

<https://doi.org/10.47183/mes.2025-278>

УДК 61:796/799



РАЗРАБОТКА ПРОГНОСТИЧЕСКИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ФИЗИЧЕСКОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ В СПОРТЕ И СПОРТИВНОЙ МЕДИЦИНЕ

В.В. Петрова✉

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия

Введение. Прогностическое моделирование в здравоохранении — новая развивающаяся отрасль научного знания, находящаяся на стыке информационных технологий и медицины. Для спортивной медицины наличие точного прогноза параметров физической работоспособности в ответ на изменяющиеся условия внешней среды сложно переоценить, а для спортсмена подобная информация даст необходимое конкурентное преимущество при проведении ответственных соревнований.

Цель. Разработка методов и подходов к анализу клинических данных углубленного медицинского обследования (УМО) спортсменов.

Материалы и методы. Проведен анализ обезличенных медицинских данных результатов УМО для 6222 спортсменов высокого класса (3792 мужчины и 2430 женщин) (средний возраст $23,3 \pm 5,1$ года). Данные были распределены по полу и в соответствии с группами видов спорта: циклические виды спорта (1376 спортсменов, из них 861 мужчина и 515 женщин); сложнокоординационные виды спорта (1342 спортсмена, из них 761 мужчина и 581 женщина); игровые виды спорта (1618 спортсменов, из них 980 мужчин и 638 женщин) и спортивные единоборства (1886 спортсменов, из них 1190 мужчин и 696 женщин). Анализу подверглись как клинические данные по наличию (отсутствию) нозологических единиц, выявленных в ходе осмотров врачами-специалистами, так и физиологические показатели нагрузочного тестирования на велоэргометре. Статистический анализ проведен с использованием программы StatTech v. 4.6.0 (разработчик — ООО «Статтех», Россия).

Результаты. В результате на основе метода регрессионного анализа были построены достоверные ($p < 0,001$) прогностические модели группы параметров физической работоспособности, которые выявили наличие более 40 связей с клиническими диагнозами врачей-специалистов. Больше всего взаимосвязей было зафиксировано между группой показателей физической работоспособности и проставленными диагнозами стоматолога. Дальнейшая работа будет направлена на разработку математической модели прогнозирования снижения результативности у спортсменов спорта высших достижений, основанной на анализе рисков развития заболеваний.

Выводы. Разработанные и примененные подходы к анализу клинических данных углубленного медицинского обследования спортсменов высокого класса позволили, применяя метод линейной регрессии, создать эффективные прогностические математические модели параметров физической работоспособности с учетом наличия/отсутствия выявленного диагноза. Предложенные модели обеспечивают комплексную оценку функционального состояния спортсменов, что способствует более точному прогнозированию уровня физической работоспособности и позволяет оптимизировать профессиональную деятельность, минимизируя риски перетренированности и травматизма.

Ключевые слова: спорт высших достижений; математическая модель; параметры физической работоспособности; нозологическая единица; регрессионный анализ

Для цитирования: Петрова В.В. Разработка прогностических математических моделей параметров физической работоспособности в спорте и спортивной медицине. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2025;27(3):392–399. <https://doi.org/10.47183/mes.2025-278>

Финансирование: исследование выполнено без спонсорской поддержки.

Благодарность: Александру Сергеевичу Самойлову, д-ру мед. наук, профессору, чл.-корр. РАН, за помощь, консультацию и ценные критические замечания в процессе написания данной статьи.

Соответствие принципам этики: исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБУ «ГНЦ — ФМБЦ им. А.И. Бурназяна» ФМБА России (протокол № 121 от 23.01.2025). Всеми участниками подписано добровольное согласие на использование своих обезличенных медицинских данных в научных исследованиях.

Потенциальный конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

✉ Петрова Виктория Викторовна vpetrova@fmbcfmba.ru

Статья поступила: 21.02.2025 **После доработки:** 03.06.2025 **Принята к публикации:** 07.08.2025 **Online first:** 20.08.2025

DEVELOPMENT OF PREDICTIVE MATHEMATICAL MODELS FOR PHYSICAL PERFORMANCE PARAMETERS IN SPORTS AND SPORTS MEDICINE

Victoria V. Petrova✉

Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Introduction. Predictive modeling in healthcare is a rapidly evolving field of scientific knowledge at the intersection of information technology and medicine. In sports medicine, the importance of accurate forecasting of physical performance parameters in response to changing environmental conditions cannot be overstated. For athletes, such information provides a crucial competitive advantage before major competitions.

Objective. Development of methods and approaches to analyze clinical data obtained through comprehensive medical examinations of athletes.

© В.В. Петрова, 2025

Materials and methods. An analysis of anonymized medical data from comprehensive medical examinations was conducted for 6222 world-class athletes (3792 males and 2430 females) with a mean age of 23.3 ± 5.1 years. The data were stratified by sex and according to sports categories: cyclic sports (1376 athletes, including 861 males and 515 females); complex coordination sports (1342 athletes, including 761 males and 581 females); team sports (1618 athletes, including 980 males and 638 females); and combat sports (1886 athletes, including 1190 males and 696 females). The analysis included both clinical data on the presence (or absence) of pathological conditions identified during specialist medical examinations and physiological parameters from bicycle ergometer stress testing. Statistical analysis was performed using the Stat-Tech v. 4.6.0 software (StatTech, Russia).

Results. Using regression analysis, statistically significant ($p < 0.001$) predictive models for a set of physical performance parameters were developed, which revealed over 40 associations with clinical diagnoses made by medical specialists. The strongest correlations were observed between physical performance indicators and dental diagnoses. Future research will focus on creating a mathematical model to predict performance decline in world-class athletes, based on an analysis of disease development risk factors.

Conclusions. The developed and implemented approaches for analyzing clinical data from comprehensive medical examinations of world-class athletes enabled the creation of effective predictive mathematical models of physical performance parameters using linear regression methodology, while accounting for the presence/absence of identified diagnoses. The proposed models provide a comprehensive assessment of athletes' functional status, thus allowing accurate prediction of physical performance levels and optimization of professional training by minimizing risks of overtraining and sports-related injuries.

Keywords: high-performance sports; mathematical model; physical performance parameters; pathological condition; regression analysis

For citation: Petrova V.V. Development of predictive mathematical models for physical performance parameters in sports and sports medicine. *Extreme Medicine*. 2025;27(3):392–399. <https://doi.org/10.47183/mes.2025-278>

Funding: the study was conducted without external funding.

Acknowledgements: the author expresses her gratitude to Prof. Alexander S. Samoilov, Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, for his assistance, advice, and valuable critical comments during work on this article.

Compliance with ethical principles: the study was approved by the local Ethics Committee of the Burnasyan Federal Medical Biophysical Center (protocol No. 121 dated 23.01.2025). All participants signed a voluntary consent form for the use of their anonymized medical data in scientific research.

Potential conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

✉ Victoria V. Petrova vpetrova@fmbcfmba.ru

Received: 21 Feb. 2025 **Revised:** 3 June 2025 **Accepted:** 7 Aug. 2025 **Online first:** 20 Aug. 2025

ВВЕДЕНИЕ

Использование математических моделей для прогнозирования и оценки физиологических показателей профессиональных спортсменов тесно связано как с развитием самого спорта, так и с прогрессом в разработке аналитических методов.

В сфере анализа и прогнозирования спортивной результативности в настоящее время используются достижения статистического моделирования, что, в свою очередь, способствует трансформации подходов и методологии исследований, которые используются в данной области по всему миру. До недавнего времени спортивная наука опиралась на традиционные статистические методы, но инновации привнесли более сложные модели, такие как алгоритмы машинного обучения и иерархическое моделирование. Эти инструменты дают возможность исследователям выявлять сложные взаимосвязи как в медицинских, так и в спортивных данных, что способствует более глубокому пониманию предикторов снижения работоспособности и процессов оптимизации тренировочных стратегий [1–6].

Научные исследования в этой области по большей части были направлены на понимание индивидуальных и общих тенденций в динамике показателей общей и специфической физической работоспособности. Так, исследования беговой деятельности спортсменов проводились в трех направлениях: попытка объяснить физиологические предпосылки достижения мировых рекордов, разработка эквивалентных систем подсчета и прогноза результатов забега и моделирование индивидуальных физиологических параметров организма

легкоатлета [7–9]. Несмотря на эти работы, задача создания комплексной модели, которая могла бы научно охватить и сопоставить все эти аспекты, до недавнего времени оставалась невыполнимой. Это подчеркивает наличие существенного пробела в исследовательской деятельности, связанного с отсутствием универсальных, персонализированных и доступных математических моделей, способных прогнозировать параметры физической работоспособности в спорте.

С другой стороны, интеграция и анализ больших объемов данных повышает точность прогнозов результативности в спорте. В исследовании, основанном на использовании онлайн-базы данных о выступлениях британских спортсменов с 1954 по 2013 год и занятых ими местах, была создана простая модель, охватывающая ключевые характеристики достигнутых результатов каждого спортсмена при сохранении эмпирической закономерности. Эта модель показала очень низкую среднюю ошибку прогнозирования достижения определенного результата, сделав важный шаг к объединению понимания спортивных достижений через анализ данных [10, 11].

В исследованиях авторов, занимающихся проблематикой разработки и применения прогностических математических моделей в спортивной медицине и спорте, подавляющее количество работ посвящено либо прогнозированию травматизма в различных видах спорта, либо оценке вероятности достижения запланированных спортивных результатов [12–15]. Исследований, которые были бы направлены на поиск возможных взаимосвязей между наличием (отсутствием) диагнозов у спортсменов высокого класса

и прогнозами их влияния на снижение показателей физической работоспособности, обнаружено не было.

С развитием исследований в области нейросетей и машинного обучения многие авторы (в том числе и международные коллективы) объединяют свои усилия для изучения взаимодействия физиологических и психологических факторов, влияющих на спортивные достижения. При этом целью является оптимизация тренировочных режимов посредством использования прогностических моделей, способных учитывать динамическую природу спортивных результатов, и поиск их взаимосвязи с физиологическими процессами в организме спортсмена.

Цель исследования — разработка методов и подходов к анализу клинических данных углубленного медицинского обследования спортсменов (УМО).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе проведен анализ и математическая обработка обезличенных данных клинических и инструментальных методов исследования, извлеченных из медицинской документации спортсменов высокого класса, проходивших углубленное медицинское обследование (УМО) на базе ФГБУ «ГНЦ — ФМБЦ им. А.И. Бурназяна» ФМБА России в 2019–2023 гг. Использованы клинические данные 6222 спортсменов, из них 3792 мужчины и 2430 женщин (средний возраст $23,3 \pm 5,1$ года).

Данные были распределены по полу и в соответствии с группами видов спорта: циклические виды спорта (1376 спортсменов, из них 861 мужчина и 515 женщин); сложнокоординационные виды спорта (1342 спортсмена, из них 761 мужчина и 581 женщина); игровые виды спорта (1618 спортсменов, из них 980 мужчин и 638 женщин) и спортивные единоборства (1886 спортсменов, из них 1190 мужчин и 696 женщин).

В статье приводятся сведения о спортсменах-мужчинах из циклических ($n = 861$) и игровых видов спорта ($n = 980$), т.к., по нашему мнению, в этих видах спорта мы получили наиболее репрезентативные и однородные выборки, которые позволили провести качественную статистическую обработку и построить надежные математические модели, тогда как остальные данные использовали для предварительного скрининга и отбора.

При разработке настоящих моделей критерии включения данных для анализа были следующие:

- показатели должны были отражать ключевые параметры физического состояния и функциональных возможностей спортсменов (морфофункциональный статус, аэробные и анаэробные способности и др.);
- данные были собраны в рамках однородных групп спортсменов (пол, возраст, группа видов спорта, уровень спортивного мастерства);
- показатели были получены по единой методологии (при проведении УМО по аналогичным протоколам нагрузочного тестирования).

К критериям исключения данных из анализа относились неполные, ошибочные или аномальные параметры, которые могли исказить результаты моделирования.

Таким образом, в качестве исходных показателей, на которых было проведено построение математи-

ческих моделей, мы использовали: возраст (полных лет); вес (кг); рост (см); потребление кислорода на уровне ПАНО (VO_2 ПАНО, мл/мин/кг); потребление кислорода на максимальной ступени нагрузочного тестирования (VO_2 ПИК, мл/мин/кг); дыхательный коэффициент (R , отн. ед.); частоту сердечных сокращений до нагрузки ($ЧСС_{до}$, уд./мин); частоту сердечных сокращений на уровне аэробного порога ($ЧСС_{АП}$, уд./мин); частоту сердечных сокращений на уровне ПАНО; ($ЧСС_{ПАНО}$, уд./мин); частоту сердечных сокращений на пике нагрузки ($ЧСС_{ПИК}$, уд./мин); частоту сердечных сокращений на 3-й минуте восстановления ($ЧСС_{3 мин}$, уд./мин); мощность ступени, на которой был достигнут уровень порога анаэробного обмена ($Мощ_{ПАНО}$, Вт); мощность максимальной ступени при тестировании ($Мощ_{ПИК}$, Вт); относительную мощность на уровне порога анаэробного обмена ($Мощ_{ПАНО}/вес$, Вт/кг); относительную максимальную мощность при тестировании ($Мощ_{ПИК}/вес$, Вт/кг). В каждой группе видов спорта статистическая совокупность исследуемых параметров была комбинационно сгруппирована по качественному признаку наличия (1)/отсутствия (0) нозологической единицы у следующих врачей-специалистов: гастроэнтеролог, дерматовенеролог, кардиолог, невропатолог, отоларинголог, офтальмолог, стоматолог, травматолог-ортопед и эндокринолог.

Все количественные показатели при моделировании представлены в виде: X_M — пол (0 — женский, 1 — мужской); $X_{возр}$ — возраст; $X_{вес}$ — вес; $X_{рост}$ — рост; $X_{гастр}$ — нозологическая единица гастроэнтеролога (0 — нет, 1 — есть); $X_{дерм}$ — нозологическая единица дерматовенеролога (0 — нет, 1 — есть); $X_{кард}$ — нозологическая единица кардиолога (0 — нет, 1 — есть); $X_{невр}$ — нозологическая единица невропатолога (0 — нет, 1 — есть); $X_{отол}$ — нозологическая единица отоларинголога (0 — нет, 1 — есть); $X_{офтл}$ — нозологическая единица офтальмолога (0 — нет, 1 — есть); $X_{стомат}$ — нозологическая единица стоматолога (0 — нет, 1 — есть); $X_{травм}$ — нозологическая единица травматолога-ортопеда (0 — нет, 1 — есть); $X_{эндок}$ — нозологическая единица эндокринолога (0 — нет, 1 — есть); $X_{VO_2 ПАНО}$ — VO_2 на уровне ПАНО; $X_{VO_2 ПИК}$ — VO_2 на пике; X_R — дыхательный коэффициент; $X_{ЧСС до}$ — ЧСС до нагрузки; $X_{ЧСС АП}$ — ЧСС на уровне АП; $X_{ЧСС ПАНО}$ — ЧСС на уровне ПАНО; $X_{ЧСС ПИК}$ — ЧСС на пике нагрузки; $X_{ЧСС 3 мин}$ — ЧСС на 3-й минуте восстановления; $X_{Мощ ПАНО}$ — мощность на ПАНО; $X_{Мощ ПИК}$ — мощность на пике; $X_{Мощ ПАНО/вес}$ — мощность на ПАНО, деленная на вес; $X_{Мощ ПИК/вес}$ — мощность на пике нагрузки, деленная на вес.

Статистический анализ проводился с использованием программы StatTech v. 4.6.0 (ООО «Статтех», Россия). Методом линейной регрессии выявляли устройство совокупности и устанавливали взаимосвязи между ее признаками. Проведено построение математических моделей, описывающих зависимости между группой количественных показателей физической работоспособности и наличием (отсутствием) нозологической единицы, установленной врачом при проведении углубленного медицинского обследования, для каждой категории вида спорта и пола. Коэффициенты уравнения регрессии были найдены методом наименьших квадратов согласно применению формул Крамера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При подготовке массива данных к построению моделей методом линейной регрессии для достижения необходимой точности были собраны релевантные данные результатов УМО спортсменов, исключены неполные, ошибочные или аномальные значения, удалены неинформативные признаки. Общая характеристика показателей спортсменов-мужчин циклических и игровых видов спорта, вошедших в анализ, приведена в таблице 1.

Из показателей нагрузочного тестирования, характеризующих общую физическую работоспособность (п. 4–15 табл. 1), с физиологической точки зрения для задач спортивной медицины наиболее

интересны показатели газового обмена: VO_2 ПАНО, VO_2 ПИК, дыхательный коэффициент, а также прямой показатель достигнутой мощности на пороге анаэробного обмена.

Приведенные ниже модели описывают общие зависимости (и созависимости) между отобранными показателями физической работоспособности (значение Y в формуле) и всеми другими показателями, включая наличие/отсутствие нозологической единицы при обследовании (значения X в формуле).

Наблюдаемая зависимость показателя потребления кислорода на уровне анаэробного порога VO_2 ПАНО (1 — циклические виды спорта, 2 — игровые виды спорта) описывается следующими уравнениями линейной регрессии:

$$Y_{VO_2 \text{ ПАНО}} = -5,313 - 0,424 \times X_{\text{невр}} - 0,369 \times X_{\text{стомат}} + 0,921 \times X_{\text{эндок}} + 0,058 \times X_{\text{вес}} + 0,479 \times X_{VO_2 \text{ ПИК}} - 0,024 \times X_{\text{ЧСС ДО}} + 0,029 \times X_{\text{ЧСС ПАНО}} + 0,038 \times X_{\text{МощПАНО}} - 0,047 \times X_{\text{МощПИК}} + 5,924 \times X_{\text{МощПАНО/вес}} \quad (1)$$

$$Y_{VO_2 \text{ ПАНО}} = -0,301 + 0,572 \times X_M + 0,576 \times X_{VO_2 \text{ ПИК}} - 0,022 \times X_{\text{ЧСС ДО}} + 0,072 \times X_{\text{ЧСС ПАНО}} - 0,033 \times X_{\text{ЧСС ПИК}} - 0,012 \times X_{\text{ЧСС 3 мин}} - 0,004 \times X_{\text{МощПИК}} + 7,671 \times X_{\text{МощПАНО/вес}} - 3,725 \times X_{\text{МощПИК/вес}} \quad (2)$$

Полученные модели зависимости потребления кислорода на уровне анаэробного порога VO_2 ПАНО отличались следующим характеристикам.

1. Коэффициент множественной корреляции для циклических видов спорта составил $R_{xy} = 0,965$, для игровых видов спорта — $R_{xy} = 0,948$, что соответствует весьма высокой тесноте связи по шкале Чеддока.

2. Коэффициент множественной детерминации для циклических видов спорта составил $R^2 \approx (0,965)^2 = 0,931$, для игровых видов спорта — $R^2 \approx (0,948)^2 = 0,899$. Полученные модели позволяют предсказать значения показателя VO_2 ПАНО с высокой точностью: в циклических видах

спорта они объясняют 93,1% наблюдаемой дисперсии, а в игровых видах спорта — 89,9%. Модели были статистически значимыми ($p < 0,001$). Исключая взаимные зависимости группы параметров физической работоспособности, выявили отрицательные зависимости исследуемого параметра VO_2 ПАНО с нозологическими единицами невропатолога и стоматолога, а также положительная зависимость с нозологической единицей эндокринолога.

Наблюдаемая зависимость показателя потребления кислорода на пике нагрузки VO_2 ПИК (3 — циклические виды спорта, 4 — игровые виды спорта) описывается следующим уравнением линейной регрессии:

$$Y_{VO_2 \text{ ПИК}} = 5,920 + 0,737 \times X_M - 1,417 \times X_{\text{эндок}} + 0,865 \times X_{VO_2 \text{ ПАНО}} - 0,050 \times X_{\text{ЧСС ПАНО}} + 0,036 \times X_{\text{ЧСС ПИК}} - 6,026 \times X_{\text{МощПАНО/вес}} + 6,668 \times X_{\text{МощПИК/вес}} \quad (3)$$

$$Y_{VO_2 \text{ ПИК}} = 5,743 + 5,743 \times X_M - 0,091 \times X_{\text{возр}} + 0,823 \times X_{VO_2 \text{ ПАНО}} - 6,022 \times X_R + 0,023 \times X_{\text{ЧСС ДО}} - 0,076 \times X_{\text{ЧСС ПАНО}} + 0,048 \times X_{\text{ЧСС ПИК}} - 6,090 \times X_{\text{МощПАНО/вес}} + 8,022 \times X_{\text{МощПИК/вес}} \quad (4)$$

Основные характеристики полученных моделей:

1. Коэффициент множественной корреляции для циклических видов спорта составил $R_{xy} = 0,933$, для игровых видов спорта — $R_{xy} = 0,919$, что соответствует весьма высокой тесноте связи по шкале Чеддока.

2. Коэффициент множественной детерминации для циклических видов спорта равен $R^2 \approx (0,933)^2 = 0,871$, для игровых видов спорта — $R^2 \approx (0,919)^2 = 0,844$.

Полученные модели позволяют предсказать значения показателя VO_2 ПИК с высокой точностью:

в циклических видах спорта они объясняют 87,1% наблюдаемой дисперсии, в игровых видах спорта — 84,4%. Модели были статистически значимыми ($p < 0,001$).

Исключая взаимные зависимости группы параметров физической работоспособности, выявили отрицательную зависимость исследуемого параметра VO_2 ПИК с нозологической единицей эндокринолога.

Наблюдаемая зависимость показателя дыхательного коэффициента R (5 — циклические виды спорта, 6 — игровые виды спорта) от количественных факторов описывается уравнением линейной регрессии:

$$Y_R = 1,436 - 0,013 \times X_M + 0,013 \times X_{\text{стомат}} - 0,002 \times X_{\text{рост}} - 0,002 \times X_{\text{вес}} - 0,0001 \times X_{\text{ЧСС ДО}} + 0,0001 \times X_{\text{ЧСС АП}} - 0,001 \times X_{\text{ЧСС ПАНО}} + 0,001 \times X_{\text{ЧСС ПИК}} + 0,001 \times X_{\text{ЧСС 3 мин}} + 0,001 \times X_{\text{МощПАНО}} - 0,167 \times X_{\text{МощПАНО/вес}} + 0,107 \times X_{\text{МощПИК/вес}} \quad (5)$$

Таблица 1. Описательная статистика количественных переменных, включенных в анализ

№ п/п	Исследуемый параметр	Медианное (среднее) значение параметра	Диапазон значений	
			min	max
Циклические виды спорта (<i>n</i> = 861)				
1	Возраст, лет	21,00 [19,0–25,0]	18,00	26,00
2	Рост, см	180,00 [172,0–186,0]	152,00	207,00
3	Вес, кг	74,00 [65,0–83,0]	43,00	120,00
4	VO ₂ ПАНО, мл/мин/кг	42,68 ± 9,71 (42,16–43,19)	14,74	68,36
5	VO ₂ ПИК, мл/мин/кг	49,97 [43,99–57,25]	2,52	92,93
6	<i>R</i> , отн. ед.	1,16 [1,10–1,23]	0,89	1,55
7	ЧСС _{ДО} , уд/мин	76,00 [67,00–85,00]	40,00	126,00
8	ЧСС _{АП} , уд/мин	120,00 [108,00–132,00]	61,00	175,00
9	ЧСС _{ПАНО} , уд/мин	155,00 [144,00–165,00]	95,00	196,00
10	ЧСС _{ПИК} , уд/мин	173,00 [164,00–181,00]	18,00	206,00
11	ЧСС _{3 мин} , уд/мин	102,00 [92,00–114,00]	45,00	155,00
12	Мощ _{ПАНО} , Вт	275,00 [225,00–340,00]	90,00	520,00
13	Мощ _{ПИК} , Вт	345,00 [285,00–420,00]	115,00	600,00
14	Мощ _{ПАНО} /вес, Вт/кг	3,81 ± 0,90 (3,76–3,85)	0,00	6,34
15	Мощ _{ПИК} /вес, Вт/кг	4,69 [4,15–5,43]	1,42	7,72
Игровые виды спорта (<i>n</i> = 980)				
1	Возраст, лет	22,00 [19,00–26,00]	18,00	26,00
2	Рост, см	182,00 [173,00–191,00]	151,00	220,00
3	Вес, кг	80,00 [68,00–92,00]	47,00	126,00
4	VO ₂ ПАНО, мл/мин/кг	33,42 [28,92–38,27]	14,26	58,86
5	VO ₂ ПИК, мл/мин/кг	41,25 ± 6,84 (40,92–41,58)	15,85	69,41
6	<i>R</i> , отн. ед.	1,14 [1,09–1,19]	0,90	1,52
7	ЧСС _{ДО} , уд/мин	79,00 [71,00–86,00]	44,00	142,00
8	ЧСС _{АП} , уд/мин	117,00 [107,00–128,00]	67,00	177,00
9	ЧСС _{ПАНО} , уд/мин	149,00 [137,00–159,00]	91,00	199,00
10	ЧСС _{ПИК} , уд/мин	168,00 [159,00–176,00]	65,00	202,00
11	ЧСС _{3 мин} , уд/мин	103,00 [93,00–112,00]	29,00	173,00
12	Мощ _{ПАНО} , Вт	235,00 [195,00–285,00]	80,00	470,00
13	Мощ _{ПИК} , Вт	310,00 [245,00–365,00]	130,00	525,00
14	Мощ _{ПАНО} /вес, Вт/кг	2,99 [2,57–3,44]	0,00	5,27
15	Мощ _{ПИК} /вес, Вт/кг	3,85 ± 0,63 (3,82–3,89)	1,91	6,18

Таблица составлена автором по собственным данным

Примечание: VO₂ ПАНО, VO₂ ПИК, Мощ_{ПАНО}/вес, Мощ_{ПИК}/вес представлены в виде среднего значения и стандартной ошибки среднего значения ($M \pm m$); остальные показатели представлены в виде медианы (M_e) и значений нижнего и верхнего квартилей Q [25–75%]; VO₂ ПАНО — потребление кислорода на уровне порога анаэробного обмена, VO₂ ПИК — потребление кислорода на максимальной ступени нагрузочного тестирования, R — дыхательный коэффициент, ЧСС_{ДО} — частота сердечных сокращений до нагрузки, ЧСС_{АП} — частота сердечных сокращений на уровне аэробного обмена, ЧСС_{ПАНО} — частота сердечных сокращений на пороге анаэробного обмена; ЧСС_{ПИК} — частота сердечных сокращений на пике нагрузки; ЧСС_{3 мин} — частота сердечных сокращений на 3-й минуте восстановления; Мощ_{ПАНО} — мощность ступени, на которой был достигнут уровень порога анаэробного обмена; Мощ_{ПИК} — относительная максимальная мощность при тестировании; Мощ_{ПАНО}/вес — относительная мощность на пороге анаэробного обмена; Мощ_{ПИК}/вес — относительная максимальная мощность при тестировании.

$$Y_R = 0,388 + 0,388 \times X_M + 0,012 \times X_{\text{офтл}} + 0,009 \times X_{\text{стомат}} + 0,002 \times X_{\text{вес}} - 0,002 \times X_{\text{VO}_2\text{ПИК}} - 0,001 \times X_{\text{ЧСС ПАНО}} + \\ + 0,000 \times X_{\text{ЧСС 3 мин}} + 0,001 \times X_{\text{ЧСС ПИК}} - 0,001 \times X_{\text{МощПАНО}} + 0,092 \times X_{\text{МощПИК/вес}} \quad (6)$$

Характеристики полученных моделей:

1. Для циклических видов спорта коэффициент множественной корреляции составил $R_{xy} = 0,830$, а для игровых видов спорта — $R_{xy} = 0,783$, что соответствует высокой тесноте связи по шкале Чеддока.

2. Коэффициент множественной детерминации для циклических видов спорта — $R^2 \approx (0,830)^2 = 0,689$, для игровых видов спорта — $R^2 \approx (0,783)^2 = 0,613$.

Полученные модели позволяют предсказать значения показателя R (дыхательный коэффициент) с меньшей, но достаточно высокой точностью: в циклических видах спорта они объясняют 68,9% наблюдаемой

дисперсии, в игровых видах спорта — 61,3%. Модели были статистически значимыми ($p < 0,001$).

Исключая взаимные зависимости группы параметров физической работоспособности, выявили положительные зависимости дыхательного коэффициента R с нозологическими единицами офтальмолога и стоматолога.

Наблюдаемая зависимость показателя мощности на уровне анаэробного порога $\text{Мощ}_{\text{ПАНО}}$ (7 — циклические виды спорта, 8 — игровые виды спорта) от количественных факторов описывается уравнением линейной регрессии:

$$Y_{\text{МощПАНО}} = -62,319 + 0,115 \times X_{\text{рост}} + 0,274 \times X_{\text{вес}} + 0,167 \times X_{\text{VO}_2\text{ПАНО}} + 17,519 \times X_R - 0,092 \times X_{\text{ЧСС АП}} + \\ + 0,153 \times X_{\text{ЧСС ПАНО}} - 0,069 \times X_{\text{ЧСС ПИК}} + 0,724 \times X_{\text{МощПИК}} + 74,556 \times X_{\text{МощПАНО/вес}} - 55,694 \times X_{\text{МощПИК/вес}} \quad (7)$$

$$Y_{\text{МощПАНО}} = -49,907 + 1,485 \times X_{\text{невр}} + 1,185 \times X_{\text{офт}} - 0,102 \times X_{\text{возр}} + 0,089 \times X_{\text{рост}} + 0,434 \times X_{\text{вес}} + \\ + 0,154 \times X_{\text{ЧСС ПАНО}} - 0,159 \times X_{\text{ЧСС ПИК}} + 76,528 \times X_{\text{МощПАНО/вес}} + 0,652 \times X_{\text{МощПИК}} - 48,533 \times X_{\text{МощПИК/вес}} \quad (8)$$

Характеристики полученных моделей:

1. Коэффициент множественной корреляции для циклических видов спорта составил $R_{xy} = 0,996$,

для игровых видов спорта — $R_{xy} = 0,994$, что соответствует весьма высокой тесноте связи по шкале Чеддока.

Таблица 2. Выявленная статистически значимая зависимость между показателями физической работоспособности и наличием установленного диагноза врачами-специалистами

Показатель Врач-специалист	VO ₂ ПАНО	VO ₂ ПИК	R	ЧСС _{до}	ЧСС _{АП}	ЧСС _{ПАНО}	ЧСС _{ПИК}	ЧСС _{3 мин}	Мощ _{ПАНО}	Мощ _{ПИК}	Мощ _{ПАНО/вес}	Мощ _{ПИК/вес}
Гастроэнтеролог			1	1	1				1	1		1
Дерматовенеролог	1	1		1					1			
Кардиолог			2		1							
Невропатолог	1								1		1	2
Отоларинголог				1				1				
Офтальмолог			2	1	2				1		1	1
Стоматолог	1		2	1	1	1		1	1	1	1	1
Травматолог-ортопед					1			1				
Эндокринолог	2	2			1							

Таблица составлена автором по собственным данным

Примечание: 1 — зависимость между соответствующими показателями физической работоспособности и наличием установленного диагноза врачами-специалистами в одной группе видов спорта; 2 — зависимость между соответствующими показателями физической работоспособности и наличием установленного диагноза врачами-специалистами в двух группах видов спорта одновременно; VO₂ ПАНО — потребление кислорода на уровне порога анаэробного обмена, VO₂ ПИК — потребление кислорода на максимальной ступени нагрузочного тестирования, R — дыхательный коэффициент, ЧСС_{до} — частота сердечных сокращений до нагрузки, ЧСС_{АП} — частота сердечных сокращений на уровне анаэробного обмена, ЧСС_{ПАНО} — частота сердечных сокращений на пороге анаэробного обмена; ЧСС_{ПИК} — частота сердечных сокращений на пике нагрузки; ЧСС_{3 мин} — частота сердечных сокращений на 3-й минуте восстановления; Мощ_{ПАНО} — мощность ступени, на которой был достигнут уровень порога анаэробного обмена; Мощ_{ПИК} — относительная максимальная мощность при тестировании; Мощ_{ПАНО/вес} — относительная мощность на пороге анаэробного обмена; Мощ_{ПИК/вес} — относительная максимальная мощность при тестировании.

2. Коэффициент множественной детерминации для циклических видов спорта — $R^2 \approx (0,996)^2 = 0,993$, для игровых видов спорта — $R^2 \approx (0,994)^2 = 0,988$. Полученные модели позволяют предсказать значения показателя Мощ_{ПАНО} с очень высокой точностью: в циклических видах спорта они объясняют 99,3% наблюдаемой дисперсии, в игровых видах спорта — 98,8%. Модели были статистически значимыми ($p < 0,001$).

Исключая взаимные зависимости группы параметров физической работоспособности, выявили положительную зависимость мощности на уровне анаэробного порога с нозологическими единицами невропатолога и офтальмолога.

Подобным образом были подвергнуты статистической обработке клинические данные 6222 спортсменов (с учетом пола и принадлежности к различным группам видов спорта). После того как нами были построены 12 моделей для каждой группы видов спорта в отдельности, мы подсчитали количество зависимостей (связей) наличия/отсутствия установленных нозологических единиц, влияющих на данные показатели.

Общее количество выявленных достоверных зависимостей параметров физической работоспособности от наличия/отсутствия проставленных нозологических единиц по всем исследуемым группам спортсменов составило 46 (табл. 2).

Из 46 установленных зависимостей сильнее всего оказались взаимосвязи с проставленными диагнозами у офтальмолога (8 установленных связей) и стоматолога (11 установленных связей). Разработанные математические модели прогнозирования параметров

физической работоспособности подтвердили наличие тесной взаимосвязи между вероятностью достижения запланированного результата на тренировке или ответственных соревнованиях и наличием установленного диагноза врачом-специалистом при прохождении спортсменом углубленного медицинского обследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные и примененные подходы к анализу клинических данных углубленного медицинского обследования спортсменов высокого класса позволили, применяя метод линейной регрессии, создать эффективные прогностические математические модели параметров физической работоспособности с учетом наличия/отсутствия выявленного диагноза. Предложенные модели обеспечивают комплексную оценку функционального состояния спортсменов, что способствует более точному прогнозированию уровня физической работоспособности и позволяет оптимизировать профессиональную деятельность, минимизируя риски перетренированности и травматизма.

Таким образом, результаты исследования вносят свой вклад в развитие спортивной медицины и обеспечивают научную основу для принятия практических решений в области подготовки и медицинского сопровождения спортсменов, что в дальнейшем будет способствовать изменению в подходе спортивных врачей к интерпретации результатов УМО.

Литература / References

1. Бадтиева ВА, Шарыкин АС, Павлов ВА. Спортивная кардиология. Руководство для кардиологов, педиатров, врачей функциональной диагностики и спортивной медицины, тренеров. М.: ИКАР, 2017.
Badatieva VA, Sharykin AS, Pavlov VI. Sports cardiology. Guide for cardiologists, pediatricians, doctors of functional diagnostics and sports medicine, trainers. Moscow: IKAR, 2017 (In Russ.).
2. Мазитова ГИ. Роль исследования гемодинамических характеристик покоя в прогнозе физической работоспособности. Теория и Практика Физической Культуры. 2008;1:83–5.
Mazitova GI. The role of the study of hemodynamic characteristics of rest in the prognosis of physical performance. Theory and Practice of Physical Education. 2008;1:83–5 (In Russ.).
EDN: [NBMJL](#)
3. Петрова ВВ, Киш АА, Брагин МА. Прогноз физической работоспособности по показателям комплексной оценки состояния спортсменов. Медицинская Наука и Образование Урала. 2019;1(97):155–9.
Petrova VV, Kish AA, Bragin MA. Forecast of physical performance based on indicators of a comprehensive assessment of the athletes' condition. Medical Science and Education of the Urals. 2019;1(97):155–9 (In Russ.).
EDN: [ZDRHUT](#)
4. Петрова ВВ, Назарян СЕ, Киш АА, Орлова НЗ, Прудников ИА. Анализ существующих методов оценки психологического состояния спортсмена для выявления наиболее информативных показателей, влияющих на его результативность. Вестник Неврологии, Психиатрии и Нейрохирургии. 2017;9:43–56.
Petrova VV, Nazarjan SE, Kish AA, Orlova NZ, Prudnikov IA. Analysis of existing methods for assessing the psychological state of an athlete to identify the most informative indicators that affect his performance. Bulletin of Neurology, Psychiatry and Neurosurgery. 2017;9:43–56 (In Russ.).
5. Rojas-Valverde D, Gómez-Ruano MA, Ibañez SJ, Nikolaidis PT. Editorial: New technologies and statistical models applied to sports and exercise science research: methodological, technical and practical considerations. Frontiers in Sports and Active Living. 2023;5:1267548.
<https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1267548>
6. Wang Z, Zhang Q, Lan K, Yang Z, Gao X, Wu A, et al. Enhancing instantaneous oxygen uptake estimation by non-linear model using cardio-pulmonary physiological and motion signals. Frontiers in Physiology. 2022;13:1–14.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2022.897412>
7. Бахмейер М, Смоленский АВ, Митюшкина ОА. Профессиональные риски в спорте высших достижений. Вестник Новых Медицинских Технологий. Электронное издание. 2015;3:9.
Bakhmayer M, Smolensky AV, Mityushkina OA. Professional risks in high-performance sports. Bulletin of New Medical Technologies. Electronic edition. 2015;3:9 (In Russ.).
EDN: [UJXHPZ](#)
8. Праскурничий ЕА, Юстова ВД. Методология оценки сердечно-сосудистого риска у летного состава гражданской авиации. Авиакосмическая и Экологическая Медицина. 2020;54(5):50–6

- Praskurnichij EA, Justova VD. Methodology for assessing cardiovascular risk in civil aviation flight personnel. *Aerospace and Environmental Medicine*. 2020;54(5):50–6 (In Russ.). EDN: [CHLUFU](#)
9. Heazlewood T. Prediction versus reality: the use of mathematical models to predict elite performance in swimming and athletics at the Olympic games. *Journal of Sports Science and Medicine*. 2006;5(4):480–7.
 10. Blythe DAJ, Király FJ. Prediction and Quantification of Individual Athletic Performance of Runners. *PLOS ONE*. 2016;11(6):e0157257.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157257>
 11. Brown AW, Kaiser KA, Allison DB. Issues with data and analyses: errors, underlying themes, and potential solutions. *Proceedings of the National Academy of Science of the USA*. 2018;115(11):2563–70.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1708279115>
 12. Le Hyaric A, Aftalion A, Hanley B. Modelling the optimization of world-class 400 m and 1,500 m running performances using high-resolution data. *Frontiers in Sports and Active Living*. 2024;6:1293145.
<https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1293145>
 13. Фудин НА, Хадарцев АА. Медико-биологическое обеспечение физической культуры и спорта высших достижений. *Вестник Новых Медицинских Технологий*. 2010;1:149–50.
Fudin NA, Hadarcev AA. Medical and biological support for physical education and high-performance sports. *Bulletin of New Medical Technologies*. 2010;1:149–50 (In Russ.). EDN: [NWGJLN](#)
 14. Carey DL, Ong K, Whiteley R, Crossley KM, Crow J, Morris ME. Predictive modelling of training loads and injury in Australian football. *International Journal of Computer Science in Sport*. 2018;17(1):49–66.
<https://doi.org/10.2478/ijcss-2018-0002>
 15. Khan NJ, Ahamad G, Naseem M, Sohail SS. Computational efficiency in sports talent identification — systematic review. *International Journal of Applied Decision Sciences*. 2023;16(3):358–84.
<https://doi.org/10.1504/IJADS.2023.130600>

Вклад автора. Автор подтверждает соответствие своего авторства критериям ICMJE. В.В. Петрова — разработка концепции работы, написание текста статьи, критический пересмотр содержания статьи, внесение необходимых правок, утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

ОБ АВТОРЕ

Петрова Виктория Викторовна, канд. мед. наук
<https://orcid.org/0000-0002-9987-6816>
vpetrova@fmbcfmba.ru