

С.В. Назаров¹, А.С. Самойлов², И.В. Круглова¹

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МПК И РВС У СПОРТСМЕНОВ

¹ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва²ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф.Изморова», Москва, Россия

Контактное лицо: Назаров Сергей Викторович: snazarov54@yandex.ru

Резюме

Введение: оценка функционального состояния спортсменов является одной из ключевых задач спортивной медицины. Показатели РВС и МПК служат важными маркерами аэробной работоспособности, однако их измерение связано с методическими ограничениями, что стимулирует развитие субмаксимальных тестов и прогнозных моделей.

Цель: обобщить современные методы оценки и предсказания показателей РВС и МПК, включая прямые и косвенные тесты, лабораторные, физиологические, биохимические, генетические и цифровые показатели, а также методы статистического анализа и машинного обучения.

Материал и методы: проведён аналитический обзор отечественных и зарубежных исследований по эргоспирометрии, субмаксимальным тестам (PWC170, метод Астранда), полевым пробам, биохимическим маркерам, протеомике, генетике и алгоритмам ML. В работе систематизированы данные по выборкам от спортсменов-любителей до атлетов высших достижений.

Результаты: показано, что РВС и МПК зависят от возраста, пола, вида спорта, тренировочного уровня, объёма гемоглобина, запасов железа, маркеров воспаления и особенностей восстановления. Точность прогнозирования повышается при использовании нейронных сетей, SVM, моделей бустинга и носимых сенсоров. Для ряда задач достигается высокая корреляция ($R=0,9$) и ошибка менее 3 – 5 мл/кг/мин. Обозначены ограничения исследований на атлетах высшего уровня и нехватка лонгитюдных данных.

Выводы: существующие методы позволяют эффективно оценивать функциональное состояние спортсменов, однако точность прогностических моделей ограничена дефицитом данных по спортсменам высокого уровня. Перспективным направлением является интеграция многофакторных данных и развитие специализированных моделей для спорта высших достижений.

Ключевые слова: функциональное состояние спортсменов, физическая работоспособность (РВС), максимальное потребление кислорода (МПК, VO_{2max}), субмаксимальные тесты, биомаркеры выносливости, машинное обучение в спортивной медицине, прогностические модели работоспособности

Для цитирования: Назаров С.В., Самойлов А.С., Круглова И.В. Обзор современных подходов к оценке и прогнозированию показателей МПК и РВС у спортсменов //Клинический вестник ФМБЦ им. А.И. Бурназяна 2026. №2. С. 23–35 DOI: 10.33266/2782-6430-2026-2-23-35

S.V. Nazarov¹, A.S. Samoylov², I.V. Kruglova¹

An Overview of Modern Approaches to Assessing and Predicting IPC and PWC Performance Among Athletes

¹International Office, State Research Center - Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia²Federal State Budgetary Institution "Scientific Research Institute of Occupational Medicine named after Academician N.F.Izmerov", Moscow, Russia

Contact person: Nazarov Sergey Victorovich: snazarov54@yandex.ru

Abstract

Background: assessing the functional state of athletes is a key task in sports medicine. Physical Working Capacity (PWC) and maximal oxygen uptake (VO_{2max}) are major markers of aerobic performance, yet their direct measurement is limited by methodological and practical constraints, stimulating the development of submaximal tests and predictive approaches.

Objective: to summarize current methods for assessing and predicting PWC and VO_{2max} , including direct and indirect tests, laboratory and physiological indicators, biochemical and genetic markers, as well as statistical and machine-learning models.

Material and methods: an analytical review of national and international research was conducted, covering ergospirometry, submaximal tests (PWC170, Åstrand-Rhyming), field assessments, biomarkers, proteomics, genetics, and ML algorithms. Data from recreational athletes to elite performers were systematized

Results: PWC and VO₂max were shown to depend on age, sex, sport type, training status, hemoglobin mass, iron stores, inflammatory markers, and recovery characteristics. Predictive accuracy improved when using neural networks, SVM, boosting models, and wearable sensor data, with several studies reporting high correlations ($R=0,9$) and errors below 3-5 ml/kg/min. Current limitations include a lack of studies involving elite athletes and insufficient longitudinal data.

Conclusions: existing methods provide effective assessment of athletes' functional state, yet predictive precision remains constrained by limited high-level datasets. Integration of multifactorial data and development of specialized models for elite sports represent key future directions.

Keywords: *functional state of athletes, physical working capacity (PWC), maximal oxygen uptake (VO₂max), submaximal exercise tests, endurance biomarkers, machine learning in sports medicine, performance prediction models*

For citation: Nazarov SV, Samoylov AS, Kruglova IV. An Overview of Modern Approaches to Assessing and Predicting IPC and PWC Performance Among Athletes. A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center Clinical Bulletin. 2026.2:23-35. (In Russian) DOI: 10.33266/2782-6430-2026-2-23-35

Введение

В системе подготовки атлетов функциональное состояние является одним из ключевых компонентов, который отражает текущую способность ответа на нагрузку и уровень восстановления организма [1]. Одними из главных интегральных показателей функционального состояния являются показатели PWC (Physical Working Capacity, уровень физической работоспособности) и МПК (максимального потребления кислорода, VO₂max) [2]. Эти показатели отражают способность организма выполнять интенсивную работу и обеспечивать мышцы кислородом. Высокий МПК традиционно связывают с успешностью в видах спорта на выносливость. Уровень физической работоспособности (PWC) отражает комплексную возможность организма совершать работу определенной мощности длительно. В спорте высших достижений даже незначительное улучшение аэробных возможностей может дать конкурентное преимущество. Поэтому точная оценка PWC и МПК, а также умение прогнозировать их изменения, имеют практическое значение для тренеров и спортивных врачей. Например, исследования показывают, что МПК является главным фактором, определяющим потенциал высокой работоспособности в циклических видах спорта [2].

Однако непосредственное измерение МПК – трудоемкая процедура, связанная с предельными нагрузками для испытываемого и необходимостью высокоточного оборудования. Проведение подобного теста имеет противопоказания и не всегда возможно на практике. В связи с этим в спортивной физиологии развит целый ряд субмаксимальных тестов и расчетных методов, позволяющих косвенно оценить МПК и PWC без доведения спортсмена до полного изнеможения.

Развитие современных аналитических технологий открывает новые возможности в области оценки показателей аэробной и физической работоспособности: от сбора больших объемов данных о состоянии атлета (например, результаты лабораторных анализов и данные носимых датчиков) до применения методов математического моделирования и машинного обучения для прогнозирования показателей выносливости.

В данной статье рассмотрены базовые понятия функционального состояния спортсмена, а также PWC и МПК – показатели физической работоспособности, являющейся одной из составляющих функционального состояния. Проведён обзор современных подходов к прогнозированию этих показателей (включая статистические модели, машинное обучение, биомаркеры) и особенности их анализа в спорте высших достижений. В заключение, обсуждаются существующие пробелы и перспективы дальнейшего развития данной тематики.

Понятия функционального состояния, PWC, МПК

Функциональное состояние (ФС) спортсмена – интегральная характеристика, описывающая текущее состояние и степень готовности его организма к спортивной деятельности [3]. По определению И.В. Левшина и соавт., концепция «функционального состояния» является одной из характеристик организма, во многом определяющей успех спортивной деятельности: она отражает согласованность работы функциональных систем и резервные возможности спортсмена [4]. Данное состояние динамично и формируется при долгосрочной адаптации. Поддержание оптимального ФС на этапе соревнований является важным для достижения высоких результатов. В спортивной физиологии ФС часто оценивается именно через призму работоспособности и выносливости, ключевыми маркерами которых являются показатели PWC (аббр. от Physical Working Capacity) и МПК (Максимальное потребление кислорода).

Максимальное потребление кислорода (МПК или VO₂ max) – это наибольшее количество кислорода, которое организм способен поглощать и усваивать в единицу времени при предельной физической нагрузке. Как правило, МПК измеряется в миллилитрах O₂ в минуту на килограмм массы тела (л/кг) и отражает предельную аэробную мощность спортсмена. Концепция МПК была впервые введена А.В. Хиллом еще в 1920-х годах на основе экспериментов с анализом выдыхаемого воздуха во время нагрузочных тестов [27]. Уже к 1960-м годам классические работы П.О. Астранда и Б. Салтина продемонстрировали, что спортсмены высших достижений, выступающие в

видах спорта на выносливость, обладают исключительно высокими значениями МПК, и установили четкую зависимость: чем выше МПК, тем выше потенциал спортсмена в аэробных дисциплинах [28]. В результате, МПК стал общепризнанным критерием развития выносливости и аэробной производительности. Методически МПК определяется в лабораторных условиях посредством теста с нарастающей нагрузкой до отказа - например, работа на велоэргометре с постепенным увеличением скорости или мощности до истощения возможностей испытуемого [2]. Во время теста измеряется потребление кислорода и выделение CO_2 с помощью газоанализа, а максимальные достигнутые значения VO_2 фиксируются как МПК. Этот прямой метод считается «золотым стандартом» оценки выносливости, поскольку дает наиболее точное измерение. Стоит отметить, что МПК не равнозначно общей физической подготовленности – помимо максимального потребления кислорода на выносливость влияют анаэробные возможности, экономичность техники, психическая мотивация и др. [2]

PWC – показатель физической работоспособности, характеризующий способность человека выполнять нагрузку умеренной интенсивности. На практике под PWC обычно подразумевают тест PWC170 - мощность работы, при которой частота сердечных сокращений (ЧСС) достигает 170 уд/мин. Эта проба была предложена учеными Каролинского университета (Сьестранд, Валунд) и официально рекомендована ВОЗ в 1968 году для стандартизированной оценки работоспособности [5]. Тест основан на зависимости частоты сердечных сокращений и мощности выполняемой работы. Это позволяет предсказать на основании выполняемой работы небольшой мощности, какой будет у обследуемого ЧСС при любой нагрузке большей интенсивности [29]. В классическом варианте PWC170 определяется на велоэргометре: спортсмен выполняет две ступенчатые нагрузки субмаксимальной мощности, после каждой измеряют пульс, а затем по формуле или графически экстраполируют мощность, соответствующую ЧСС 170. Полученное значение (в ваттах или кгм/мин) отражает функциональные резервы сердечно-сосудистой системы испытуемого. Чем выше PWC170, тем больше работы способен выполнять спортсмен без выхода пульса в запрещенную зону. Показатели часто нормируют на массу тела (Вт/кг) для сопоставимости разных людей. Выбор ЧСС=170 уд/мин. обусловлен тем, что у здоровых молодых людей зависимость ЧСС от нагрузки носит линейный характер примерно до этого уровня, а зона 100-170 уд/мин. соответствует «оптимальному функционированию» сердечно-сосудистой системы. По исходной методике Шестранда (Karolinska Institute, 1950-е гг.), спортсмен выполнял ступенчато возрастающую нагрузку на велосипеде до достижения пульса 170, что было достаточно утомительно и долго. Позднее В.Л.Карпманом был предложен сокращенный вариант: две 5-минутные нагрузки умеренной интенсивности и вычисление PWC170 методом экстраполяции по формуле: $\text{PWC170} = W1 + (W2 -$

$W1) * (170 - f1) / (f2 - f1)$, где W1 и W2 - мощности первой и второй нагрузки, f1 и f2 - ЧСС в конце этих ступеней [2]. В практическом плане, проба PWC170 широко применялась в спортивной медицине СССР и России для массового обследования, так как она относительно проста, занимает порядка 10–15 минут и не требует доводить спортсмена до полного истощения. Этот показатель коррелирует с максимальной аэробной мощностью: еще в 1954 г. Астранд и Рёминг, опираясь на высокую корреляцию между PWC170 и МПК, предложили методику расчёта МПК по результатам субмаксимальных нагрузок [6]. Однако она дает лишь косвенную оценку аэробной производительности. Тем не менее, PWC остается ценным интегральным показателем функционального состояния и его величину можно сопоставлять с МПК.

Методы измерения PWC и МПК: сложности, особенности и косвенные расчёты

Прямое измерение МПК. Наиболее точным методом определения МПК является прямой лабораторный тест с анализом газообмена. Как было описано выше, спортсмен выполняет ступенчато возрастающее упражнение (бег на дорожке или работа на велоэргометре) до полного отказа, при этом с помощью газоанализатора непрерывно измеряется потребление кислорода и выделение углекислого газа. Момент выхода на плато потребления O_2 при нарастающей нагрузке и фиксирует истинное значение максимального потребления кислорода. Одновременно регистрируются ЧСС, вентиляция легких и другие параметры (при необходимости). Прямые тесты на МПК дают наиболее достоверную информацию, однако связаны с рядом трудностей. Во-первых, спортсмен должен работать до изнеможения, что требует высокой мотивации, подготовки и может нести риски для здоровья. Во-вторых, необходима сложная аппаратура и квалифицированный персонал для проведения тестирования. Нагрузочные тесты максимальной мощности сложно проводить часто из-за высокой степени стресса для организма. Кроме того, полученное значение МПК справедливо именно для конкретного вида теста - например, у многих спортсменов МПК при беге на дорожке выше, чем при работе на велоэргометре, из-за вовлечения большей мышечной массы (разница может достигать порядка 20% между беговой и велосипедной пробами). Все это обуславливает потребность в разработке косвенных методов оценки аэробных возможностей, не требующих выполнения предельных усилий.

Косвенные методы. В спортивной практике широко применяются косвенные методы оценки МПК, не требующие предельных усилий от спортсмена. К ним относятся, прежде всего, различные протоколы ступенчатых нагрузок субмаксимальной интенсивности с последующей экстраполяцией результата на максимум. Основной пример – уже рассмотренная проба PWC170 на велоэргометре. Она позволяет получить показатель мощности при пульсе 170 уд/мин., который затем

может быть использован для расчета предполагаемого МПК. В классическом методе Астранда на велоэргометре (Astrand Rhythmic Test, 1954) испытуемый выполняет 6-минутную ровную нагрузку, доводя ЧСС до 130 – 150 уд/мин., после чего по специальной номограмме Астранда (с поправкой на пол и возраст) определяется его МПК. Метод основан на эмпирически установленной зависимости между нагрузкой, пульсом и МПК у людей разного уровня тренированности [6].

Другой пример – тесты с расчетными уравнениями. Американский колледж спортивной медицины (ACSM) предлагает формулы для прогнозирования МПК по результатам субмаксимального стресс-теста (протокол Брюса и др.), используя скорость и уклон беговой дорожки, а также ЧСС [7]. Однако исследования показывают, что подобные стандартные уравнения могут давать ощутимую погрешность у тренированных спортсменов. Так, при проверке формулы ACSM для бегового протокола Брюса на выборке атлетов (18 – 37 лет) обнаружено, что расчетные значения систематически отличались от реально измеренных МПК. Точность предсказания оказалась недостаточной, если не выполнять индивидуальную калибровку [7]. Иными словами, универсальные формулы, хорошо работающие для среднего населения, плохо учитывают особенности сердечно-сосудистого отклика у высоко тренированных людей.

Полевые тесты на выносливость. Вне лаборатории разработано множество простых испытаний, позволяющих приблизительно оценить аэробные возможности человека. К классическим примерам относится 12-минутный беговой тест Купера: за 12 минут атлет пробегает максимальную дистанцию, по которой затем оценивается МПК по формуле Купера. Корреляция результата теста Купера с лабораторным МПК очень высокая – порядка $r = 0,92$, что делает его одним из лучших полевых предикторов аэробной мощности [8]. Другой распространенный метод – многоступенчатый тест на 20 метров (“shuttle run” тест, «beep test»), где испытуемый бежит отрезки 20 метров в ритме сигнала, ускоряющегося каждую минуту, пока не выдохнется. Достигнутый уровень (количество пробежек) также переводится в оценку МПК [26]. Несмотря на популярность “beep test”, некоторые работы отмечают, что он не всегда надежно предсказывает МПК у отдельных лиц. Тем не менее, в среднем по группе его корреляция с МПК значима (обычно $r \sim 0,85 – 0,90$). Существуют и другие тесты: поднятие на платформу фиксированной высоты в течение 5 минут с заданным темпом, после чего по ЧСС восстановления судят о МПК; тест Рокпорта (быстрая ходьба на 1,6 км с измерением пульса в конце); и пр. Их общее преимущество – простота и массовость применения, а недостаток – большая погрешность для конкретного атлета. Впрочем, для оценки состояния или самоконтроля спортсмена на протяжении времени такие тесты могут быть полезны.

В дополнение к аэробным тестам иногда оценивают и сопутствующие характеристики, например лактатный порог – % МПК, при котором

начинается ускоренное накопление лактата в крови. Лактатный порог лучше коррелирует с уровнем физической работоспособности, чем один лишь МПК, особенно у атлетов с близкими значениями МПК. Поэтому в лабораториях спорта как правило проводят комбинированные тесты: ступенчатая нагрузка с замерами лактата на каждой ступени и параллельной регистрацией VO_2 – это дает полную картину аэробной и анаэробной работоспособности.

Сравнение методов измерения. В таблице обобщены основные подходы к оценке аэробной работоспособности, их особенности, плюсы и минусы.

Как видно, выбор метода зависит от условий и поставленных задач. Если требуется максимальная точность – предпочтителен лабораторный МПК-тест с газоанализом. Для мониторинга прогресса группы спортсменов на протяжении сезона удобны субмаксимальные тесты (PWC170, аэробный порог, беговые нормативы), которые можно проводить чаще и с меньшей нагрузкой на атлета. Полевые тесты полезны для приблизительной оценки функционального состояния вне лаборатории. Косвенные тесты основаны на среднестатистических зависимостях и допущениях (линейность связи пульса и VO_2 , типичная максимальная ЧСС по возрасту и т.д.), поэтому для конкретного спортсмена погрешность может быть существенной. Важно понимать, что выбор метода зависит от задач и контингента. В научных и элитных спортивных условиях приоритет отдают максимально точным данным – особенно в циклических и игровых видах спорта, где основной лимитирующей системой является кардиореспираторная система. Но в массовой практике, фитнесе и скрининге здоровья ключевую роль играют косвенные экспресс-оценки и прогнозные модели. Это создает запрос на совершенствование методов прогнозирования PWC и МПК – от классических регрессионных уравнений до современных алгоритмов машинного обучения. При этом должны быть соблюдены правила единообразия проводимых тестов (стандартизация).

Особенности и ограничения аналитики в спорте высших достижений

Анализ функционального состояния в спорте высших достижений имеет свою специфику. С одной стороны, профессиональные атлеты – это относительно небольшая выборка людей с нетипичными возможностями, и к каждому нужен индивидуальный подход. С другой стороны – у спортсменов высших достижений есть доступ к лучшим ресурсам: тренерам, врачам, научным группам, высокотехнологичным лабораториям. Поэтому в спорте высших достижений широко применяется комплексная спортивная аналитика – сбор и интерпретация множества показателей (физиологических, биохимических, биомеханических) для улучшения результатов. Методы, хорошо работающие на общей популяции или любителях, не

Таблица

Основные методы оценки аэробной работоспособности спортсменов
The main methods of assessing the aerobic performance of athletes

Метод оценки выносливости	Описание и примеры	Преимущества	Ограничения/ минусы
Прямой тест МПК (лабораторный)	Ступенчатый тест до отказа с анализом дыхания. Непосредственно измеряет максимальное потребление O_2	Точность – прямое измерение, эталонный метод, информативность	Тяжел для спортсмена – требует максимального усилия; нужен дорогой аппарат и персонал; противопоказан в некоторых случаях
PWC170 (субмакс. тест)	2 – 3 ступени нагрузки на велоэргометре, расчет мощности при ЧСС=170 уд/мин. Косвенно отражает аэробную работоспособность	Без экстремального напряжения, тест 10 – 15 мин; можно проводить массово; показатель PWC коррелирует с МПК	Нет прямого VO_2 измерения – нужна экстраполяция или эмпирическая формула (погрешность); применим в основном для сравнения в динамике у данного спортсмена
Полевые тесты (беговые и др.)	Купер-тест 12 мин, бег на 1,5 мили, «beep test» 20 м. и пр. – оценка выносливости по дистанции/времени или реакции ЧСС	Простота и доступность – минимальное оборудование, можно тестировать команду сразу; высокая корреляция с МПК у среднего человека ($r=0.9$ для 12-мин бега)	Влияние внешних факторов – погода, покрытие, мотивация; меньшая точность для индивида – доверительные интервалы широкие (± 5 мл/кг·мин и более). Не измеряют физиологические параметры напрямую
Косвенные расчетные методы	Формулы ACSM, номограммы (Астранд), не требующие предельной нагрузки – используют субмакс. ЧСС, время теста и др.	Безопасность и скорость – можно оценить МПК у неподготовленных людей; массовость – пригодны в медосмотрах	Оценочный характер – могут сильно недооценить или переоценить МПК тренированных лиц; требуют стандартизованного протокола, невысокая точность

всегда применимы к спортсменам мирового уровня из-за уникальности последних и высоких требований к точности. Рассмотрим ключевые особенности.

Ограниченный объем данных и статистическая значимость. В спорте высших достижений выборки спортсменов, как правило, невелики. Топ-спортсменов – единицы или десятки в стране. Это затрудняет проведение исследований с большой статистической мощностью: часто выводы делаются на основе наблюдений 8 – 10 атлетов, что снижает уверенность. Кроме того, сами атлеты крайне неоднородны: каждый из них – результат многолетнего многоуровневого отбора, а также уникальной комбинации природных данных и формирования спортоспецифических функциональных систем при долгосрочной адаптации в процессе многолетней подготовки. Поэтому вариативность данных внутри группы элитных спортсменов может быть мала по одним параметрам (например, у всех бегунов МПК >70 мл/кг·мин, разброс невелик), а по другим – напротив, непредсказуема. Модель, натренированная на «средних людях», может не иметь достаточной экстраполяционной способности для профессиональных атлетов. Как пример, формулы прогнозирования времени марафона по МПК и лактатному порогу работают для большинства бегунов-любителей, но у элитных марафонцев (2 часа $\pm$ пару минут) эти формулы могут давать систематическую ошибку, так как не учитывается тактическая составляющая тренированности. Аналогично, оценка МПК по субмакс. ЧСС может давать ошибку, при попытке использовать её для спортсменов топ-уровня: у высоко тренированного сердца удельный ударный объем выше, а пульс при нагрузке ниже – формула может переоценить МПК, если была обучена на обычных людях. Поэтому

тренеры предпочитают прямые измерения или индивидуальные калибровки формул.

Пределы физиологических возможностей. У элитных атлетов многие показатели близки к теоретическим пределам человека. Это порождает эффект плато: например, у хорошо тренированного бегуна на длинные дистанции МПК спустя годы тренировок выходит на плато и более существенно не растет, несмотря на продолжающееся улучшение соревновательных результатов за счет других факторов (техника, тактика, порог, экономика бега). Исследования подтверждают, что у высокотренированных спортсменов улучшение результата зачастую происходит без роста МПК. Это значит, что МПК теряет чувствительность как маркер прогресса: он достигает генетически близкого потолка, а дальше тренировки улучшают специальные качества. Аналогичные процессы могут происходить с показателем PWC: тест PWC170 у олимпийского чемпиона и другого члена сборной команды может быть одинаков, разница будет в нюансах (умение терпеть близко к МПК, стратегия распределения усилий). Таким образом, при работе с элитой спорта нужно помнить, что прогностическая ценность PWC и МПК для результата может снижаться, когда эти показатели достигают очень высоких величин и перестают отражать различия между спортсменами. К этому добавляется возрастной компонент: ключевые физиологические системы, определяющие максимальные мощности, развиваются и достигают пика примерно к 20 – 25 годам. После этого их потенциал остаётся стабильным или постепенно снижается, и именно в этот период решающую роль начинают играть техника, тактика, устойчивость к выдерживанию темпа, распределение усилий.

Влияние специализации и техники. В спорте высших достижений большое значение приобретает специфика вида спорта. Например, сравнивая по МПК представителей разных дисциплин, не всегда можно предсказать их результативность. У биатлониста и лыжника значения МПК могут быть одинаковы, но умение стрелять на фоне нагрузки и технически работать на лыжне – решит успех в биатлоне. В игровых видах спорта (футбол, баскетбол) МПК важен для общего функционального фона, но игрок с чуть более низким МПК может компенсировать это за счет лучшего позиционирования и понимания игры, что позволит ему тратить меньше энергии за матч. То есть результативность в прикладном смысле – многокомпонентна и не сводится только к физической работоспособности. Поэтому аналитические модели, ориентированные только на показатели PWC или МПК, могут не объяснять полностью результативность в спорте.

Этико-правовые ограничения и секретность данных. Данные о спортсменах высших достижений, особенно членах национальных сборных команд, являются конфиденциальными. Национальные команды не публикуют в открытый доступ результаты тестирований своих атлетов, опасаясь раскрыть информацию конкурентам. В итоге, исследователям сложно собирать большие открытые наборы данных именно по элитным атлетам. Большинство открытых исследований проводятся на спортсменах регионального или местного уровня, спортивных школ и т.д. Это ограничивает прогресс научного понимания атлетов именно топ-уровня.

Погрешности и ошибки измерений на высоких уровнях. Чем ближе спортсмен к своему пределу, тем сложнее точно измерить и интерпретировать показатели. Малейшая ошибка или разница в протоколе может исказить выводы. Например, повторность теста МПК у элиты может варьироваться в пределах $\pm 2-3\%$, что в абсолюте (2 – 3 мл/кг) составляет малую величину, но для топ-спортсмена это может быть разница между первым и пятым местом в прогнозе. Поэтому статистическая значимость улучшения должна оцениваться осторожно.

В то же время при создании методов многофакторной оценки состояния спортсменов есть очень важное преимущество. В центрах спортивной медицины сегодня возможно в течение одного дня провести спортсмену целую серию тестов: от лабораторных анализов крови и оценок состава тела до функциональных проб PWC170, определения МПК, лактатного профиля, показателей мощности и т.д. Специализированное оборудование и специалисты позволяют получить полный “портрет” спортсмена в рамках 1 – 2 дней, то есть оценить полностью взаимосвязанные и единовременные показатели атлета на текущий момент.

Таким образом, при оценке функционального состояния спортсменов можно учитывать мировые разработки, основанные на выборках спортсменов любительского уровня, поскольку они обеспечивают

базу с большим количеством данных для настроек и обучения математических моделей. Но при этом физиологические характеристики спортсменов высших достижений, как правило, выходят за пределы референсных значений общей популяции. В связи с чем целесообразно строить отдельные математические модели, учитывающие уникальные особенности высокотренированных организмов.

Методы предсказания показателей PWC и МПК

Статистические исследования

Прежде чем переходить к рассмотрению методов предсказания показателей PWC и МПК, стоит проанализировать существующие статистические данные и описательные исследования. Это позволит понять, какие значения этих метрик характерны для различных категорий – от обычных людей до профессиональных спортсменов, а также как они варьируют в зависимости от пола, возраста, вида спорта и периода подготовки. Рассмотрим основные закономерности, выявленные на сегодняшний день.

Популяционные нормативы. В 2015 г. было опубликовано исследование, основанное на международной базе данных FRIEND (Fitness Registry and Importance of Exercise National Database), куда вошли тысячи результатов нагрузочных тестов [9]. В рамках исследования были рассчитаны нормативные градации МПК для разных полов и возрастов. Так, для мужчин в возрасте 20 – 29 лет и 30-39 лет средними значениями МПК оказались 47,6(11,3) и 43,0 (9,9) соответственно (в скобках указан интервал стандартного отклонения). Для женщин аналогичных возрастных групп средними значениями МПК оказались 37,6 (10,2) и 30,9 (8,0) соответственно.

Аналогично, советскими и российскими учеными (Л. Карпман и др.) были предложены категории оценки PWC170: низкая, средняя, высокая работоспособность – в зависимости от абсолютных и относительных значений теста [5]. Например, для мужчин в возрасте 20 – 29 лет показатель PWC (кгм/мин) был разделён на такие категории: низкая – до 699, ниже средней – от 700 до 849, средняя – от 850 до 1149, выше средней – от 1150 до 1299, высокая – от 1300. Для женщин аналогичные интервалы составляют порядка 2/3 от мужских.

Уровень физической подготовленности. Одним из наиболее важных факторов, влияющих на PWC и МПК, является общий уровень физической подготовленности. У нетренированных людей показатели аэробной работоспособности относительно низки. В пробе PWC170, как указывают нормативные данные, здоровые молодые мужчины, не занимающиеся спортом, имеют PWC170 порядка 115 – 180 Вт, женщины – около 75 – 125 Вт. В пересчете на массу это ~2,5 Вт/кг у мужчин и ~1,7 Вт/кг у женщин [5]. Величина МПК у нетренированных мужчин составляет 35 – 45 мл/кг·мин, у женщин 30 – 35 мл/кг·мин. При переходе к группе физически активных любителей (регулярно

тренирующихся для здоровья) наблюдается существенный прирост. У людей, занимающихся бегом или фитнесом несколько раз в неделю, МПК может достигать 45 – 55 мл/кг·мин (мужчины) и 35 – 45 мл/кг·мин (женщины). Наконец, у высококвалифицированных спортсменов значения возрастают колоссально: у мужчин-спортсменов высшего уровня МПК обычно превышает 60 мл/кг·мин и может доходить до 80 – 85 (в отдельных случаях выше), у женщин-спортсменок – 50 – 70 мл/кг·мин [2]. Аналогично, PWC170 у спортсменов значительно выше: относительные значения порядка 4 – 5 Вт/кг против 1,7 – 2,5 Вт/кг у неспортивных людей. Таким образом, плановость, систематичность, объем и интенсивность физических нагрузок и уровень спортивного мастерства прямо отражаются на PWC и МПК. Интересно отметить, что разрыв между мужчинами и женщинами по аэробным показателям уменьшается на высоком уровне спортивного мастерства. В среднем у женщин МПК на 15-30% ниже, чем у мужчин того же возраста и тренированности. Однако среди элитных спортсменок в видах спорта на выносливость этот разрыв сокращается до ~10% [2]. Эти факты подчеркивают, что организм отлично адаптируется к регулярным аэробным нагрузкам, независимо от пола.

Виды спорта. Классические работы Astrand и Saltin (1960-е) предоставили первые таблицы МПК для разных спортсменов: бегуны на выносливость, лыжники, велосипедисты показали наиболее высокие значения (70-80 мл/кг), пловцы – несколько ниже (около 60 – 70), конькобежцы – примерно на уровне бегунов. Это создало научную базу, подтвердившую, что спортсмены высших достижений в аэробных дисциплинах имеют высокий МПК. Показатели максимальной аэробной производительности сильно разнятся между спортсменами циклических видов спорта и спортсменами с другой направленностью тренировочного процесса. Самые высокие значения МПК фиксируются у атлетов, специализирующихся в циклических видах с длительной нагрузкой – лыжные гонки, бег на длинные дистанции, велоспорт. Известно, что наиболее выдающиеся значения были отмечены именно в этих видах: в литературе приводятся примеры, когда у отдельных чемпионов было зафиксировано значение около 90 – 97 мл/кг·мин потребления кислорода [30]. Эти цифры близки к теоретическим пределам для человека. В противоположность этому, спортсмены игровых и силовых видов спорта демонстрируют более умеренные показатели аэробной выносливости. Например, у футболистов высшего уровня МПК составляет около 54 – 64 мл/кг·мин, у борцов – 50 – 65 мл/кг, у хоккеистов – 50 – 60 мл/кг [2]. Для сравнения, представители скоростно-силовых дисциплин (метатели, тяжелоатлеты) имеют относительно низкие значения – порядка 40-50 мл/кг·мин, поскольку высокая аэробная емкость не является определяющей в их виде деятельности.

В одном из исследований, сравнивающих спортсменок разных специализаций, у бегуний на

длинные дистанции были зафиксированы наибольшие значения PWC170, в то время как гандболистки показали наиболее низкие результаты этого теста. Разница объясняется характером тренировки: бегуни развивают преимущественно аэробную выносливость, тогда как в гандболе больше анаэробной работы и перерывов, поэтому общий уровень аэробной производительности у гандболисток ниже. Данный пример подтверждает, что PWC, как и МПК, во многом определяется требованиями вида спорта и специфической адаптацией организма спортсмена [11].

Сезонный цикл. Если говорить о динамике в рамках тренировочного цикла спортсмена, то и PWC, и МПК у профессионалов не являются постоянными величинами – они изменяются в зависимости от периода подготовки. Как правило, после базового подготовительного периода (с большими объемами аэробной работы) показатели выносливости достигают максимума к началу соревновательного сезона. В ходе самого сезона могут быть колебания: некоторые исследования фиксировали снижение МПК и PWC к концу сезона из-за накопленной усталости или недостатка аэробных тренировок в соревновательном периоде, тогда как повторный цикл с периодом отдыха восстанавливал и улучшал эти параметры. Данные указывают, что за сезон происходит адаптация системы энергообеспечения: к главным стартам организм выходит на пик формы, где PWC и связанные показатели максимально связаны с результативностью. Затем обычно следует разгрузочный период, в котором часть аэробных способностей может снижаться, но это восстановимо при новом цикле тренинга. Статья И.В. Левшина и соавт. (2013) о функциональных состояниях дала теоретический анализ и подчеркнула, что важно отслеживать состояние спортсменов в динамике сезона, так как у них бывают периоды спада – «функциональные ямы» – и подъемы формы [4]. Практический вывод – нужна постоянная оценка PWC (или косвенных показателей) в разные периоды.

Теперь перейдем к исследованиям, связанным с предсказанием показателей МПК и PWC.

Предсказание показателей PWC и МПК

Наиболее многочисленными являются модели предсказания, основанные на трёх видах показателей: антропометрические измерения, субмаксимальные нагрузки и данные с носимых устройств (например, с умных часов).

Например, в работе 2022 года группа ученых предложила прогнозировать МПК по короткому полевому тесту – забегу на 600 м в гору с носимыми датчиками – с помощью нейронной сети [12]. Они собрали данные 18 испытуемых (мужчин и женщин в возрасте от 20 до 39 лет), измерили их фактическую МПК в лаборатории, а затем попытались предсказать МПК по показателям 600-метрового забега (время, отношение скорости к ЧСС, ИМТ и др.). Результат: нейросеть

(многослойный перцептрон) дала коэффициент детерминации $R^2 = 0,94$, со средней ошибкой $\sim 1,6$ мл/кг·мин. Авторы подчеркнули, что их метод позволяет с помощью короткого интенсивного теста и несложных измерений достаточно точно оценить МПК обычного человека без участия эксперта и лаборатории. Другой пример – использование носимых приборов мониторинга физиологических показателей и больших данных. В 2023 году опубликовано исследование, в котором модель машинного обучения обучалась на более чем 3000 записях с «умных» часов (Apple Watch, Garmin): данных о количестве шагов и пульсе для прогнозирования МПК [13]. Участники просто носили устройства во время обычных тренировок, а эталонные МПК были либо измерены непосредственно на части из них, либо оценены алгоритмами устройств. Разработанная модель на основе алгоритмов случайного леса и градиентного бустинга сумела достичь средней ошибки порядка ± 4 мл/кг·мин при прогнозировании МПК. Интересно, что эта модель использовала в качестве входных данных только число шагов и пульс (без сложных акселерометрических сигналов).

Ashfaq et al. (2022) проанализировали более 30 исследований по ML-прогнозированию МПК [14]. Во всех исследованиях использовались различные комбинации базовых (пол, возраст), антропометрических (например, вес и рост) и функциональных (например, максимальный пульс) характеристик. Выяснилось, что во многих работах удавалось достичь очень высокой корреляции между предсказанным и измеренным МПК ($R \sim 0,9$) при умеренной ошибке (порядка 3 мл/кг·мин), используя нейросети, случайные леса и другие алгоритмы. В одном из приведенных примеров алгоритм, обученный на данных носимого датчика (нагрудного ЭКГ-патча), смог оценить МПК с ошибкой около 5%. Такие результаты сопоставимы с точностью субмаксимальных тестов, но без проведения специального упражнения. Т.е. фактически МПК можно оценить по данным обычной активности.

Ещё одно исследование, проведённое в Кембриджском университете (2020 г.), сообщало, что на основе ежедневных данных фитнес-браслета (пульс в покое, реакция пульса на обычную ходьбу, статистика активности) можно алгоритмами машинного обучения спрогнозировать МПК достаточно точно для оценки уровня тренированности [15]. Группа исследователей из Кембриджа разработала модель, использующую сигналы фитнес-трекеров (акселерометра и пульсометра), для оценки уровня МПК без проведения специальных тестов. В крупнейшем на сегодня исследовании такого рода были проанализированы данные более 11000 человек, которые носили датчики в обычной жизни, а для части из них МПК был измерен стандартным лабораторным способом. На основе полученного массива с помощью алгоритмов глубокого обучения (нейронных сетей) была обучена модель, сумевшая предсказывать МПК по комбинации простых

показателей активности и ЧСС. Точность оказалась высокой: разработанная модель практически не уступала по точности непосредственному тесту и превосходила все ранее существовавшие подходы оценки МПК по носимым устройствам. Важно, что алгоритм работает «в фоне» — т.е. оценивает фитнес во время обычной активности (например, прогулок), не требуя выполнения теста до отказа.

Менее многочисленными являются исследования, связанные с предсказанием МПК или PWC по биохимическим маркерам крови. Тем не менее, мы можем делать однозначные выводы о связи некоторых биохимических маркеров с аэробной производительностью для когорты спортсменов-любителей.

Концентрация гемоглобина и гематокрит давно рассматриваются как факторы, влияющие на МПК, поскольку определяют кислородную ёмкость крови. У тренированных лиц более высокие значения гемоглобина обычно сопутствуют большему МПК, хотя корреляция зачастую умеренная. Например, у молодых спортсменов-мужчин выявляются слабopоложительные корреляции МПК с гемоглобином и гематокритом (порядка 0,2 – 0,3) [16]. Наиболее тесной характеристикой является общая масса гемоглобина – интегральный показатель, отражающий суммарное количество гемоглобина в организме (учитывает как концентрацию, так и объём крови). Общее количество гемоглобина считается одним из ограничивающих факторов МПК у взрослых: изменение массы гемоглобина на 1 г приводит к изменению МПК примерно на 4 мл/мин [17]. В литературе отмечено, что корреляция между общей массой гемоглобина и МПК обычно выше, чем между концентрацией гемоглобина или числом эритроцитов и МПК. Тем не менее, в популяциях с разным уровнем гемоглобина наблюдается тенденция: гемоглобин – один из наиболее надёжных лабораторных коррелятов МПК. В недавней работе с лыжниками любителями (мужчины – 38 лет) гемоглобин оказался сильнейшим предиктором МПК: в регрессионной модели его вклад был положительным и статистически значимым ($p < 0,001$) [18]. Фактически, в этой группе вариации концентрации гемоглобина и связанных показателей объясняли до 90 – 94% дисперсии МПК ($R^2 \sim 0,9$) при подборе оптимальных двухфакторных моделей. Хотя столь высокая согласованность показателей частично обусловлена особенностями выборки (относительно однородная группа спортсменов), результат подчёркивает важность гемоглобина: из всех лабораторных переменных именно его концентрация давала наиболее устойчивую положительную связь с МПК. В ещё одном исследовании на 1566 участников было показано, что 40% и 37% изменений МПК объяснялись изменением массы гемоглобина и показателя эритроцитов в крови соответственно [31].

Для синтеза гемоглобина и поддержания выносливости важным является поддержание достаточного уровня железа (для мужчин нижней

границей нормы принято считать значение порядка 11 мкмоль/л, а для женщин – 6,6 мкмоль/л). Даже скрытый дефицит железа (низкие запасы без анемии) способен снизить работоспособность. В исследовании с участием молодых женщин обнаружено, что у спортсменок с истощёнными запасами железа (ферритин <12 мкг/л, без анемии) МПК был статистически ниже, чем у девушек с нормальным железом [19]. Разница в МПК прямо коррелировала с уровнем ферритина и не объяснялась различиями в гемоглобине. Иными словами, даже при нормальном гемоглобине снижение ферритина ассоциируется с ухудшением максимального потребления O_2 , вероятно из-за снижения активности железосодержащих ферментов мышц и общей переносимости нагрузок. Для субмаксимальной работоспособности (PWC170) аналогично показана связь с железо-дефицитными состояниями, особенно у женщин [20]. В выборке спортсменок различных специализаций наивысшие PWC170 и ферритин были у стайеров, а самые низкие – у гандболисток, у которых обнаружили и самые низкие запасы железа. Соответственно, среди женщин показатель PWC170 значимо коррелировал с ферритином ($r \sim 0,4-0,5$).

Концентрация лактата – также один из важных маркеров анаэробного метаболизма при нагрузке. Сам по себе МПК не отражает напрямую лактатный порог, однако более тренированные лица, как правило, имеют более высокий порог и эффективнее утилизируют лактат. Прямая корреляция покоящегося или пикового лактата с МПК не однозначна: у высокотренированных атлетов максимальные лактаты после теста могут быть высокими (потому что они способны развить большую мощность), но в покое у них лактат обычно ниже из-за тренированности. Информативнее изучать элиминацию лактата после нагрузки, так как уровень функционального состояния складывается не только из возможности переносить высокую нагрузку, но и от скорости восстановления. В недавнем исследовании среди хоккеистов любительского уровня МПК значимо коррелировал со скоростью удаления лактата из крови после серии спринтов: коэффициент корреляции $r = 0,545$ ($p < 0,001$) между МПК и снижением лактата за 4–8 минут восстановления [21]. Проще говоря, игроки с более высоким МПК быстрее «очищали» кровь от лактата в перерывах между игровыми отрезками. Одновременно, у них же наблюдалось и лучшее восстановление пульса, и меньшая потеря скорости в повторных спринтах. Эти данные подтверждают, что аэробная подготовленность улучшает как метаболическую, так и вегетативную составляющие восстановления: высокое МПК позволяет эффективнее ресинтезировать креатинфосфат и утилизировать лактат между подходами, что поддерживает работоспособность при повторных нагрузках.

Корреляция уровня кортизола с МПК как таковая редко изучается напрямую, но есть данные по динамике в ходе тренировок. В исследовании,

наблюдавшем женщин-футбольных судей в течение 40-недельного сезона, выявлены значимые обратные связи между изменениями кортизола и выносливости: в моменты сезона, когда МПК девушек был выше, концентрация кортизола была ниже (корреляция отрицательная, $p < 0,0001$) [22]. То есть по мере улучшения их аэробной формы происходило снижение базального кортизола, а во время спада формы – рост кортизола. Это сочетается с концепцией анаболического баланса: у атлетов на пике формы наблюдается более низкий относительный уровень катаболических гормонов (кортизола).

Воспалительные цитокины и острофазовые белки отражают общее состояние здоровья и наличие системного воспаления. Множество исследований подтвердили обратную связь между уровнем хронического воспаления и показателями функционального состояния. К примеру, в популяционных исследованиях у мужчин обнаружено, что повышенные уровни С-реактивного белка (СРБ) и фибриногена независимо ассоциируются с более низким МПК [23]. Даже после поправки на возраст, массу тела и прочие факторы, эта связь сохранялась: мужчины с высоким СРБ показывали худшие результаты теста с потреблением кислорода. Результаты на спортсменах-любителях подтверждают эту тенденцию. В исследовании лыжников-гонщиков любительского уровня одним из двух главных негативных предикторов МПК оказался именно СРБ: в модели множественной регрессии повышение СРБ достоверно связано с более низким МПК ($p < 0,001$) [18]. Одновременно с этим, значимым отрицательным фактором была скорость оседания эритроцитов (СОЭ) – ещё один маркер воспаления. В этой работе у спортсменов с более высоким уровнем системного воспаления выносливость была снижена, несмотря на схожие тренировки. Авторы делают вывод о необходимости мониторинга иммунной системы наряду с гемоглобином, так как даже у атлетов-любителей вялотекущее воспаление может ограничивать аэробную производительность.

Другой перспективный подход – протеомные «прописи» выносливости. В 2022 – 2025 гг. опубликованы исследования, где измеряли сразу сотни и тысячи белков в плазме и искали паттерн, характерный для людей с высоким или низким МПК [24]. В крупном исследовании CARDIA (длительное наблюдение за молодой популяцией) был сформирован интегральный протеомный индекс CRF (cardiorespiratory fitness) на основе 109 плазменных белков, статистически связанных с измеренным МПК. Модель затем валидировали на независимых когортах (~12 тыс. участников). Результат: протеомный индекс коррелировал с МПК лучше, чем традиционные факторы риска, но пока умеренно (коэффициент детерминации – 50%). Проще говоря, зная уровень нескольких десятков белков в крови, можно предсказать МПК с средней точностью – достаточной для эпидемиологических целей, хотя и хуже, чем прямая эргоспирометрия.

Генетические маркеры. Известно, что уровень МПК и особенно прирост МПК примерно на 50% определяются наследственностью [25]. В крупном проекте HERITAGE (1990-е) и последующих исследованиях были выявлены гены-кандидаты, влияющие на аэробную продуктивность. Согласно недавнему систематическому обзору (Williams et al., 2017), по литературным данным обнаружено 97 генов, потенциально связанных с ответом МПК на тренировки. Однако лишь 13 генетических вариантов воспроизведены независимо более чем в двух исследованиях, то есть консенсусных маркеров немного. Примеры часто упоминаемых генов: ACE (ген ангиотензин-превращающего фермента), PPARGC1A (регулятор биогенеза митохондрий), EPAS1 (фактор, связанный с гипоксией), AMPD1, VEGF и др. Наличие «благоприятных» вариантов в этих генах у атлета может означать более высокий исходный МПК или больший прирост от тренировок. Формируется даже понятие «генетического профиля выносливости»: подсчет количества «выносливых» аллелей. Высокий “gene score” коррелирует с лучшей адаптацией (так, Williams et al. отмечают, что у людей из группы “high responders” к тренировкам совокупность «правильных» аллелей встречается чаще). Однако, практическое применение генетического тестирования пока ограничено. Во-первых, предсказательная ценность всё еще низка. Во-вторых, есть этические вопросы - генетический паспорт спортсмена не должен приводить к дискриминации или неверной селекции. Тем не менее, для научных целей продолжает развиваться направление поиска новых генетических детерминант МПК. Недавно, например, в крупном геномном исследовании (GWAS, 2020) на базе биобанков были найдены 28 новых SNP (полиморфизмов), связанных с уровнем МПК у большого числа людей. Два из этих SNP были впоследствии подтверждены в валидационной выборке (женщины из UK Biobank). В исследовании российских учёных с целью выявления маркеров кандидатов гипоксии были найдены три потенциальных микроРНК-маркера: hsa-miR 210-3p, hsa-miR 320a и hsa-miR 935 (повышены у спортсменов в 61,6, 51,8 и 41,0 раза соответственно) [32]. Это говорит о сложной полигенной природе выносливости: множество генов вносят свой маленький вклад, и только суммарно они определяют предрасположенность.

Сравнение математических моделей и алгоритмов для предсказания

Классический подход к предсказанию основан на построении эмпирических формул, связывающих легко измеримые параметры с труднодоступным показателем МПК или PWC. Примеры уже приводились выше: уравнения ACSM для прогноза МПК по субмаксимальной нагрузке и ЧСС, номограмма Астранда для 6-минутного теста на велосипеде, формула Фолкнера (для 1,5-мильного бега). Эти модели обычно представляют собой

множественную линейную регрессию, где независимые переменные – возраст, пол, масса тела, ЧСС или время/дистанция теста. Однако на специфических группах (как спортсмены высших достижений) эти формулы могут работать хуже, если не были обучены на таких данных.

Исследователями были опробованы как классические статистические методы (множественная линейная регрессия), так и более продвинутые алгоритмы: опорные векторы (SVM), градиентный бустинг, нейронные сети (искусственные и глубокие), случайные леса и др. В разных работах модели обучались на комбинациях разнообразных предикторов: антропометрических данных (возраст, масса, ИМТ), показателей субмаксимальных нагрузок (например, скорость бега при определенном пульсе), данных с носимых сенсоров (частота шагов, дневная активность) и даже без нагрузочных параметров (только анкета и покой). Эффективность моделей оценивали по коэффициентам корреляции (R), среднеквадратической ошибке (RMSE) и стандартной ошибке оценки (SEE) между спрогнозированными и истинными значениями МПК.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что нейронные сети и модели глубокого обучения демонстрируют наилучшую точность по сравнению с традиционными методами. В частности, во многих исследованиях модели на основе искусственных нейронных сетей превосходили по точности множественные регрессии и даже алгоритмы типа SVM. Это объясняется способностью нейросетей улавливать сложные нелинейные зависимости между входными параметрами и МПК. Кроме того, отмечено, что решающее значение имеет подбор информативных признаков: от того, какие именно данные используются для обучения (пульс на разных этапах, время теста, характеристики нагрузки и др.), сильно зависит качество прогноза [14].

В системном обзоре Ashfaq et al. (2022), в котором было проанализировано более 30 исследований по ML-прогнозированию МПК, подтвердилось, что наибольшие коэффициенты согласованности были достигнуты в исследованиях, в которых использовались алгоритмы нейронных сетей и опорных векторов SVM [14]. При этом алгоритмы случайных лесов также показывали высокую корреляцию, на уровне 0,87.

Пробелы в исследованиях PWC и МПК: чего мы еще не знаем

Несмотря на большое количество работ, посвященных PWC и МПК, в научной литературе остаются области, изученные недостаточно. Выделим некоторые аспекты, по которым в настоящий момент отсутствуют, либо крайне ограничены сведения.

Взаимосвязи показателей работоспособности с другими биохимическими маркерами. Как было описано выше, аэробные возможности организма должны коррелировать с определенными параметрами крови – например, с количеством

гемоглобина и эритроцитов. Однако в организме есть ряд других биохимических маркеров, связи которых с показателями МПК и PWC могут быть не очевидны, но тем не менее статистически значимыми. В особенности это касается показателя PWC170: в литературе практически не описано, как он соотносится с анализами крови, биохимией и другими лабораторными данными у спортсменов.

Связь показателей работоспособности с психологическими факторами. Большинство имеющихся исследований связывают аэробные возможности лишь с функциональными, лабораторными и антропометрическими показателями организма атлетов. Однако очевидно, что выносливость – лишь одна из сторон подготовки спортсмена. Интересно было бы исследовать, например, взаимосвязь между аэробной работоспособностью и психическими факторами. Отдельные эксперименты указывают, что более выносливые атлеты показывают и лучшие результаты в тестах на концентрацию, память и скорость мышления, особенно в пиковом соревновательном периоде. Но таких данных недостаточно, чтобы сделать широкие выводы – тут требуется больше исследований на разных выборках.

Отсутствие продольных (многолетних) наблюдений. Многие данные по PWC и МПК носят срезовой характер (замеры у разных людей в один момент). При этом практически нет больших лонгитюдных исследований, которые проследили бы изменение этих показателей у одних и тех же спортсменов на протяжении карьеры – например, с юниорского возраста до зрелого мастерства. Такие работы ценны для понимания, как именно тренировки влияют на выносливость в долгосрочной перспективе, когда наступает “потолок” и как быстро показатели падают после выхода на пенсию. Единичные данные показывают, что пик МПК у большинства атлетов приходится на 20 – 30 лет, после чего идет постепенное снижение, но точные траектории вариативны. Особенно интересно для изучения поиск изменений в организме атлета, при ухудшении или улучшении показателей работоспособности (например, уменьшение уровня гемоглобина у одного и того же спортсмена, сопровождаемое снижением показателей МПК или PWC).

Исследования на атлетах высших достижений. Пожалуй, самая острая проблема для аналитики и предсказания показателей МПК и PWC у атлетов высших достижений – это крайне маленькое количество исследований, проведенных именно на спортсменах топ-уровня. Подавляющее большинство исследований, упомянутых в предыдущих главах, были проведены на спортсменах-любителях. При этом профессиональные спортсмены сильно отличаются от среднестатистических людей, и математические модели, работающие на общей популяции, могут быть неточны при анализе спортсменов самого высокого уровня. Существующие же исследования на спортсменах высших достижений проведены на

маленьких выборках (порой, менее 20 человек). Это, с одной стороны, вызывает сомнения в статистической значимости проведенных исследований. С другой стороны, не позволяет найти менее сильные, но тем не менее существующие корреляции.

Расширение списка видов спорта. Проведенные на данный момент исследования как правило затрагивают представителей наиболее распространенных видов спорта: хоккей, футбол, бег, лыжные гонки. Однако интересным представляется также изучение более специфичных видов спорта (например, фехтования) для поиска закономерностей и в них.

Сравнение значимости признаков между собой. В проведенных на данный момент исследованиях алгоритм действия как правило такой: выбирается 5-10 признаков, по которым будет обучаться модель, а затем рассчитывается точность полученного алгоритма. При этом выбираемые признаки принадлежат одной, максимум двум, группам (антропометрия, биохимия, функциональные показатели). Однако было бы интересно сравнить всевозможные маркеры между собой и выяснить, какие из них действительно лучше других помогают в предсказании МПК и PWC. Для этого необходимо исследование, в рамках которого у испытуемых будет одновременно регистрироваться множество параметров и на них будет обучаться математическая модель. Затем специальными алгоритмами (например, SHAP – SHapley Additive exPlanations) будет найден итоговый вклад каждого признака в предсказательную способность модели.

Заключение

Показатели физической работоспособности и максимального потребления кислорода продолжают оставаться фундаментальными параметрами для оценки функционального состояния спортсменов. Их значение выходит далеко за рамки сугубо физиологического интереса – эти метрики непосредственно связаны с уровнем подготовки, индивидуальными адаптациями и прогнозом спортивного результата. Однако прямое измерение этих показателей сопряжено с методологическими и организационными трудностями, что стимулирует активное развитие косвенных и предиктивных методов.

Развитие таких областей как анализ больших данных и разработка алгоритмов искусственного интеллекта в спортивной медицине открывает новые перспективы. Становится возможным предсказывать значения PWC и МПК на основе лабораторных, биохимических и антропометрических данных. Тем не менее, ряд вопросов остаётся нерешённым. В частности, недостаточное число исследований, изучающих когорты именно атлетов высших достижений. В будущем особое внимание следует уделить интеграции многофакторных данных и специализации проводимых исследований на атлетах элитного уровня.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ/REFERENCES

1. Кондратьева А.А. Понятие и методологические возможности оценки физического и функционального состояния организма // Вестник науки. 2023. Т.4. №3. Ст.30 [Kondrat'yeva A.A. Concept and Methodological Possibilities of Assessing the Physical and Functional State of the Body. *Vestnik Nauki* = Bulletin of Science. 2023;4;3:30 (In Russ.)].
2. Карпман В.Л., Белоцерковский З.Б., Гудков И.А. Тестирование в спортивной медицине. М.: Физкультура и спорт, 1988. 208 с. (Наука – спорту. Спортивная медицина) [Karpman V.L., Belotserkovskiy Z.B., Gudkov I.A. *Testirovaniye v Sportivnoy Meditsine* = Testing in Sports Medicine. Moscow, Fizkul'tura i Sport Publ., 1988. 208 p. (Nauka – Sportu. Sportivnaya Meditsina). (In Russ.)]. ISBN 5-278-00004-X.
3. Исайчев С.А., Черноризов А.М., Королев А.Д. и др. Психофизиологическая диагностика функционального состояния спортсмена. Предварительные данные // Психология и психофизиология. 2012. Т.5. №2. С. 149-169 [Isaychev S.A., Chernorizov A.M., Korolev A.D., et al. Psychophysiological Diagnostics of the Functional State of an Athlete. Preliminary Data. *Psikhologiya i Psikhofiziologiya*. = Psychology and Psychophysiology. 2012;5;2:149-169 (In Russ.)]. Doi: 10.11621/pir.2012.0015.
4. Левшин И.В., Солодков А.С., Макаров Ю.М., Поликарпочкин А.Н. Функциональные состояния в спорте // Теория и практика физической культуры. 2013. №6. С. 71-75 [Levshin I.V., Solodkov A.S., Makarov Y.U.M., Polikarpochkin A.N. Functional States in Sports. *Teoriya i Praktika Fizicheskoy Kul'tury* = Theory and Practice of Physical Education. 2013;6:71-75 (In Russ.)].
5. Гридин Л.А., Ихалайнен А.А. и др. Методы исследования и фармакологической коррекции физической работоспособности человека / Под ред. И.Б.Ушакова. М.: Медицина, 2007. 104 с. [Gridin L.A., Ikhalaaynen A.A., et al. *Metody Issledovaniya i Farmakologicheskoy Korrektsii Fizicheskoy Rabotosposobnosti Cheloveka* = Methods of Research and Pharmacological Correction of Human Physical Performance. Ed. I.B.Ushakov. Moscow, Meditsina Publ., 2007. 104 p. (In Russ.)].
6. Waggoner J., Pujol T., Langenfeld M., Sinclair A., Tucker J., Elder C. A Workload Selection Procedure for the Åstrand-Rhyming Test. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2003;35;5:S257. Doi: 10.1097/00005768-200305001-01431.
7. Foster C., Jackson A.S., Pollock M.L., Taylor M.M., Hare J., Sennett S.M., Rod J.L., Sarwar M., Schmidt D.H. Generalized Equations for Predicting Functional Capacity from Treadmill Performance. *American Heart Journal*. 1984;107;6:1229-1234. Doi: 10.1016/0002-8703(84)90282-5.
8. Grant S., Corbett K., Amjad A.M., Wilson J., Aitchison T. A Comparison of Methods of Predicting Maximum Oxygen Uptake. *British Journal of Sports Medicine*. 1995;29;3:147-152. Doi: 10.1136/bjbm.29.3.147.
9. Kaminsky L.A., Myers J. Reference Standards for Cardiorespiratory Fitness Measured with Cardiopulmonary Exercise Testing: Data from the Fitness Registry and the Importance of Exercise National Database. *Mayo Clinic Proceedings*. 2015;90;11:1515-1523. Doi: 10.1016/j.mayocp.2015.07.026.
10. Зацiorsкий В.М. Физические качества спортсмена. М.: Физкультура и спорт, 1982. 256 с. [Zatsiorskiy V.M. *Fizicheskiye Kachestva Sportsmena* = Physical Qualities of an Athlete. Moscow, Fizkul'tura i Sport Publ., 1982. 256 p. (In Russ.)].
11. Куртев С.Г., Кузнецова И.А., Еремеев С.И., Лазарева Л.А. Руководство к практическим занятиям по курсу спортивной медицины: Учебно-методическое пособие. Омск: СибГУФК, 2009. 152 с. [Kurtev S.G., Kuznetsova I.A., Yeremeyev S.I., Lazareva L.A. *Rukovodstvo k Prakticheskim Zanyatiyam po Kursu Sportivnoy Meditsiny* = Guide to Practical Classes in Sports Medicine. A Tutorial. Omsk, Sibirskiy Gosudarstvennyy Universitet Fizicheskoy Kul'tury i Sporta Publ., 2009. 152 p. (In Russ.)].
12. Stoican K., Oeschger R. 600 Meters to VO2max: Predicting Cardiorespiratory Fitness with an Uphill Run. Abstract book of the 2nd Congress of International Students' Sports Science. 2025. Doi: 10.36950/2025.2ciss024.
13. Neshitov A., Tyapochkin K., Kovaleva M., et al. Estimation of Cardiorespiratory Fitness Using Heart Rate and Step Count Data. *Scientific Reports*. 2023;13:15784. Doi: 10.1038/s41598-023-43024-x.
14. Ashfaq A., Cronin N., Müller P. Recent Advances in Machine Learning for Maximal Oxygen Uptake (VO2 max) Prediction: a Review. *Informatics in Medicine Unlocked*. 2022;29:100863. Doi: 10.1016/j.imu.2022.100863.
15. Spathis D., Perez-Pozuelo I., Gonzales T.I., et al. Longitudinal Cardio-Respiratory Fitness Prediction through Wearables in Free-Living Environments. *npj Digital Medicine*. 2022;5:177. Doi: 10.1038/s41746-022-00719-1.
16. Pluncevic Gligoroska J., Dejanova S., Playsic J., Manchevska S. Correlations between Red Blood Cells' Variables, Cardio-Physiological and Anthropological Variables in Young Athletes. *Contributions, Sec. Biol. Med. Sci.* 2020;41;1:63-76. UDC: 612.1:572.087.1-053.5/.6(497.7)
17. Mancera-Soto E.M., Ramos-Caballero D.M., Rojas J.A., Duque L., Chaves-Gomez S., Cristancho-Mejia E., Schmidt W.F.-J. Hemoglobin Mass, Blood Volume and VO2max of Trained and Untrained Children and Adolescents Living at Different Altitudes. *Frontiers in Physiology*. 2022;13:892247. Doi: 10.3389/fphys.2022.892247.
18. Grzebisz N. The Relationship between Inflammatory Factors, Hemoglobin, and VO2 Max in Male Amateur Long-Distance Cross-Country Skiers in the Preparation Period. *Journal of Clinical Medicine*. 2024;13;20:6122. Doi: 10.3390/jcm13206122.
19. Zhu Y.L., Haas J.D. Iron Depletion without Anemia and Physical Performance in Young Women. *American Journal of Clinical Nutrition*. 1997;66;2:334-341. Doi: 10.1093/ajcn/66.2.334.
20. Karamizrak S.O., İşlegen Ç., Varol S.R., Taşkiran Y., Yaman Ç., Mutaf I., Akgün N. Evaluation of Iron Metabolism Indices and Their Relation with Physical Work Capacity in Athletes. *British Journal of Sports Medicine*. 1996;30;1:15-19. Doi: 10.1136/bjbm.30.1.15.
21. Tomlin D.L., Wenger H.A. The Relationship between Aerobic Fitness and Recovery from High Intensity Intermittent Exercise. *Sports Medicine*. 2001;31;1:1-11. Doi: 10.2165/00007256-200131010-00001.
22. Muscella A., My G. Effects of Training on Plasmatic Cortisol and Testosterone in Football Female Referees. *Physiological Reports*. 2022;10;8:e15291. Doi: 10.14814/phy2.15291.
23. Kullo I.J., Khaleghi M., Hensrud D.D. Markers of Inflammation are Inversely Associated with VO2 Max in Asymptomatic Men. *Journal of Applied Physiology*. 2007;102;6:2164-2170. Doi: 10.1152/japplphysiol.01028.2006.
24. Robbins J.M., Peterson B., Schraner D., Tahir U.A., Rienmüller T., Deng S., Gerszten R.E., et al. Human Plasma Proteomic Profiles Indicative of Cardiorespiratory Fitness. *Nature Metabolism*. 2021;3;6:786-797. Doi: 10.1038/s42255-021-00400-z.
25. Williams C.J., Williams M.G., Eynon N., et al. Genes to Predict VO2max Trainability: a Systematic Review. *BMC Genomics*. 2017;18;8:831. Doi: 10.1186/s12864-017-4192-6.
26. Léger L.A., Lambert J. A Maximal multistage 20-m Shuttle Run Test to Predict VO2 Max. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*. 1982;49;1:1-12. Doi: 10.1007/BF00428958.
27. Andersen K.L., Shephard R.J., Denolin H., et al. Fundamentals of Exercise Testing. Geneva, World Health Organization, 1971.
28. Saltin B., Åstrand P.-O. Maximal Oxygen Uptake in Athletes. *Journal of Applied Physiology*. 1967;23;3:353-358. Doi: 10.1152/jappl.1967.23.3.353.
29. Дембо А.Г., Попов С.Н., Тесленко Ж.А., Шанкайтс Ю.М. Спортивная медицина. Общая патология, врачебный контроль с основами частной патологии: Учебник для студентов институтов физической культуры. М.: Физкультура и спорт, 1975. 368 с. [Dembo A.G., Popov S.N., Teslenko Zh.A., Shapkaits Yu.M. *Sportivnaya Meditsina. Obshchaya Patologiya, Vrachebnyy Kontrol' s Osnovami*

- Chastnoy Patologii* = Sports Medicine. General Pathology, Medical Supervision with the Basics of Specific Pathology. A Textbook for Students of Physical Education Institutes. Moscow, Fizkul'tura i Sport Publ., 1975. 368 p. (In Russ.).
30. Rønnestad B.R., Hansen J., Stensløkken L., Joyner M.J., Lundby C. Case Studies in Physiology: Temporal Changes in Determinants of Aerobic Performance in Individual Go. *Journal of Applied Physiology*. 2019;127;2:306-311. Doi: 10.1152/jappphysiol.00798.2018
31. Lundgren K.M., Aspvik N.P., Langlo K.A.R., Braaten T., Wisløff U., Stensvold D., Karlsen T. Blood Volume, Hemoglobin Mass, and Peak Oxygen Uptake in Older Adults: The Generation 100 Study. *Frontiers in Sports and Active Living*. 2021;3:638139. Doi: 10.3389/fspor.2021.638139
32. Пронина И.В., Постников П.В., Павлов В.И., Орджоникидзе З.Г. Сравнение профилей экспрессии микроРНК атлетов, выступающих в видах спорта, ориентированных на выносливость, и добровольцев, не занимающихся спортом, с использованием панели сигнального пути гипоксии // *Спортивная медицина: наука и практика*. 2022. Т.12. №2. С. 13-21 [Pronina I.V., Postnikov P.V., Pavlov V.I., Ordzhonikidze Z.G. Comparison of microRNA Expression Profiles of Athletes Competing in Endurance Sports and Non-Athletes Using a Hypoxia Signaling Pathway Panel. *Sportivnaya Meditsina: Nauka i Praktika*. = Sports Medicine: Research and Practice. 2022;12;2:13-21 (In Russ.)]. Doi: 10.47529/2223-2524.2022.2.10.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 13.03.2026. Принята к публикации: 15.14.2026.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 3.03.2026. Accepted for publication: 15.14.2026