ham J-H, Park H-Y, Kim Y-H, Bae S-K, Ko B-H, Nam S-S. Development of an anaerobic threshold (HRLT, HRVT) estimation equation using the heart rate threshold (HRT) during the treadmill incremental exercise. *J Exerc Nutrition Biochem*. 2017; 21 (3): 43–9.
- Kiselev AD. Modeling of elements of sports activities for the assessment and development of special performance. *Physical education and sports training*. 2021; 35: 72–80. Russian.
- Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer W, Sietsema K, X-G Sun, et al. *Principles of Exercise Testing and Interpretation*. 3rd ed. Lipincott Williams & Wilkins, 1999; p. 551.
- Korzeniewski B. Regulation of ATP supply in mammalian skeletal muscle during resting state intensive work transition. *Biophysical Chemistry*. 2000; 83 (1): 19–34.
- Sales MM, Sousa CV, Alves PM. Response to “A comprehensive integrative perspective of the anaerobic threshold engine”: the driver is not a part of an engine. *Physiology & Behavior*. 2019; 15.
- Giovanelli N, Scaini S, Billat V, Lazzer S. A new field test to estimate the aerobic and anaerobic thresholds and maximum parameters. *European Journal of Sport Science*. 2020; 20 (4): 437–43.
- Etxegaraia U, Portillo E, Irazusta J, Arriandiaga A, Cabanes I, et al. Estimation of lactate threshold with machine learning techniques in recreational runners. *Applied Soft Computing*. 2018; 63: 181–96.
- Moxnes JF, Sandbakk Ø. Mathematical modelling of the oxygen uptake kinetics during whole-body endurance exercise and recovery. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2018; 24 (1): 76–86.
- Morton RH, Billat V. Modelling decremental ramps using 2- and 3-parameter "critical power" models. *Journal of Sports Sciences*. 2013; 31 (7): 731–5.
- Lin C-W, Huang C-F, Wang J, Fu L-L, Mao T-Y. Detection of ventilatory thresholds using near-infrared spectroscopy with a polynomial regression model. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2020; 27 (6): 1637–42.
- Chikov A, Egorov N, Medvedev D, Chikova S, Pavlov E, Drobinsev P, et al. Determination of the athletes' anaerobic threshold using machine learning methods. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2022; 73: 47–53.
- Reshef DN, Reshef YA, Finucane HK, Grossman SR, McVean G, Turnbaugh PJ, et al. Detecting novel associations in large data sets. *Science*. 2011; 334 (6062): 1518–24.
- Van der Maaten L, Hinton G. Visualizing data using t-SNE. *Journal of machine learning research*. 2008; 9: 11.
- James G, Witten D, Hastie T, Tibshirani R. *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R / 1st ed*. Statistical Theory and Related Fields. 2021; 6 (1): 440.
- McInnes L, Healy J, Melville J. Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction. 2018 Feb. Available from: <https://arxiv.org/abs/1802.03426>.
- Ochipinti R, Boron WF. Role of carbonic anhydrases and inhibitors in acid-base physiology: insights from mathematical modeling. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019; 20 (15): 38–41.
- Naumenko ZhK, Chernyak AV, Neklyudova GV, Chuchalin AG. Ventilation-perfusion ratio. *Journal of Practical Pulmonology*. 2018; 4: 86–90. Russian.
- Ovsyannikov RYu, Lebedinsky KM. Choice of ultimate expiratory pressure with mechanical respiratory support (review). *General resuscitation*. 2022; 18 (6): 50–8. Russian.
- Chesnokova NP, Ponukalina EV, Morrison VV, Bizenkova MN. Lecture 4. Physiology of blood gas transport and tissue oxygen supply. *Scientific review. Medical sciences*. 2017; 2: 40–2. Russian.
- Torevsky VI, Litvak AL. The relationship between O2 consumption and blood supply of contracting muscles when working at different capacities in aerobic endurance trainees. *Theory and practice of physical culture*. 2006; 4: 49–54. Russian.
- Anaev EK. Lactat and lungs: from theory to practice. *Pulmonology*. 2014; 6: 108–14. Russian.
- Mikhaylov SS. *Biokhimiya dvigatel'noy deyatel'nosti*. M.: Sport, 2016; 296 s. Russian.
- Lazareva EA. Bioenergetic performance criteria for athletes specializing in various distances of athletics running. Features of the formation of a healthy lifestyle: factors and conditions. 2015; 179–82. Russian.