

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт физической культуры, спорта и туризма
Кафедра теории и методики спортивных дисциплин

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ А.Ю. Близневский

« _____ » _____ 2024 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ ПОРОГОВ У БЕГУНОВ-СТАЙЕРОВ

49.04.01 Физическая культура

49.04.01.04 Спорт высших достижений в избранном виде спорта

Руководитель	_____	доцент, канд. пед. наук	А.И. Чикуров
Выпускник	_____		Т.С. Спирин
Рецензент	_____	доцент, канд. пед. наук	С.С. Ситничук
Нормоконтроль	_____		М.В. Думчева

Красноярск 2024

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Модифицированный графический метод определения метаболических порогов у бегунов-стайеров» выполнена на 59 страницах, содержит 23 рисунка, 11 таблиц, 5 формул и 86 ссылок на использованные источники.

Ключевые слова: АНАЭРОБНЫЙ ПОРОГ, АЭРОБНЫЙ ПОРОГ, ПОРОГ АНАЭРОБНОГО ОБМЕНА, ПОРОГ АЭРОБНОГО ОБМЕНА, ПАНО.

Объект исследования: методы определения показателей аэробной выносливости.

Предмет исследования: неинвазивные методы определения метаболических порогов у бегунов-стайеров.

Цель исследования: разработать и обосновать тестовый протокол, не требующий использования газометрического оборудования или инвазивных процедур, для определения показателей аэробной выносливости и границ зон интенсивности различных видов тренировок у бегунов-стайеров.

В работе использованы следующие методы исследования: систематический обзор с количественным синтезом; практический метод (эксперимент); методы математической статистики (коэффициент корреляции Спирмена, статистическая значимость различий Манна-Уитни).

По результатам проведённого исследования можно сделать вывод, что разработанный нами модифицированный графический метод определения метаболических порогов позволяет неинвазивно определить уровень аэробного и анаэробного порога у бегунов-стайеров. Таким образом, по результатам однократного максимального теста можно определить границы зон интенсивности различных видов тренировок у бегунов-стайеров. Показатели скорости бега, ЧСС и концентрации лактата на метаболических порогах по предлагаемому и лактатным методам сильно коррелируют между собой. При этом, возможные отклонения от лактатных методов по показателю скорости бега в 95% случаев составляют от -1,39 до 1,15 км/ч и -1,54 и 0,46 км/ч для аэробного и анаэробного порогов, соответственно.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Общие сведения	5
1.1 Общие сведения о аэробных тестах	5
1.2 Классификация видов аэробных тестов	7
1.3 Показатели аэробной выносливости.....	12
1.4 Лактатные пороги.....	18
1.5 Неинвазивные методы определения метаболических порогов	26
1.6 Зоны интенсивности нагрузки	31
2 Организация и методы исследования	35
2.1 Выбор лактатного метода определения анаэробного порога	35
2.2 Выбор наиболее информативного метода определения анаэробного порога, основанного на измерении сердечного ритма	36
2.3 Модифицированный графический метод определения метаболических порогов	38
3 Результаты исследования и обсуждение	39
3.1 Оптимальный метод определения лактатного анаэробного порога..	39
3.2 Наиболее информативный метод определения анаэробного порога, основанный на измерении сердечного ритма	41
3.3 Обоснование модифицированного графического метода определения метаболических порогов.....	43
3.4 Обсуждение результатов исследования	46
3.5 Ограничения и дальнейшие направления исследований	49
Заключение	51
Список сокращений.....	52
Список использованных источников	53

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы: для бегунов-стайеров ведущим физическим качеством является выносливость, которая определяется, как способность работать не утомляясь и противостоять утомлению, когда оно возникает в процессе работы [8].

Процесс спортивной подготовки бегунов-стайеров включает в себя не только различные средства и методы спортивной подготовки, но и методы определения показателей аэробной выносливости [21].

В настоящее время нагрузочные тестирования, выполняющиеся в специализированных лабораториях, служат для управления и повышения эффективности тренировочного процесса, являясь одним из инструментов тренера [81]. Благодаря регулярным тестированиям тренер может понимать, по каким компонентам подготовленности спортсмен лидирует, а по каким отстаёт от средних значений данных показателей среди спортсменов данной специализации [15]. Исходя из этого можно индивидуализировать тренировочный план, увеличивая объём тренировок, направленных на развитие отстающих способностей, если это необходимо.

Тестирования, используемые в спортивной подготовке бегунов-стайеров, разделяются на стандартизированные лабораторные и полевые, выполняющиеся в месте проведения тренировок. Полевые тестирования позволяют оценить производительность спортсменов в текущий момент времени в специфических условиях. Однако, результат полевых тестирований может сильно зависеть от внешних условий (погода, состояние трассы и пр.) в момент тестирования. Лабораторные тестирования выполняются в стандартных условиях, что позволяет корректно оценить динамику показателей. Однако, не всегда лабораторные тестирования могут точно отразить специфику вида спорта [21].

Многочисленными исследованиями установлено, что существует сильная взаимосвязь спортивной результативности бегунов-стайеров с физиологическими показателями выносливости [5, 8, 21, 42, 51, 66].

Проблема исследования: существующие протоколы нагрузочных тестов, предназначенные для определения показателей аэробной выносливости, использующиеся в специализированных лабораториях, требуют дорогостоящего, сложного в эксплуатации и обслуживании газометрического оборудования, либо проведения инвазивных процедур. По данной причине газометрические и лактат-тесты не нашли широкого применения в практике спортивной подготовки бегунов-стайеров. Популярный неинвазивный тест Конкони, описанный в учебной и научной литературе, не всегда воспроизводится, результат в этом тесте зависит от субъективного мнения исследователя [24, 31, 46].

Гипотеза исследования: мы предполагаем, что возможна модификация одного из существующих методов определения показателей аэробной выносливости с целью разработки более информативного неинвазивного метода, не требующего газометрического оборудования.

Объект исследования: методы определения показателей аэробной выносливости.

Предмет исследования: неинвазивные методы определения метаболических порогов у бегунов-стайеров.

Цель исследования: разработать и обосновать тестовый протокол, не требующий использования газометрического оборудования или инвазивных процедур, для определения показателей аэробной выносливости и границ зон интенсивности различных видов тренировок у бегунов-стайеров.

Задачи исследования:

1. Выбрать лактатный метод определения показателей аэробной выносливости, доступный для экспериментального исследования.

2. Выбрать наиболее информативный метод из нескольких неинвазивных методов определения показателей аэробной выносливости.

3. На основании экспериментального исследования обосновать модификацию выбранного метода с целью расширения его возможностей.

Личный вклад автора: выполнение обзора инвазивных методов определения анаэробного порога с количественным синтезом (мета-анализом); выполнение 18-ти максимальных ступенчатых тестов с анализом капиллярной крови на лактат; обработка результатов тестирований с использованием методов математической статистики; модификация графического метода с целью определения метаболических порогов.

Публикации: основные результаты исследований изложены в 3-х публикациях в научных журналах, входящих в список ВАК по специальности 5.8.5 «Теория и методика спорта».

1 Общие сведения

1.1 Общие сведения о аэробных тестах

Тестирование аэробных способностей спортсмена основано на входном воздействии на организм испытуемого физической нагрузки, форма которой должна быть специфичной виду спорта. В некоторых случаях производится измерение физиологических показателей реакции организма на физическую нагрузку. Время выполнения аэробных тестов должно быть достаточным для “вработывания” и разворачивания аэробного энергопроцесса. Известно, что кислородтранспортные механизмы имеют инертность [3]. Выход на режим работы с максимальной аэробной мощностью может занимать 3-4 минуты, высококвалифицированные спортсмены могут сократить это время до 1 минуты [16].

В спортивной физиологии для измерения объёма выполненной внешней механической *работы* человеком используется подход, принятый в физике: *работа* равна произведению силы (измеряется в Ньютонах) на перемещение, вызванное этой силой (метры) [15, с. 27]. Единицей измерения работы принят Джоуль (1 Дж=1 Н·м). Скорость выполнения работы, которую можно

определить, как отношение выполненной работы ко времени её выполнения (Дж/с, в физике именуется Ватт, или сокращенно Вт), принято называть *мощность*. До сих пор в литературе можно встретить использование несистемных единиц измерения работы и мощности, а именно кг·м как единица измерения работы (1 кг·м = 9,8 Дж), и кг·м/мин как единица измерения мощности (1 кг·м/мин=0,16 Вт).

Rodolfo Margaria первым предложил для описания работоспособности человека использовать подход, принятый в технике: энергосистема может быть описана критериями мощности, ёмкости и эффективности [57].

Внешнюю работу, выполненную человеком, можно измерить при помощи эргометрических устройств, наиболее распространённым из которых является велоэргометр. В научных исследованиях зачастую используют механический велоэргометр типа “Монарк”, в котором сопротивление задаётся установкой грузов, которые создают пропорционально своему весу силу трения на маховике (см. рис. 1). Подобная конструкция позволяет достаточно точно измерять механическую работу и мощность, однако, имеются технические особенности, связанные с учётом инерции маховика.



Рисунок 1 – Велоэргометр Monark Ergonomic 894E Peak Bike

При тестировании бегунов наиболее информативно использовать специфичный тест, а именно тестирование на беговой дорожке (тредбан, калька с немецкого языка). В связи со сложностью непосредственного измерения работы в беге, принято использовать величины, пропорциональные работе и мощности – дистанция бега (км) и скорость (км/ч), соответственно. В последнее время появились датчики мощности Stryd, которые можно закрепить на беговой обуви [83]. По данным современных исследований, “критическая мощность” определяемая датчиком Stryd, ассоциирована со вторым вентиляционным порогом, началом накопления лактата в крови и хорошо коррелирует с данными соревнований [39].

Ввиду наличия технических сложностей, вызванных перемещением тела в пространстве и непредсказуемостью погодных условий, в физиологических исследованиях, как правило, используют тредбан, а не беговой тест по стадиону или в манеже. Для компенсации отсутствия сопротивления воздуха устанавливается уклон бегового полотна 1%. Потребление кислорода при беге с заданной скоростью в уклон 1% не имеет статистически значимой разницы с потреблением кислорода при беге по манежу на соответствующих скоростях [49].

1.2 Классификация видов аэробных тестов

По мнению В. Д. Сонькина и Р.В. Тамбовцевой [22, с. 232], в настоящее время можно выделить три подхода к исследованию работоспособности человека: физиологический, энергетический и эргометрический.

Физиологический подход базируется на измерении реакции физиологических показателей организма (например, ЧСС, параметры внешнего дыхания, концентрация лактата в капиллярной крови (далее La)) на физическую нагрузку. Классическим представителем такого рода тестов является тест на определение максимального потребления кислорода (МПК). Как правило, при росте мощности нагрузки физиологические показатели растут до определённого предела, иначе говоря, “потолка”. Важно отметить, что в настоящее время без проведения прямого измерения надёжно предсказать с достаточной для тренировочной практики точностью уровень потолка по ЧСС, вентиляции лёгких, потреблению кислорода (ПК), La в индивидуальных случаях *невозможно* [22].

Энергетический подход базируется на концепции R. Margaria [57] о наличии трёх источников энергии для мышечной деятельности: алактатного (креатинфосфатного), лактатного (лактаcidного, гликолитического) и аэробного. Для описания характеристик каждого из этих источников используются показатели мощности, ёмкости и эффективности.

Мощность энергетического источника – количество выполненной работы в единицу времени за счёт определённого источника энергии. Ёмкость – суммарный объём работы, который можно выполнить за счёт энергоисточника. Эффективность – отношение выполненной внешней работы ко внутренней

(биохимической) работе организма (иначе говоря, коэффициент полезного действия энергоисточника).

Наиболее подробно энергетический подход развит в работах Н. И. Волкова, который предложил батарею из 5 тестов для наиболее полного описания работоспособности спортсмена: 1) тест ступенчатого повышения нагрузки (определение максимальной аэробной мощности, аэробной эффективности); 2) тест удержания критической мощности (определение аэробной ёмкости); 3) тест однократной предельной работы, иначе говоря, Wingate тест 30 с (определение максимальной мощности лактатного энергопроцесса, а также ёмкости алактатной энергосистемы); 4) тест повторной предельной работы, 3 раза по 1 минуте предельной работы через пассивный отдых 1 минута (определение ёмкости лактатного энергопроцесса); 5) тест максимальной анаэробной мощности, максимальная работа за предельное время 10 с (максимальная мощность алактатной энергосистемы) [8].

Эргометрический подход основан на прямых измерениях выполненной внешней работы и мощности без регистрации каких-либо физиологических параметров. В настоящее время набрала широкую популярность концепция критической мощности (скорости), которая является представителем этого вида тестов [4, 45, 73]. Подробнее о данной концепции см. в подразделе 1.3 настоящей работы.

Другим популярным способом классифицировать тесты аэробных возможностей является критерий достижения испытуемым максимальной степени утомления в тесте. По этому признаку тесты можно разделить на *максимальные* (в которых достигается максимальная степень утомления и отказ испытуемого от продолжения теста) и *субмаксимальные* тесты (в данных тестах испытуемый не достигает максимальной степени утомления, тестирование прекращается при достижении какого-то заранее заданного критерия прекращения теста, например, определённого значения ЧСС или выполнения определённого объёма работы).

При достаточной мотивации испытуемых, максимальные тесты наиболее информативны и позволяют напрямую сравнить работоспособность у различных испытуемых между собой. При условии выполнения работы в одинаковых условиях (температура, влажность, тип нагрузочного устройства, протокол повышения нагрузки) испытуемый, который выполнил больший объём работы до отказа от продолжения теста является более работоспособным в данной форме нагрузки и в заданных временных рамках, определяемых протоколом теста. Например, при выполнении тестов со ступенчато повышающейся нагрузкой на беговом тредбане, обнаружена очень сильная корреляция ($r > 0,9$) между пиковой скоростью бега $v_{\text{пик}}$ в тесте (пропорциональна времени ступенчатого теста и, соответственно, объёму выполненной работы) и результатом соревнований в беге на длинных дистанциях [26, 66].

В некоторых случаях нежелательно использование максимальной нагрузки по различным причинам, либо исследователь не уверен в том, что испытуемый выполнит задание до пределов возможностей. В этих случаях можно

использовать субмаксимальные тесты. Выполнение таких тестов прекращается по критерию достижения заданного уровня физиологического параметра (например, ЧСС или субъективного уровня воспринимаемой нагрузки RPE) или при выполнении определённого объёма работы (тесты с дозированной физической нагрузкой).

Вероятно, наиболее популярным субмаксимальным тестом является тест PWC_{170} , который входит в программу углубленного медицинского осмотра (УМО) [1]. Данный тест появился в 1947 году и изначально обозначался как проба Sjöstrand [10, с. 75]. В российской научной периодике ежегодно публикуется множество исследований, в которых показаны результаты теста PWC_{170} по причине того, что данный тест входит в программу углубленного медицинского осмотра (УМО). С течением времени изначальную громоздкую процедуру проведения теста от автора Т. Sjöstrand модифицировали и в настоящее время тест занимает небольшое количество времени (9 минут) [14, с. 192]. Это делает его удобным для массового тестирования. Методика теста заключается в определении прямым или расчётным путём (при помощи линейной аппроксимации) мощности нагрузки, при которой ЧСС достигает значения 170 уд/мин (например, значение PWC_{170} 200 Вт).

Важнейшим достоинством теста PWC_{170} является субмаксимальный характер теста, не требующего максимальных волевых усилий от испытуемых, а также небольшое и *предсказуемое* количество времени, требующееся на тестирование. Недостатком является сниженная информативность теста по сравнению с максимальными тестами. Это связано с отличающимся уровнем ЧСС_{пик} у различных испытуемых (различия достигают 20 уд/мин и более), даже при условии, что они одного возраста. Исследователь не может со *100% уверенностью* сказать, что если у спортсмена А результат в тесте PWC_{170} больше, чем у спортсмена Б, то спортсмен А имеют большую аэробную работоспособность. Исследования 70-80-х годов показывают, существует тесная взаимосвязь между показателем PWC_{170} и МПК ($r=0,7-0,9$) [10, с. 76]. Однако, это не позволяет предсказать уровень МПК по значению PWC_{170} с достаточной для спортсменов высокого уровня точностью.

С некоторым допущением, на наш взгляд, корректно сравнивать работоспособность одного и того же испытуемого по тесту PWC_{170} в различные моменты времени. Например, если результат в тесте на велоэргометре PWC_{170} за полгода вырос с 200 до 230 Вт, то можно утверждать, что аэробная работоспособность конкретного испытуемого выросла.

Следующий класс тестов аэробных способностей – тесты с дозированной нагрузкой, в которых испытуемым предлагается выполнение физической нагрузки, строго дозированной по объёму выполняемой механической работы. Как правило, данные тесты должны являться разновидностью субмаксимальных тестов, однако, в редких случаях, по причине крайне низкой работоспособности испытуемого, данные тесты могут носить максимальный характер. Поэтому данные тесты выделяются в отдельную разновидность [14].

Наиболее известным тестом с дозированной физической нагрузкой является проба Летунова, в которой измеряется реакция сердечно-сосудистой системы на три вида дозированной физической нагрузки с различной интенсивностью (приседания, 15 сек бег на месте в максимальном темпе, 3 мин бег на месте в темпе 180 шагов/мин) [10]. Достоинствами данного теста является его простота – не требуются нагрузочные устройства, информативность о состоянии сердечно-сосудистой системы, т.к. во время теста измеряется артериальное давление. К недостаткам можно отнести условный характер дозирования физической нагрузки: упражнение “бег на месте” с темпом 180 шагов/мин можно выполнять с несколько различающейся техникой и различным уровнем энергозатрат.

Представителем тестов с дозированной физической нагрузкой является Гарвардский степ-тест. Данный тест разработан в 1943 году [10]. Испытуемым предлагается выполнять зашагивания на платформу высотой 35-50 см (высота изменяется для различных категорий испытуемых) с фиксированной частотой 30 шагов/мин. После окончания теста у испытуемого, находящегося в положении сидя, измеряют значение ЧСС. По данным измерений рассчитывается показатель ИГСТ (индекс Гарвардского степ-теста). Чем ниже значение ИГСТ – тем хуже физическая работоспособность испытуемого.

Модификацией показателя ИГСТ можно назвать показатель интенсивность накопления пульсового долга (ИНПД) [22, с. 201]. Данный показатель разработан как простой способ нормировать интенсивность физической нагрузки. По нашему мнению, ИНПД может служить как показатель работоспособности при выполнении тестов с дозированной физической нагрузкой в любой её форме (велозргомметр, беговая дорожка, различные силовые и гимнастические упражнения и пр.). При этом, чем ниже значение ИНПД при выполнении дозированной нагрузки, тем лучше аэробная работоспособность испытуемого.

В работе А.В. Козлова и соавт. (2022) показатель ИНПД получил модификацию, позволяющую использовать данный показатель для нормирования интенсивности тренировок во всём диапазоне мощности, доступной человеку [11]. При этом, значение ИНПД, соответствующее упражнению с предельным временем 10, 30, 60, 120, 360 и 1800 с равно $15,9 \pm 4,4$; $7,6 \pm 2,4$; $4,4 \pm 1,1$; $2,1 \pm 0,6$; $0,7 \pm 0,2$; $0,1 \pm 0,0$ уд/с ($M \pm SD$), соответственно [11].

Существуют современные версии субмаксимальных степ-тестов, например, Честерский степ-тест [65]. В данном тесте используется степ-платформа более подходящей высоты (15-30 см) для массовых обследований, чем в Гарвардском степ-тесте. Протокол тестирования включает в себя выполнение 5 ступеней по 2 минуты с повышающейся частотой восхождения на степ-платформу, задаваемой метрономом. По итогам тестирования методом экстраполяции до прогнозируемого значения максимальной ЧСС рассчитывается предсказанный уровень МПК. Непрямая методика расчёта уровня МПК не позволяет назвать результаты данного теста точными в индивидуальных случаях. Тем не менее, по нашему мнению, Честерский степ-

тест является подходящим видом тестов для массового обследования среди широких категорий населения.

Другим классифицирующим признаком тестов аэробных возможностей может служить способ задания нагрузки. По этому признаку тесты бывают со ступенчатым повышением мощности, с непрерывным повышением мощности (рамп-тест), а также тесты с постоянной мощностью. Для тестов со ступенчатым или непрерывным повышением мощности конкретные значения начальной мощности и градиента повышения мощности или скорости (Вт/мин для велоэргометра или км/ч/мин для тредбана) можно посмотреть в специализированном справочнике [9]. Обычно в беговых ступенчатых тестах используют начальную скорость 6-10 км/ч (зависит от предполагаемого спортивного уровня испытуемого), градиент повышения скорости 0,5-1,0 км/ч/мин. Скорость прироста мощности имеет важное значение при определении уровня метаболических порогов – малая продолжительность теста (т.е. слишком быстрый прирост скорости бега) завышает интенсивность анаэробного порога (АнП) по сравнению с уровне максимального устойчивого состояния по лактату [48]. Для определения уровня МПК рекомендуется использовать тест с нарастающей мощностью, имеющий продолжительность до отказа 8-12 минут [63].

Тесты с постоянной мощностью могут использоваться для определения аэробной ёмкости по предельному времени удержания минимальной скорости достижения МПК [8]; для уточнённого определения АнП методом MLSS (maximal lactate steady state) [30] или для верификации уровня МПК (если мощность нагрузки подобрана верно, то плато потребления кислорода (ПК) в таком тесте встречается с большей вероятностью, чем в ступенчатом тесте) [63].

Еще одним классифицирующим признаком для тестов аэробных способностей является место проведения теста. По данному признаку тест может быть лабораторным или полевым. Достоинствами лабораторного теста являются стандартные условия теста (вид нагрузочного устройства, температура, влажность и пр.), что позволяет корректно сравнить данные различных тестов между собой, недостатком является меньшая специфичность данного теста по сравнению с полевыми тестами. Недостатком полевого теста является сильная зависимость от погодных условий, что затрудняет корректное сравнение данных различных тестов между собой.

Упомянутые выше классифицирующие признаки, а также виды тестов аэробных способностей продемонстрированы на рис. 2.



Рисунок 2 – Классификация тестов аэробных способностей

1.3 Показатели аэробной выносливости

Выносливость – это способность работать, не утомляясь, и противостоять утомлению, когда оно возникает в процессе работы [8].

Как и родственное понятие “работоспособность”, понятие “выносливость”, на наш взгляд, невозможно количественно определить без уточнения временных рамок. Понятие “аэробная выносливость”, которой посвящено настоящее исследование, подразумевает *преимущественный* вклад аэробной энергетической системы в общий энергозапрос. По данным Н.И. Волкова [5, с. 332], начиная со времени предельной работы около 2-х минут (например, бег на 800 м) вклад аэробной энергосистемы в общее выделение энергии становится равным 50% или превышает это значение. Таким образом, условимся, что аэробная выносливость преимущественно играет роль при выполнении работы с предельным временем 2 минуты и больше.

По нашему мнению, в наибольшей степени тема выносливости разработана в отечественной спортивной науке в исследованиях Н. И. Волкова. В статье [8] можно найти количественное определение выносливости как времени предельной работы:

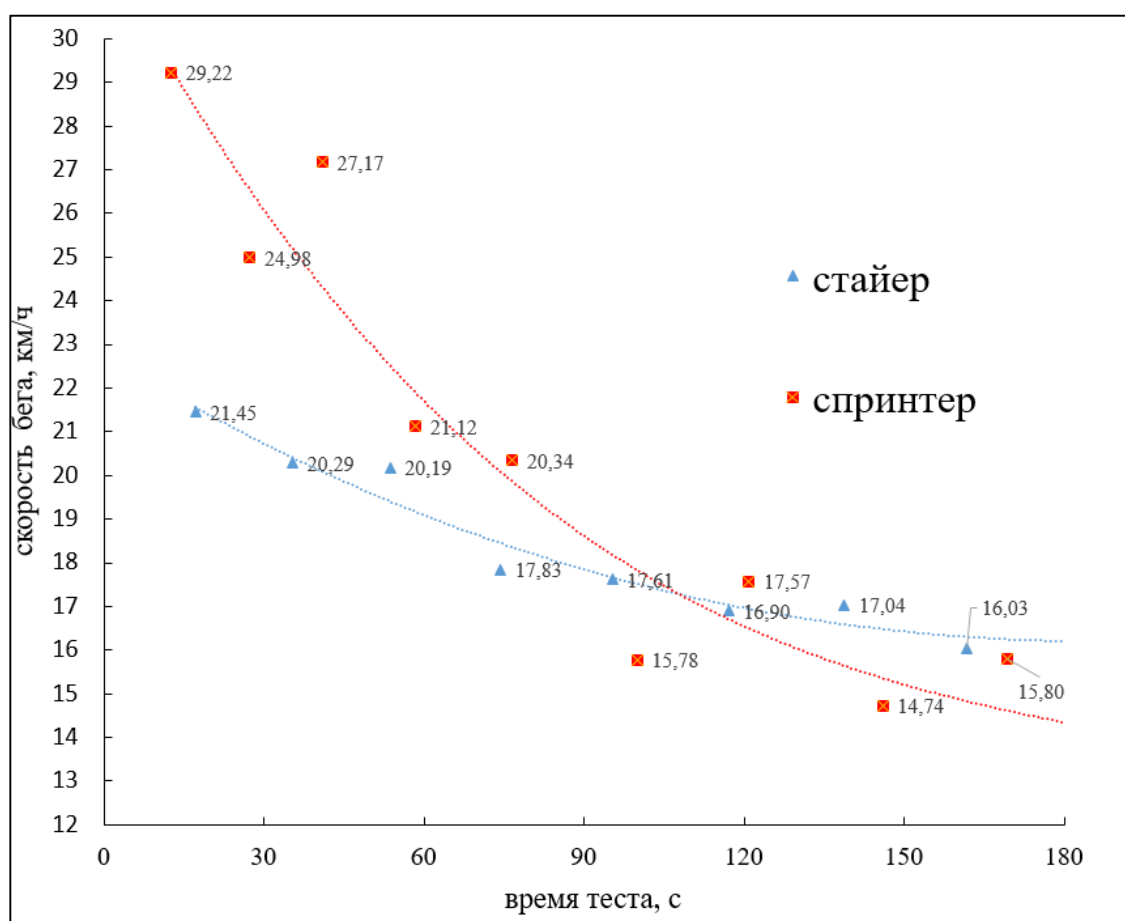
$$\text{выносливость (мин)} = \frac{\text{запасы энергии (кал)}}{\text{скорость расхода энергии } \left(\frac{\text{кал}}{\text{мин}}\right)} \quad (1)$$

Данное определение позволяет количественно оценить выносливость по времени предельной работы на заданной скорости бега. Чем больше время предельной работы – тем лучше развита выносливость при заданной скорости бега.

Также, исходя из определения, выносливость может быть определена как скорость развития утомления при выполнении работы. Количественно, данный аспект выносливости может быть выражен индексом утомления, показывающим относительное снижение мощности в заданный промежуток времени [15]:

$$\text{индекс утомления}(\%) = \frac{(\text{максимальная мощность} - \text{минимальная мощность})}{\text{максимальная мощность}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Чем меньше значение индекса утомления – тем лучше выносливость. Иначе говоря, чем больше значение индекса утомления – тем быстрее развивается утомление. Необходимо понимать, что индекс утомления определяется только при выполнении максимального теста, при этом важно работать на максимально возможной мощности с начала теста, т.е. не пытаться раскладывать силы. Данная установка должна быть однозначно воспринята испытуемым. См. пример на рис. 3.



Спринтер показывает большую пиковую скорость (29,22 км/ч), больший индекс утомления (50,4%), чем стайер (21,45 км/ч и 25,4%, соответственно)

Рисунок 3 – Пример динамики скорости бега в трёхминутном тесте, режим бега “изо всех сил” с начала теста

Как показывают наши неопубликованные данные, определение индекса утомления в аэробных тестах (например, в трёхминутном тесте по А. Vanhatalo

[72]) сопряжено с практическими сложностями. Тренированные бегуны-стайеры, как правило, не всегда могут однозначно понять установки бежать с начала теста на максимальной скорости, ведь в практике стайерского бега присутствует задача экономить силы на первых минутах дистанции. Такие спортсмены экономят силы в начале работы и могут ускориться под конец теста, что существенно искажает результаты. Кроме того, после выполнения трёхминутного бегового теста субъективные ощущения существенно тяжелее, чем после выполнения максимального ступенчатого теста [неопубликованные данные авторов]. По нашему мнению, вышеназванные причины препятствуют широкому использованию показателя индекса утомления в аэробных тестах. Данный показатель получил применение при анализе данных анаэробного Вингейт-теста [15].

Исходя из определения выносливости по зависимости (1) и биоэнергетической концепции R. Margaria [57], становится понятным, что по определению выносливость (как предельное время работы на заданной мощности) и ёмкость (общее количество работы, которое может быть выполнено энергосистемой) пропорциональны друг другу.

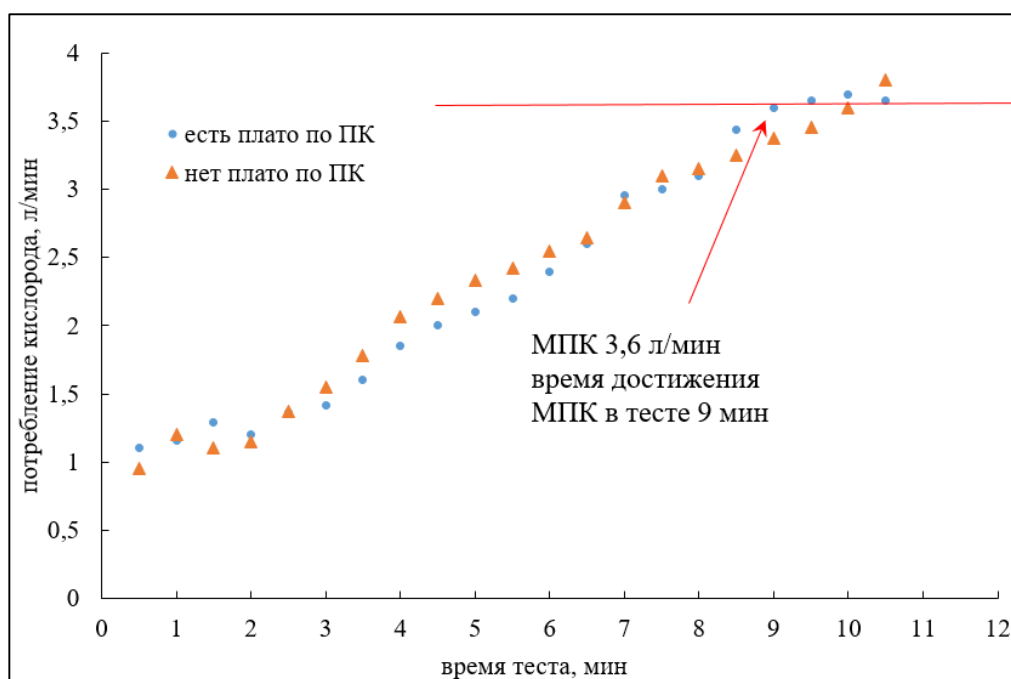
Теоретически, тесты на определение ёмкости более чувствительны к изменению выносливости, чем тесты на определение мощности [22]. По мнению В. Д. Сонькина и Р.В. Тамбовцевой тест на определение аэробной ёмкости, предложенный Н. И. Волковым и заключающийся в определении максимального времени удержания критической скорости (минимальная скорость достижения МПК в ступенчатом тесте) не позволяет в должной мере оценить данный показатель в связи со значимым вкладом анаэробного гликолиза (АнГ) (около 20%) в общий выход энергии в данном тесте [22]. Мак-Дугалл и соавт. (1998) упоминают, что вопрос корректного определения аэробной ёмкости не решен окончательно: некоторые авторы предлагали различную интенсивность от 50 до 100% МПК в качестве интенсивности теста с постоянной мощностью для определения аэробной ёмкости [15]. Однако, сложность вопроса заключается в том, что пока нет окончательного ответа на вопрос, что именно лимитирует выносливость при выполнении продолжительного теста на скорости бега не более 100% МПК [15]. По нашим данным, общепринятого теста на определение аэробной ёмкости пока не существует.

Существенной сложностью, возникающей в практике использования тестов на ёмкость является выбор мощности (скорости бега) для теста с постоянной мощностью. Недооценка мощности приведёт к тому, что продолжительность теста будет слишком велика (десятки минут и даже более часа). Переоценка приведёт к тому, что отказ от работы произойдёт очень быстро (<2-3-х минут), это не даст достаточно времени аэробной системе выйти на рабочие показатели.

Широкое распространение нашёл другой подход к определению показателей выносливости, не связанный с определением ёмкости или индекса утомления. В практике лабораторного тестирования для определения показателей выносливости чаще всего используется ступенчатый или рамп тест

с повышающейся мощностью. При этом, в качестве показателей выносливости используются значения интенсивности нагрузки (скорости бега), на которых человек достигает *заданного физиологического состояния*. Использование теста с повышающейся мощностью позволяет начинать работу с такого уровня мощности, который является посильным для большинства тестирующихся. Плавное повышение мощности позволяет аэробной системе вработаться и постепенно выйти на режим максимальной мощности. По нашему мнению, вышеуказанные обстоятельства являются причиной того, что тесты на определение мощностных показателей выносливости в аэробном диапазоне нагрузки достаточно хорошо разработаны.

Из мощностных показателей аэробной выносливости наиболее известен показатель максимальной аэробной мощности или МПК [15, 16]. Со времён А. Хилла (20-ые годы 20 века) показатель МПК удостоен пристального внимания физиологов со всего мира. Такой интерес вызван тем, измерение потребления кислорода организмом служит надёжным и неинвазивным способом измерить скорость метаболизма – ведь скорость расхода субстрата в биохимических реакциях аэробного окисления прямо пропорциональна скорости расхода окислителя (кислорода).



Синие кружки – есть плато по ПК, МПК зафиксировано на уровне 3,6 л/мин, уровень плато ПК показан красной горизонтальной линией. Оранжевые треугольники – рост ПК продолжается до отказа, плато не зафиксировано [неопубликованные данные, полученные авторами из сторонних лабораторий]

Рисунок 4 – Два примера динамики потребления кислорода (ПК) в ступенчатом тесте

Феномен МПК состоит в том, что по мере повышения скорости бега, потребление кислорода (ПК) организмом постепенно выходит на плато – нагрузка растёт, но ПК остаётся стабильным (см. рис. 4). Однако, практика

тестирования показывает, что даже среди тренированных спортсменов только примерно в 50% случаев можно обнаружить классическую картину МПК, не во всех случаях удаётся получить плато по потреблению кислорода [15, 63]. Примеры различной динамики потребления кислорода в ступенчатом тесте см. на рис. 4. Кроме того, показатель МПК хорошо коррелирует с результатами забегов в разнородных выборках, но демонстрирует слабую или даже отрицательную корреляцию при однородной выборке среди высококвалифицированных спортсменов [51].

В связи со сложностью эксплуатации и обслуживания, а также дороговизной газометрического оборудования, в нашем исследовании не используются газометрические измерения. Вместо показателя МПК в нашей работе будем использовать ассоциированную величину – пиковую скорость бега в тесте (скорость бега на отказе) $v_{\text{пик}}$. Обычно, величина $v_{\text{пик}}$ больше на несколько процентов, чем минимальная скорость достижения МПК в ступенчатом тесте. Количественно, эта скорость рассчитывается как скорость бега на отказе от теста по следующей зависимости [18]:

$$v_{\text{пик}} = v_{n-1} + \frac{(v_n - v_{n-1})t_n}{k} \quad (3)$$

Где v_n – скорость бега на последней ступени, км/ч; v_{n-1} – скорость бега на предпоследней ступени теста, км/ч; t_n – время бега на последней ступени, с; k – планируемая продолжительность ступени в тесте, с.

Аналогичная зависимость, линейно связывающая скорость бега и время в ступенчатом тесте применяется для определения скорости бега в любой временной точке теста.

Как видно из зависимости (3), $v_{\text{пик}}$ можно определить эргометрически без использования сложного оборудования и регистрации физиологических показателей. При использовании адекватного протокола повышения скорости в ступенчатом тесте (конкретные значения можно посмотреть в специализированном справочнике [9]), величина $v_{\text{пик}}$ очень сильно коррелирует с результатами забегов на длинных дистанциях [26, 66].

Другим показателем аэробной выносливости, который приобрёл широкую популярность, начиная с 70-х годов, стал уровень интенсивности нагрузки на анаэробном пороге (АнП), широко известный в отечественной спортивной науке как порог анаэробного обмена (ПАНО) [3, 16].

Показатель уровня АнП лучше, чем МПК коррелирует с результатами забегов даже среди относительно однородных выборок [16, 42], при этом корреляция оценивается как очень сильная [42, 66].

Менее известным в отечественной спортивной науке является показатель интенсивности нагрузки на аэробном пороге (АЭП). По нашему мнению, впервые данный показатель предложен в работе Kindermann [54]. В дальнейшем, множество исследований обнаружило значимые и сильные корреляции между уровнем АЭП и результатами соревнований, однако, эти корреляции не такие сильные, как в случае АнП [42].

Более подробно о физиологической природе, а также о методах определения метаболических порогов (МП) см. далее в подразделе 1.4 настоящей работы. Под выражением МП имеется в виду оба порога (АЭП и АНП) [64].

В последние годы в зарубежной научной периодике стала популярна концепция критической скорости (далее CS), которая некоторыми авторами предлагается в качестве метода определения максимального устойчивого метаболического состояния [50]. Существует систематический обзор и мета-анализ экспериментальных исследований связи между CS и МП от М. Galán-Rioja и соавт. (2020) [44]. CS определяется при помощи нескольких (минимум 2, но лучше 4) максимальных по усилиям прикидок в диапазоне предельного времени 2-15 минут (например, на дистанции бега 800-3000 м), при этом не требуются физиологические измерения [50, 73]. Недостатками методики CS является необходимость выполнения многократного максимального тестирования, а также отсутствие информации о пульсовых зонах, позволяющей программировать интенсивность тренировок по значению ЧСС.

Не следует путать понятие CS, которая используется в современной зарубежной литературе [44, 73], и понятие “критическая скорость”, которая принята в российской научной школе под влиянием работ Н. И. Волкова. В современных российских работах принято называть “критической скоростью” бега минимальную скорость достижения МПК в ступенчатом тесте [13, 27]. Вероятно, этот термин в российской спортивной науке закрепился после появления статьи Н. И. Волкова и Е. А. Ширковец в 1973 году, в которой одними из первых (практически одновременно с К. Wasserman) предлагались конкретная методика определения ПАНО по избыточному выделению CO₂ (ExhCO₂) [6]. В данной статье упоминается, что “критическая скорость”, как и в концепции CS, это параметр *b* в линейном уравнении зависимости дистанции от предельного времени бега [6, с. 23]. Однако в дальнейших работах Н. И. Волкова под понятием “критическая скорость” закрепились именно минимальная скорость достижения МПК в ступенчатом тесте [8].

В табл. 1 представлены обобщённые сведения о мощностных показателях аэробной выносливости.

Таблица 1 – Общие сведения о мощностных показателях аэробной выносливости

наименование	обоз-е	комментарии	ссылки
Скорость на отказе в тесте с повышающейся нагрузкой	$v_{лик}$	Скорость на отказе от теста с повышающейся нагрузкой характеризует как аэробные (в большей степени), так и анаэробные (в меньшей степени) способности испытуемого. Вклад аэробной и анаэробной энергосистемы в тесте с повышающейся нагрузкой зависит от соответствия протокола теста и	К. Roecker и соавт. (1998), S. Wiecha и соавт. (2022)

Окончание таблицы 1

наименование	обоз-е	комментарии	ссылки
		способностей испытуемого. Данный показатель сильно коррелирует с МПК. Может быть определена эргометрическим путём по данным однократного максимального тестирования без физиологических измерений.	
Аэробный порог, первый лактатный порог, порог аэробного обмена	АэП, LT1, ПАО	АэП характеризует в большей степени аэробные способности испытуемого, чем $v_{\text{пик}}$. Эталонные методы определения включают в себя измерения концентрации лактата в крови и/или газометрические измерения.	О. Faude и соавт. (2009)
Анаэробный порог, второй лактатный порог, порог анаэробного обмена	АнП, LT2, ПАНО	АнП характеризует в большей степени аэробные способности испытуемого, чем $v_{\text{пик}}$. Эталонные методы определения включают в себя измерения концентрации лактата в крови и/или газометрические измерения.	О. Faude и соавт. (2009)
Критическая скорость (в беге), критическая мощность (на велоэргометре)	CS, CP	CS характеризует в большей степени аэробные способности испытуемого, чем $v_{\text{пик}}$. Может быть определена эргометрическим путём по данным многократного максимального тестирования (минимально требует 2 теста, но лучше 4), без физиологических измерений.	М.А. Виноградов, (2016), А. Vanhatalo и соавт. (2011)

1.4 Лактатные пороги

Концепция МП, проявляющихся в изменении метаболического состояния организма человека в процессе выполнения упражнения с повышающейся интенсивностью, является общепринятой концепцией, описанной в современной научной литературе по теме спортивной физиологии [64]. Наиболее известным МП, упоминающимся в отечественной литературе, является порог анаэробного обмена (ПАНО) [3, 16]. При этом, в англоязычной литературе используются наименования, которые можно перевести как аэробный (АэП) и анаэробный пороги (АнП) [42, 64].

Изначально русскоязычное наименование ПАНО полностью соответствовало англоязычному термину *threshold of anaerobic metabolism* (ТАМ). Данный термин использовался в одной из первых работ по теме метаболических порогов, выполненной К. Wasserman и соавт. (1964) [76]. Аналогичный термин использовали Н.И. Волков и соавт. в англоязычной статье 1975 года, посвящённой определению ТАМ по скорости выделения CO_2 во время

ступенчатого бегового теста [74]. Однако, в дальнейшем К. Wasserman и соавт. (1973) предложили другой термин (anaerobic threshold, т.е. АНП), при этом были представлены конкретные критерии определения АНП [75]. Исследование Wasserman и соавт. (1973), вероятно, по причине высокого методического качества и использования передовых на то время быстродействующих газоанализаторов стало классическим и широко цитируемым (>3000 цитирований по состоянию на 2024 год). По данной причине термин АНП закрепился в англоязычной литературе. В отечественной литературе, вероятно, во многом благодаря работе Н.И. Волкова, закрепился первоначальный термин ПАНО.

Первичная причина возникновения метаболических порогов, базирующаяся на особенностях рекрутирования мышечных волокон (МВ) вследствие повышения внешней нагрузки, в настоящее время имеет множество экспериментальных подтверждений, основанных на анализе электромиограммы [40, 53]. В России Д. Поповым и соавт. (2019) разработан метод определения АНП в работающей мышце при помощи анализа электромиограммы [17]. По нашему мнению, гипотезу о связи рекрутирования различных типов МВ (I, IIa и IIb) и появлением метаболических порогов впервые опубликовали J. Skinner и T. McLellan (1980) [69, с. 241]. В России данная гипотеза приобрела известность благодаря работе В. Н. Селуянова и соавт. (1991) [20].

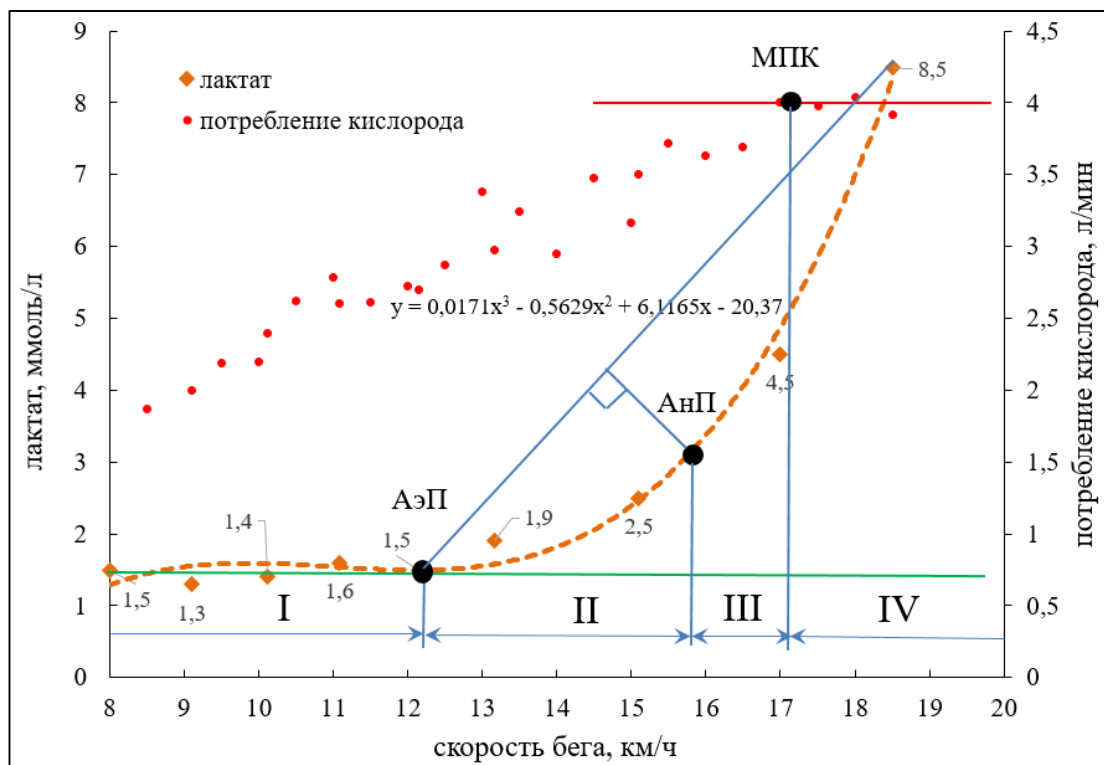
Современные достижения в области биологических наук поставили под вопрос классическое объяснение причины возникновения АНП, основанное на недостаточном снабжении кислородом работающих мышц, которое приводится в первых исследованиях по этой теме, выполненных группой К. Wasserman [75, с. 237]. Современный биологический подход к данной проблеме во всей её широте, включая исторические сведения, приведён в исследовании D.C. Poole и соавт. (2020) [64]. В этой статье доказывается, что накопление лактата в крови вследствие рекрутирования МВ IIa и IIb типов после превышения мощности МП происходит, вероятно, не вследствие гипоксии в работающих мышцах, а как способ обеспечить ткани внутренних органов (прежде всего сердца) энергетическим субстратом, что позволит увеличить мощность их деятельности. Это важно для продолжения напряжённой мышечной деятельности [64, с. 14].

На ранних этапах исследований темы МП W. Kindermann и соавт. (1979), а также J.S. Skinner и H. McLellan (1980) предложили концепцию перехода от аэробного к анаэробному метаболизму [54, 69]. По нашему мнению, данная концепция аэробно-анаэробного перехода (ААП) остаётся актуальной в настоящее время. При этом, вышеперечисленные МП являются характерными точками данного перехода [64].

При выполнении теста с повышением мощности переход от практически 100% доли аэробной энергосистемы (не считая небольшого иницирующего алактатного долга) на низких уровнях мощности к *медленному* повышению доли анаэробного гликолитического энергопроцесса (АНГ) происходит после превышения мощности АЭП [42, 64]. Физиологическими критериями достижения мощности АЭП являются начало перехода линейной динамики

лактата в экспоненциальный рост, сопровождающийся переломом в линейной динамике выделения углекислого газа [3].

Достижение мощности АнП характеризуется началом *быстрой фазы* экспоненциального увеличения доли АнГ [42, 64]. АнП может быть определён более чем 20-ю методами по динамике накопления лактата [42].



Примечание: зелёная сплошная линия показывает линейную зависимость, описывающую динамику лактата на начальных ступенях теста (в данном случае динамика La до АэП без повышения, но возможны случаи линейной медленно повышающейся динамики до АэП). Красная сплошная линия показывает уровень потребления кислорода в конце теста. Чёрные закрашенные круги — характерные точки на кривой динамики лактата, соответствующие аэробно-анаэробному переходу (АэП, АнП и МПК). Римскими цифрами обозначены зоны активности различных энергосистем: I — аэробная энергосистема обеспечивает 100% от общей выработки энергии (не считая инициирующий алактатный долг); II — смешанное аэробно-анаэробное энергообеспечение с медленным ростом доли анаэробного гликолиза; III — смешанное аэробно-анаэробное энергообеспечение с быстрым ростом доли анаэробного гликолиза; IV — достигнут предел аэробной мощности, дальнейшее нарастание мощности внешней работы возможно исключительно за счёт повышения анаэробного вклада. Аэробно-анаэробный переход происходит во время II и III фаз, в IV фазе аэробный метаболизм достигает максимальной мощности (при условии, что хватает времени на развёртывание аэробного энергопроцесса).

Рисунок 5 – Пример динамики потребления кислорода и накопления лактата во время теста с повышением скорости бега до отказа (скорость на отказе 18,5 км/ч в данном примере) [неопубликованные данные, полученные от сторонних лабораторий]

Уровень интенсивности, на котором достигается плато по потреблению кислорода (МПК), несмотря на повышение внешней нагрузки, свидетельствует о достижении максимальной мощности аэробной энергосистемы. Дальнейший

рост интенсивности внешней работы возможен исключительно за счёт повышения мощности АНГ [63].

На рис. 5 показана схема ААП. Мы предполагаем, что уровни АЭП и МПК являются границами данного перехода, а уровень АНП отражает начало быстрой фазы ААП.

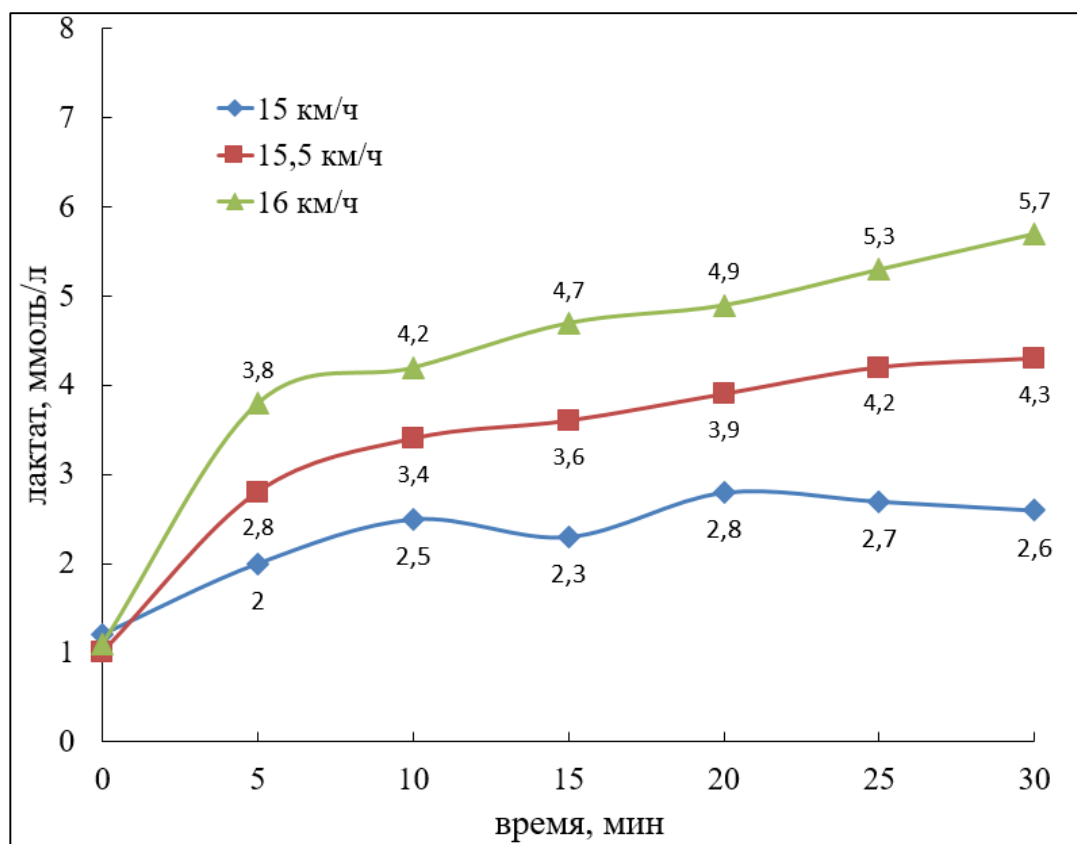
В исследовании Stegmann и соавт. (1981) приведена модель динамического процесса накопления лактата в крови в процессе напряжённой мышечной деятельности, остающаяся актуальной на сегодняшний день [70]. Согласно современным представлениям, концентрация лактата в крови отражает процесс динамического равновесия между скоростью выделения и скоростью утилизации лактата [64]. По мере повышении интенсивности упражнения, скорость утилизации лактата повышается линейно, а скорость его выделения, начиная с интенсивности АЭП, начинает расти экспоненциально (вероятно, отражая лавинообразное рекрутирование МВ с доминирующим АНГ), что приводит к быстрому накоплению лактата [64].

К настоящему времени, на основании многочисленных исследований, считается, что показатель LT2 имеет важнейшее значение в подготовке спортсменов на выносливость: интенсивность LT2 служит границей, после превышения которой тренировка считается высокоинтенсивной [42, 64]. Показатель LT2 надёжнее, чем МПК отражает изменение спортивной подготовленности на длинных дистанциях в циклических видах спорта [42].

Показатель LT1 используется для нормирования интенсивности низкоинтенсивных тренировок спортсменов на выносливость, для реабилитации пациентов при различных заболеваниях [33], а также при физических тренировках, направленных на улучшение показателей здоровья [33, 60].

Исходя из физиологической сущности LT2, а именно: LT2 это наибольшая мощность работы, во время которой скорость выделения лактата не превышает скорости его утилизации, в 1985 году Н. Неск и соавт. предложили методику определения максимального устойчивого состояния по лактату (maximal lactate steady state, далее MLSS). По данным А.М. Jones и соавт. (2019), а также V. Billat и соавт. (2003) MLSS считается эталонным методом определения LT2 [30, 50]. Методика определения MLSS: испытуемые выполняют упражнение с постоянной интенсивностью в течении 30 минут. Интенсивностью MLSS считается такая наибольшая интенсивность упражнения, во время которой концентрация лактата возрастает не более, чем на 1 ммоль/л в промежуток между 10-ой и 30-ой минутой теста (см. рис. 6). Для определения MLSS необходимо проведение от 3 до 6 тестов с разным уровнем постоянной интенсивности. В обзоре O. Faude и соавт. (2009) продемонстрировано, что показатель MLSS имеет очень сильные корреляции с результативностью спортсмена в видах спорта на выносливость [42]. V. Billat и соавт. (2003) упоминают об эффективности продолжительных тренировок для улучшения показателей аэробной выносливости, которые проводятся на интенсивности MLSS [30]. Серьёзный недостаток данной методики - необходимость проведения нескольких тестов (обычно требуется 3-6 тестов) по 30 минут в разные дни, что отрывает

спортсменов от процесса запланированной спортивной подготовки, затрудняет широкое использование метода MLSS в практике тренировок спортсменов на выносливость [42, 50].



В данном примере скорость бега, соответствующая интенсивности MLSS, равна 15,5 км/ч

Рисунок 6 – Пример определения LT2 методом MLSS

В исследовании W. Kindermann и соавт. (1979) сделано заключение, что средняя концентрация лактата по группе испытуемых (7 высококвалифицированных лыжников) на LT1 приблизительно 2 ммоль/л, на LT2 приблизительно 4 ммоль/л [54]. На основании этого появилась методика определения метаболических порогов по фиксированному значению концентрации лактата, которая приобрела широкую популярность ввиду своей простоты, а также субмаксимального характера теста (отсутствие необходимости выполнять тест до отказа) [42].

Однако, ещё в исследовании H. Stegmann и соавт. (1982) на 19 тренированных гребцах показано, что попытка выполнить упражнение продолжительностью 50 минут с постоянной мощностью, соответствующей концентрации лактата 4 ммоль/л в ступенчатом тесте была удачной лишь в 4 случаях, в остальных случаях отказ произошел в среднем через 14,4 минуты [71, с. 106]. В обзоре O. Faude и соавт. (2009) на основании многочисленных исследований указано, что концентрация лактата на MLSS значительно различается между испытуемыми, что не позволяет полагаться на фиксированную концентрацию лактата как на универсальный критерий MLSS

[42, с. 481]. По данным V. Billat и соавт. (2003), концентрация лактата на интенсивности MLSS может колебаться в пределах 2-8 ммоль/л между различными испытуемыми [30, с. 408].

Метод INSCYD позиционируется как современный и наиболее точный метод определения АНП, не требующий визита в лабораторию, на основании лактатных измерений, которые можно сделать самостоятельно [82]. Экспериментальная проверка данного метода, проведённая в исследовании [62], показала, что метод INSCYD является относительно точным при сравнении с MLSS, но имеет следующие недостатки: непрозрачность методики (необходимо покупать программное обеспечение для расчёта АНП и других показателей), а также большое количество лактатных измерений на тест (>20).

Таким образом, широко распространённый критерий определения LT2 по фиксированному значению концентрации лактата в крови не учитывает индивидуальные особенности испытуемых, а общепризнанный в качестве эталонного метода определения LT2 метод MLSS слишком сложен для использования в тренировочном процессе циклических видов спорта.

По этой причине появились десятки методов определения LT1 и LT2. В обзоре O. Faude и соавт. (2009) упоминается о 25 методах [42].

Для объективного определения границы между быстрой и медленной фазой роста концентрации лактата в 1992 году разработан метод *maximal deviation* или D_{max} [36]. Метод D_{max} заключается в аппроксимации динамики лактата до полинома третьей степени, затем проводится прямая между начальным и конечным значением концентрации лактата и найти наибольшее расстояние по перпендикуляру от прямой до полинома. Абсцисса точки пересечения наиболее длинного перпендикуляра от прямой до полинома будет интенсивностью LT2 по методу D_{max} (см. образец расчёта на рис. 8). Данную задачу можно решить, как графически, так и аналитически несколькими способами. С помощью метода D_{max} можно математически точно находить границу между медленной и быстрой фазой непрерывной динамики лактата, что позволяет: а) объективно (независимо от компетенций исследователя) определять LT2; б) объективно определять даже небольшое изменение LT2 в результате тренировок, следовательно, изменение спортивной подготовленности спортсмена на выносливость.

Метод D_{max} получил широкое распространение [28, 29, 61, 80]. J.D. Bishop и соавт. (1998) разработали модификацию данного метода – модифицированный D_{max} , обозначаемый как D_{mod} [29]. Критерии определения при помощи метода D_{mod} представлены в табл. 2. Пример определения LT2 методом D_{mod} см. на рис. 8.

В табл. 2 представлена обзорная информация о часто встречающихся в исследованиях методах определения LT1 и LT2.

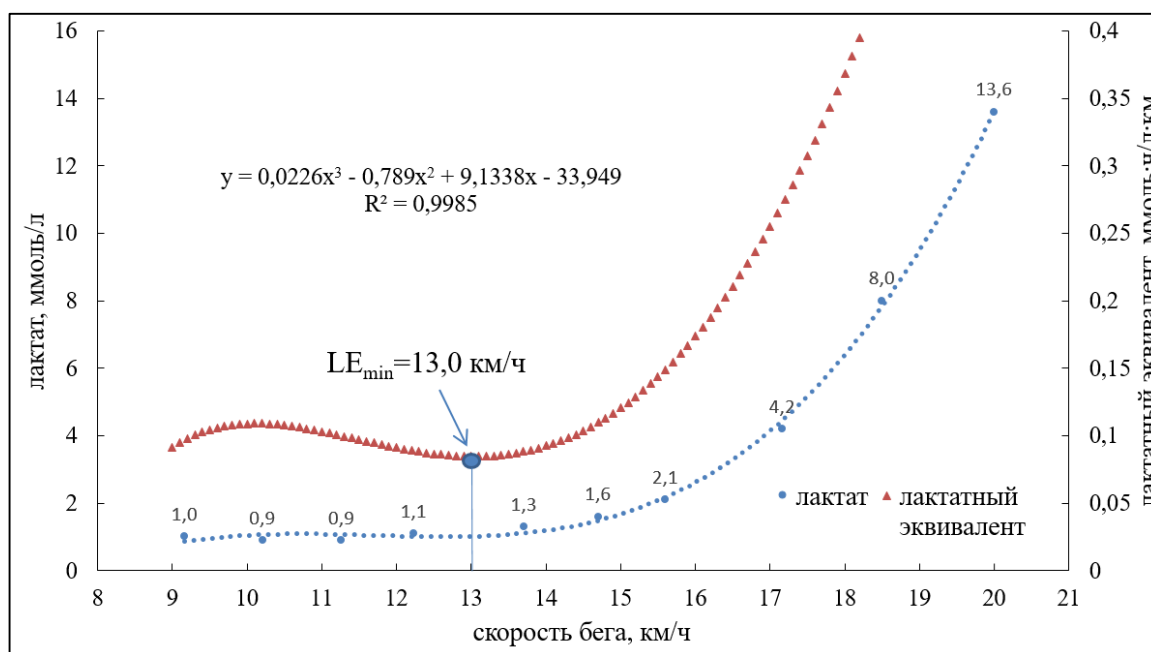
Таблица 2 – Наиболее распространённые методы определения лактатных порогов

Номер п.п.	Обозначение	Комментарии	Ссылки
Первый лактатный порог (LT1)			
1	LT	Интенсивность, соответствующая первому значимому повышению концентрации лактата в крови	Kindermann, 1979
2	LT _{2mmol}	Интенсивность, соответствующая концентрации лактата 2 ммоль/л в крови	Kindermann, 1979
3	LE _{min}	Интенсивность, соответствующая минимальному значению отношения функции, описывающей динамику концентрации лактата, к интенсивности нагрузки (минимальный лактатный эквивалент, пример см. на рис. 7)	Garcia-Tabar, 2018
4	LT _{+0,5 mmol/l}	Интенсивность, соответствующая концентрации лактата +0,5 ммоль/л относительно уровня покоя	Hughson, 1982
5	LT _{+1 mmol/l}	Интенсивность, соответствующая концентрации лактата +1 ммоль/л относительно уровня покоя	Coyle, 1983
6	LT, LAT	Первое отклонение от линейной зависимости динамики лактата	Бреслав, 2013
Второй лактатный порог (LT2)			
7	MLSS	Наибольшая постоянная интенсивность нагрузки, при которой концентрация лактата повышается не более, чем на 1 ммоль/л в промежуток времени между 30-ой и 10-ой минутой теста (см. пример на рис. 6)	Jones, 2019
8	LT _{4mmol}	Интенсивность, соответствующая концентрации лактата 4 ммоль/л в крови	Kindermann, 1979
9	IAT (Stegmann)	Интенсивность, соответствующая пересечению лактатной кривой и касательной прямой, проведённой из точки в момент восстановления после отказа, в которой концентрация лактата становится равной концентрации лактата в момент отказа (пример см. на рис. 8)	Stegmann, 1981; Ploszczyca, 2020
10	IAT (Dickhuth)	Интенсивность, соответствующая концентрации лактата, равной +1,5 ммоль/л относительно минимального лактатного эквивалента (пример см. на рис. 8)	Roecker, 1998
11	Dmax	Интенсивность, соответствующая точке пересечения перпендикуляра, имеющего наибольшую длину, от прямой, соединяющей начальную и конечную точку в тесте до лактатной кривой, полученной аппроксимацией до полинома третьей степени (пример см. на рис. 8)	Zwingmann, 2019

Окончание таблицы 2

Номер п.п.	Обозначение	Комментарии	Ссылки
12	Dmod	Интенсивность, соответствующая точке пересечения перпендикуляра, имеющего наибольшую длину, от прямой, соединяющей точку, после которой концентрация лактата возрастает более, чем на 0,4 ммоль/л и конечную точку в тесте до лактатной кривой, полученной аппроксимацией до полинома третьей степени (пример см. на рис. 8)	Chalmers, 2015; Bishop, 1998
13	INSCYD	Расчёт интенсивности LT2 доступен только в виде программного обеспечения на коммерческой основе	Podlogar, 2022

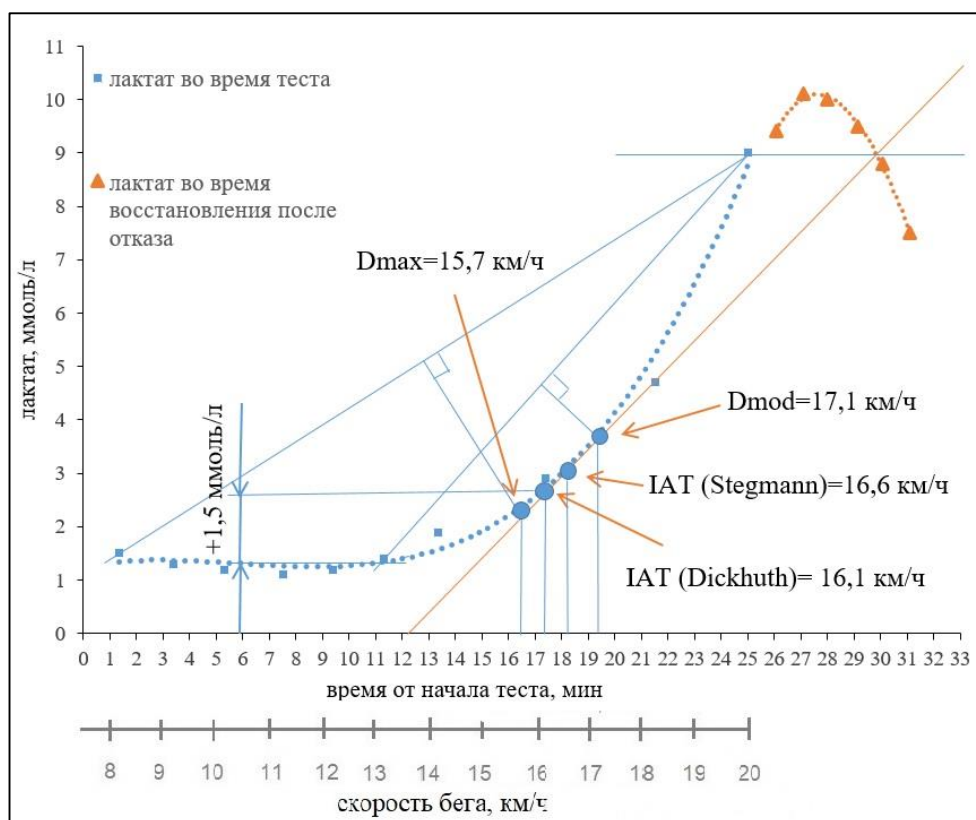
На рис. 7 представлен пример определения LT1 методом минимального лактатного эквивалента.



Функция минимального лактатного эквивалента равна отношению уравнения функции, аппроксимирующую динамику лактата к скорости бега. Абсцисса точки минимума функции лактатного эквивалента равна значению LT1 по методу LE_{min}

Рисунок 7 – Пример определения LT1 методом минимального лактатного эквивалента (LE_{min})

На рис. 8 представлен пример определения LT2 распространёнными методами по данным однократного ступенчатого бегового теста.



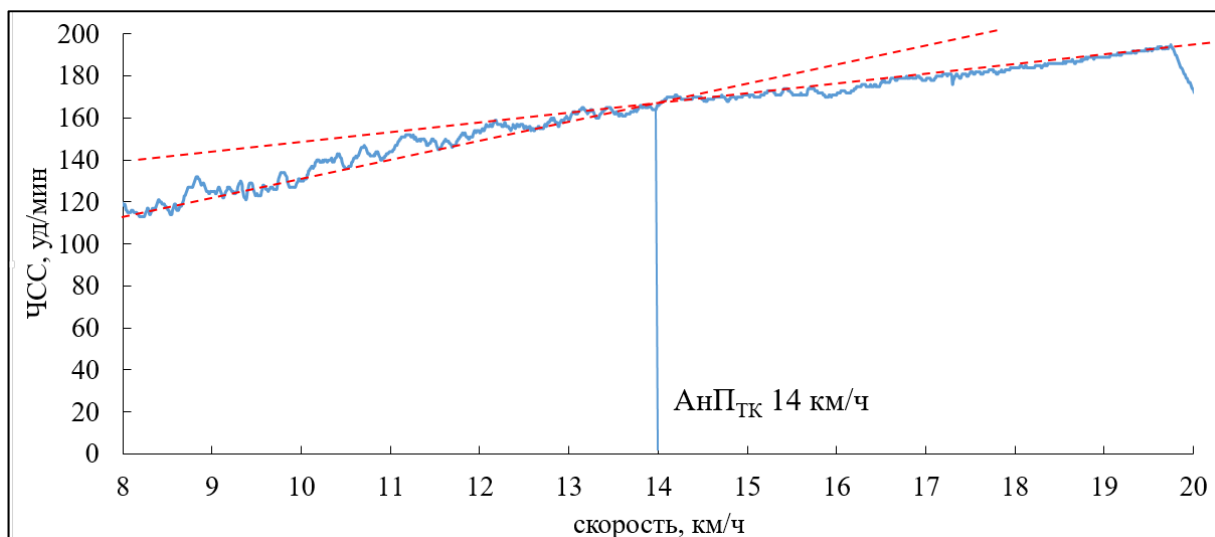
Скорость бега повышалась равномерно до отказа от продолжения работы, который произошёл после 25 минут работы. Критерии определения LT2 в различных методах см. в табл. 2. Измерение концентрации лактата после отказа в период восстановления необходимо только для метода IAT (Stegmann)

Рисунок 8 – Пример определения LT2 распространёнными методами в ступенчатом беговом тесте

3.5 Неинвазивные методы определения метаболических порогов

Методы определения метаболических порогов, общепринятые для использования в научных исследованиях, требуют инвазивных измерений концентрации лактата в крови или использования газометрического оборудования, сложного в эксплуатации и обслуживании. По вышеназванным причинам, ещё на ранних этапах исследований в 80-ые годы начали появляться разнообразные методы неинвазивного определения метаболических порогов, не требующие газометрического оборудования.

Наиболее известным представителем данного рода методов является тест Конкони, представленный в 1982 году Conconi и соавт. [38]. Данный метод основан на анализе динамики ЧСС во время бега с возрастающей скоростью, при этом тест проводится до отказа или невозможности увеличения скорости испытуемым. АнП по тесту Конкони (АнП_{ТК}) определяется по скорости бега, соответствующей точке перелома динамики ЧСС. Эта точка, обозначаемая в англоязычных работах HRDP (heart rate deflection point), определяется по точке пересечения линий тренда динамики ЧСС (см. рис. 9).



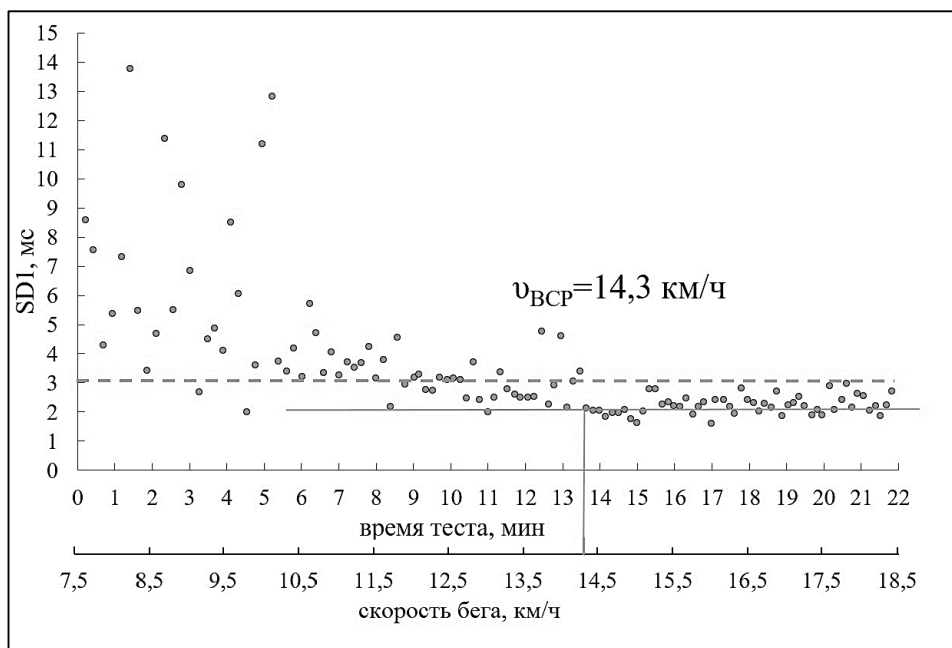
Абсцисса точки перелома динамики ЧСС (АнП_{ТК}) соответствует скорости АнП по тесту Конкони. АнП_{ТК} определена по точке пересечения линий тренда (обозначены штриховой линией), аппроксимирующие различные участки кривой динамики ЧСС

Рисунок 9 – Пример определения АнП при помощи метода Конкони в ступенчатом беговом тесте, выполненного до отказа

Критика теста Конкони начала появляться в 80-х годах и в основном сводилась к тому, что точка перелома динамики ЧСС не всегда определяется и воспроизводится при ретесте. По современным данным Hnizdil и соавт. (2019), при анализе динамики ЧСС 2500 испытуемых во время ступенчатого теста, выполняемого до отказа, точка перегиба обнаружена в 1925 случаях (77%) [46]. Кроме того, F. Conconi и соавт. (1982) использовали некорректный протокол определения LT2, имеющий высокую предвзятость – по данному протоколу невозможно получение другого результата, кроме очень сильной корреляции между абсциссой HRDP и предполагаемым лактатным порогом [56].

Существуют методы определения метаболических порогов по данным вариабельности сердечного ритма (ВСР). Данные методы основаны на математической обработке данных о интервалах времени, измеряемых в мс, между зубцами R на кардиограмме, характеризующего возбуждение основной массы миокарда. Можно выделить два метода определения МП на базе ВСР: метод на основе показателя SD1 и на основе показателя DFA alpha 1.

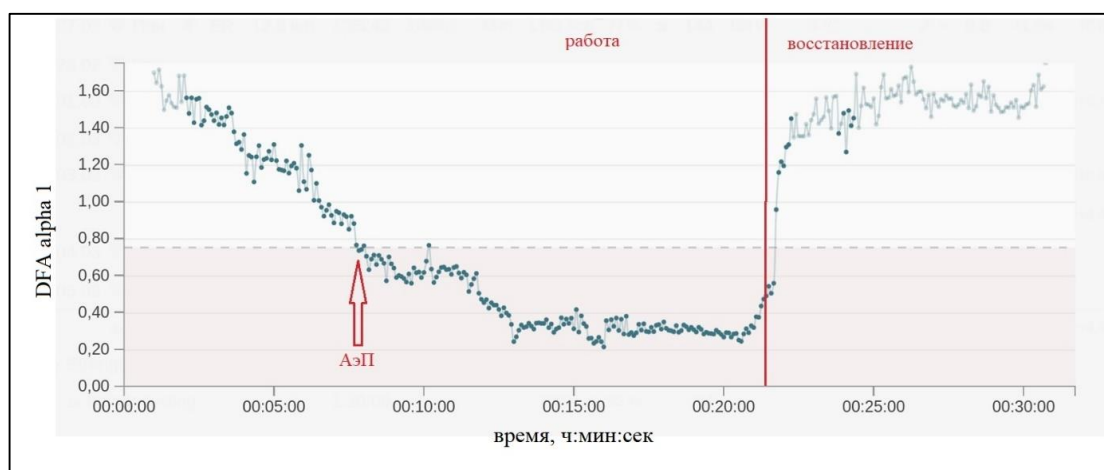
Метод определения МП на основе показателя SD1 (МВСР) основан на том, что при выполнении тестирования с повышающейся нагрузкой значение показателя SD1 уменьшается до некоторого значения, на котором можно зафиксировать “плато” (см. рис. 10). В процессе выполнения теста по данному методу предельные усилия испытуемого и отказ в конце теста не являются обязательным условием. В России данный метод известен по исследованию В.Н. Селуянова и Е.М. Калинина [19]. При помощи данного метода можно определить АнП, ассоциированный с LT2.



Условные обозначения: v_{BCP} – скорость бега, соответствующая $АнП_{BCP}$, штриховой линией показан уровень $SD1=3$ мс, сплошной горизонтальной линией показана стабилизация значения (выход на “плато”) показателя $SD1$, сплошная вертикальная линия показывает проекцию точки начала стабилизации значения $SD1$ на оси абсцисс

Рисунок 10 – Пример определения $АнП$ при помощи $МВСР$ ($АнП_{BCP}$)

Метод определения $МП$ на основе показателя $DFA\ alpha\ 1$ представлен в исследовании В. Rogers и соавт. (2021) [67]. Для определения $МП$ по данному методу необходимо выполнить тест с повышающейся нагрузкой, отказ в конце теста при этом не является обязательным условием. Данный метод позволяет определить интенсивность $АЭП$, ассоциированную с $LT1$, как интенсивность, соответствующая моменту времени, когда показатель $DFA\ alpha\ 1$ достигнет значения 0,75 (см. рис. 11).



$АЭП$ определён в момент времени, когда значение $DFA\ alpha\ 1$ становится равным 0,75 и продолжает дальнейшее снижение

Рисунок 11 – Пример определения $АЭП$ методом анализа динамики показателя $DFA\ alpha\ 1$ в ступенчатом беговом тесте

Существующие методы определения МП на основе анализа данных ВСР проанализированы в обзоре Zimatore и соавт. (2022) [79].

В 2019 году А.В. Козлов и соавт. опубликовали работу, в которой представлен метод определения АнП по динамике ЧСС во время работы с повышающейся нагрузкой и в процессе восстановления [12]. Данный метод требует обязательного условия – выполнения работы с предельными усилиями испытуемого, сопровождающейся отказом от продолжения теста. Метод получил название “графический” (ГрМ) по причине использования графических построений в первоначальной версии метода. Подробнее о методике определения АнП при помощи ГрМ см. в подразделе 2.2 и 2.3 настоящей работы.

Также существуют методы определения МП, не требующие никакого оборудования, в т.ч. пульсометрического. Они основаны на шкале субъективного восприятия тяжести нагрузки (RPE), представленной в работах шведского психолога Г. Борга. Наиболее интересный вариант, на наш взгляд, подобного метода опубликован N. Fabre и соавт. (2013) [41].

В данном методе использована 100-балльная шкала субъективного восприятия тяжести нагрузки CR100, см. рис. 12 [32].

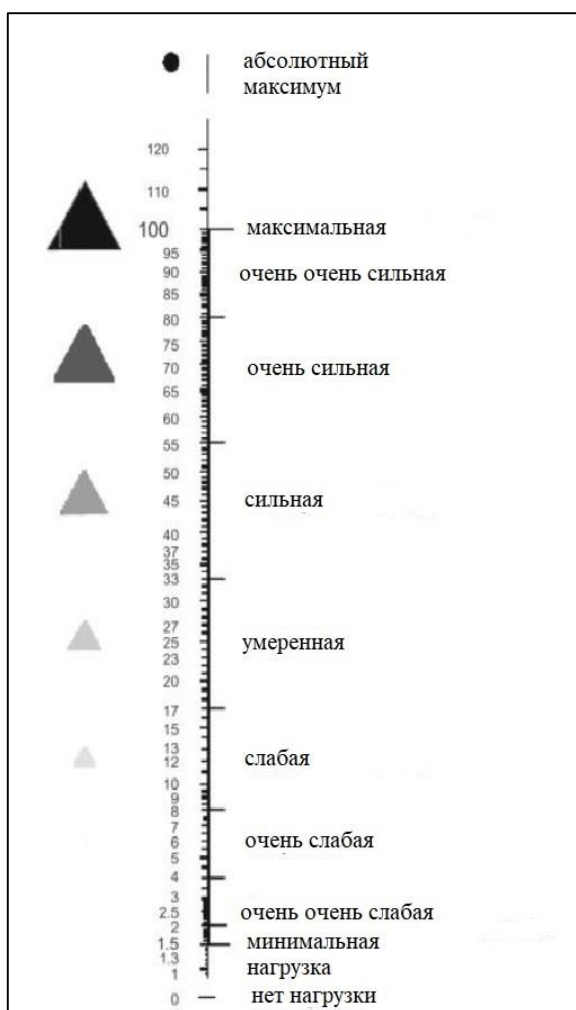


Рисунок 12 – Шкала субъективного восприятия тяжести нагрузки CR100 [41]

N. Fabre и соавт. (2013) предлагают определять АНП следующим образом: испытуемый выполняет тест с повышающейся нагрузкой до отказа, во время теста экспериментатор записывает субъективное восприятие тяжести нагрузки испытуемым по шкале CR100 на каждой ступени нагрузки. На построенной зависимости RPE от времени теста определяется граница быстрой и медленной фазы роста методом D_{max} (сведения о методе D_{max} указаны в подразделе 1.4, табл. 2). Пример определения АНП методом $D_{max_{RPE}}$ см. на рис. 13.

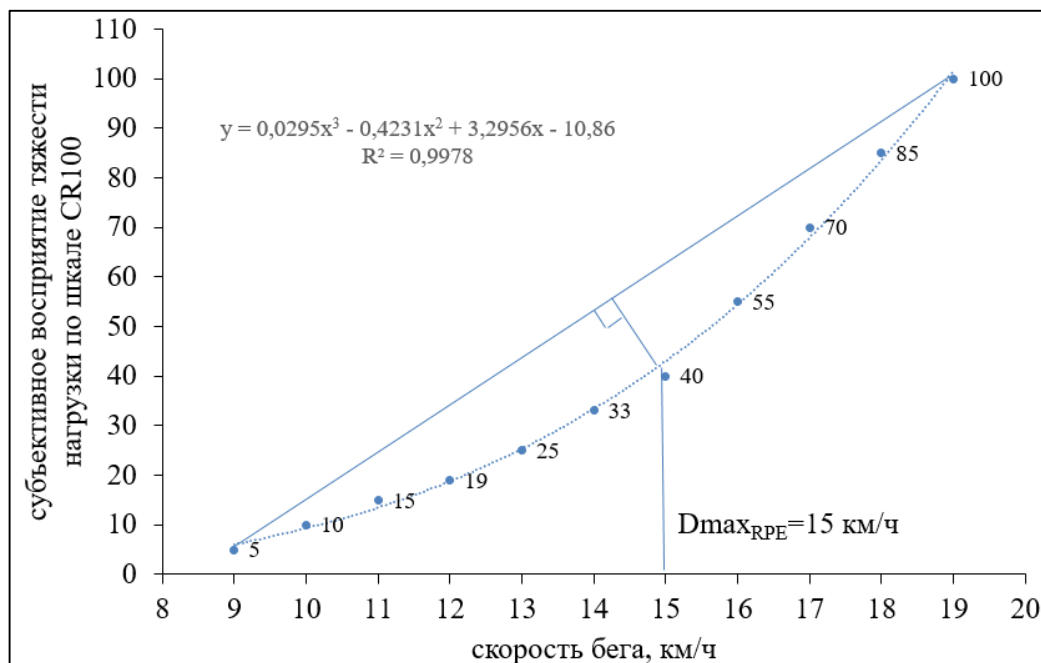


Рисунок 13 – Пример определения АНП методом $D_{max_{RPE}}$

По нашим неопубликованным данным, определение $D_{max_{RPE}}$ не всегда возможно, т.к. в некоторых случаях динамика RPE представляет собой прямую, на которой невозможно выделить медленную и быструю фазу.

Сводную информацию о неинвазивных методах определения МП, не требующих газометрического оборудования, см. в табл. 3.

Таблица 3 – Неинвазивные методы определения МП, не требующие газометрического оборудования

№ п.п.	Наим-е	достоинства	недостатки	ссылки
1	Тест Конкони	Широкая распространённость, в некоторых случаях можно выполнить субмаксимальный тест	Воспроизводимость теста по данным Hnizdil 77% (n=2500), низкая информативность, субъективный характер определения точки перегиба динамики ЧСС	Hnizdil и соавт. (2019), Bodner, (2000), Спиринов и соавт. (2023), Conconi и соавт. (1982)

Окончание таблицы 3

№ п.п.	Наим-е	достоинства	недостатки	ссылки
2	Показатель SD1, рассчитываемый по данным ВСР	Субмаксимальный характер теста, возможно определение АНП в реальном времени	Не всегда воспроизводится, низкая информативность	Novelli и соавт. (2019), Спирин и соавт. (2023)
3	Показатель DFA alpha 1, рассчитываемый по данным ВСР	Субмаксимальный характер теста, возможно определение АЭП в реальном времени	Не всегда воспроизводится, сильная чувствительность метода к артефактам записи RR-интервалов, требуется специализированное приложение для расчёта DFA alpha 1	Rogers и соавт. (2021), Zimatore и соавт. (2022)
4	Графический метод	Воспроизводимость теста 100% [неопубликованные данные авторов, n=120], высокая информативность и объективность метода относительно других неинвазивных методов	Требуется обязательное выполнение максимального теста, необходимость пассивного восстановления 10 минут после окончания работы, зависимость результатов теста от выбора начальной скорости в протоколе нагрузки	А.В. Козлов и соавт. (2019), Спирин и соавт. (2023), Спирин и соавт. (2024)
5	Начало быстрой фазы роста RPE ($D_{\max RPE}$)	отсутствие необходимости в специализированном оборудовании	Не всегда воспроизводится (в некоторых случаях динамика RPE представляет собой прямую) [неопубликованные данные авторов], субъективный характер определения RPE, необходимость выполнения теста до отказа	N. Fabre и соавт. (2013)

1.6 Зоны интенсивности нагрузки

В связи с распространением пульсометрического оборудования в настоящее время широкую популярность среди бегунов-стайеров приобрела концепция определения интенсивности нагрузки по значению ЧСС [86].

По данным нашего поиска, одним из первых, кто предложил использовать значение ЧСС под нагрузкой для нормирования интенсивности выполняемого упражнения был финский физиолог Martti Karvonen. В исследовании Karvonen и соавт. (1957), выполненном на 7-ми бегунах, авторы предложили методику определения интенсивности нагрузки согласно формулы (4) [52]:

$$\text{ЧСС}_{\text{нагр}} = \text{ЧСС}_{\text{покой}} + (\text{ЧСС}_{\text{пик}} - \text{ЧСС}_{\text{покой}}) \cdot K \quad (4)$$

где $\text{ЧСС}_{\text{нагр}}$ – целевое значение ЧСС под нагрузкой; $\text{ЧСС}_{\text{покой}}$ – значение ЧСС после пробуждения в положении лёжа; $\text{ЧСС}_{\text{пик}}$ – пиковый ЧСС, достигнутый в максимальном нагрузочном тесте; K – коэффициент, имеющий следующие значения в различных видах тренировок: 40-60% разминочная или восстановительная тренировка, 60-70% умеренная нагрузка (т.н. “лёгкий” бег), 70-80% аэробная выносливость, 80-90% пороговая тренировка, 90-100% тренировка на развитие МПК [85].

По нашему мнению, по причине использования индивидуального значения $\text{ЧСС}_{\text{покой}}$, подход Karvonen позволяет получать несколько более точные значения зон интенсивности нагрузки по ЧСС, чем использование значения только $\text{ЧСС}_{\text{пик}}$, принятое в других популярных подходах.

В связи с успехами норвежской школы видов спорта на выносливость, а также относительной открытости информации относительно “норвежского” подхода, среди бегунов-стайеров пользуется популярностью шкала интенсивности Olympiatorpen [84]. В данной шкале используется 8 зон интенсивности, из них первые 5 зон – в аэробном диапазоне нагрузки. Оставшиеся 3 зоны в диапазоне анаэробного резерва скорости, т.е. на скорости бега большей, чем минимальная скорость бега, во время которого достигается МПК в ступенчатом тесте (см. табл. 4 и 5).

Таблица 4 – Шкала интенсивности нагрузки Olympiatorpen [84]

Зона интенсивности нагрузки	Приблизительное предельное время под нагрузкой	Дистанция соревновательного темпа бега
Зона 1	-	-
Зона 2	3 часа	-
Зона 3	60 мин	полумарафон
Зона 4	30 мин	10 000 м
Зона 5	15 мин	3000/5000 м
Зона 6	4 мин	800-1500 м
Зона 7	1 мин	200-400 м
Зона 8	15 сек	60-100 м

Таблица 5 – Физиологический эффект тренировок в различных зонах интенсивности по шкале Olympiatoppen [84]

Зона интенсивности нагрузки	Центральная аэробная функция	Периферическая аэробная функция (капилляры, митохондрии, ферменты и пр.)	Анаэробная гликолитическая способность	Анаэробная алактатная способность	Нейромышечная связь
Зона 1	+	++			
Зона 2	++	+++			
Зона 3	+++	+++	+		+
Зона 4	++++	+++	++		++
Зона 5	++++	++	+++		+++
Зона 6	++	+	++++	+	+++
Зона 7	+	+	++	++	++++
Зона 8			+	++++	++++

Примечание: чем больше символов + – тем сильнее эффект нагрузки на соответствующие физиологические системы

S. Seiler и соавт. (2009) описали 5-ти зонную шкалу интенсивности нагрузки в аэробном диапазоне, созданную на базе значения ЧСС_{пик} (см. табл. 6) [68]. Данная шкала получила широкое распространение за счёт применения в спортивных часах типа Garmin, Polar, Suunto и пр.

Таблица 6 – Пульсовые зоны по 5-ти зонной модели Seiler и соавт. (2009) [68]

Зона интенсивности	потребление кислорода в % от МПК	ЧСС в % от ЧСС _{пик}	La, ммоль/л	Продол-ть нагрузки в зоне
Зона 1	45-65	55-75	0,8-1,5	1-6 ч
Зона 2	66-80	75-85	1,5-2,5	1-3 ч
Зона 3	81-87	85-90	2,5-4	50-90 мин
Зона 4	88-93	90-95	4-6	30-60 мин
Зона 5	94-100	95-100	6-10	15-30 мин

Для определения значения ЧСС_{пик}, по нашему мнению, необходимо использовать данные максимального теста с повышающейся мощностью или данные соревнований на дистанциях 1500-10 000 м. Однако, для начинающих физкультурников, особенно в случае наличия противопоказаний по состоянию здоровья прямое определение значения ЧСС_{пик} может быть небезопасно. В этом случае многими авторами рекомендуется использовать регрессионные зависимости для приблизительного предсказания ЧСС_{пик}. Существует множество формул для предсказания ЧСС_{пик}, например, формулы Fox, Tanaka, Geilish, Astrand и др.

Исследование Lach и соавт. (2021), выполненное на основе 3374 максимальных тестов показывает, что отклонение фактического значения ЧСС_{пик} от предсказанного по линейному уравнению может достигать ± 15 уд/мин и более (см. рис. 14) [55].

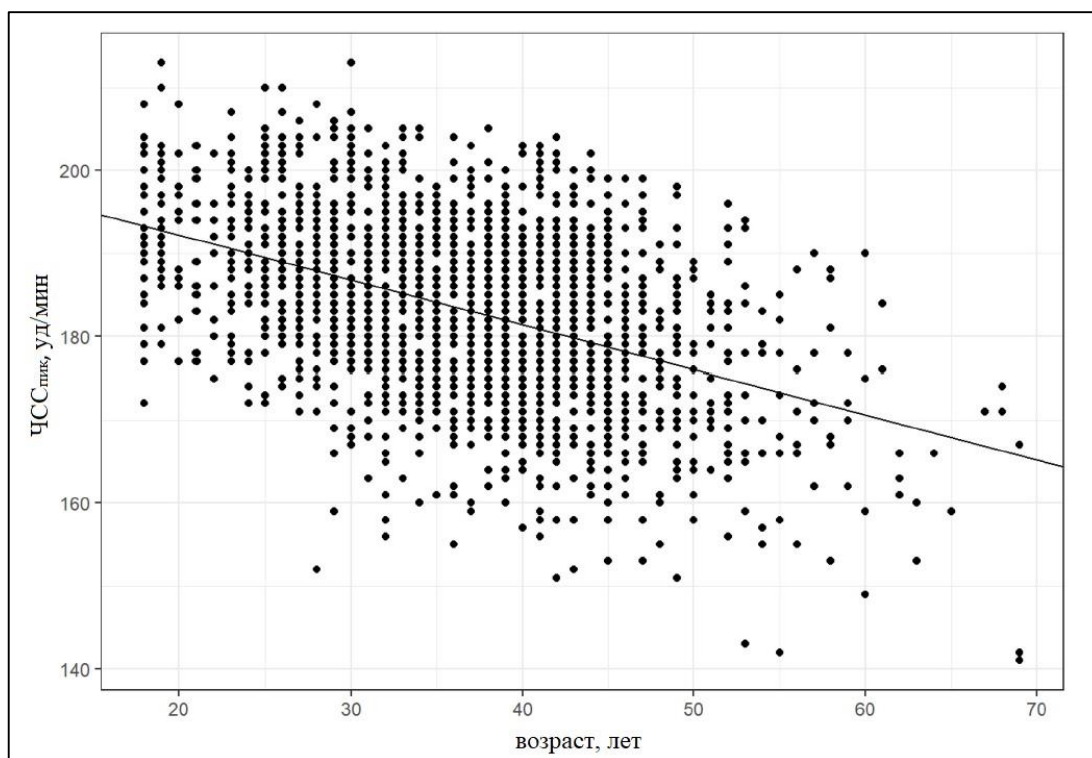


Рисунок 14 – Зависимость значения ЧСС_{пик}, определённого в максимальном ступенчатом тесте от возраста испытуемого (n=3374) [55]

Таким образом, предсказание уровня физиологического “потолка” по значению ЧСС при помощи существующих линейных уравнений возможно выполнить только на приблизительном уровне, с возможной погрешностью около ± 15 уд/мин. С точки зрения практики подобные отклонения значений ЧСС могут привести к работе в неадекватной задачам тренировки зоне интенсивности. Поэтому, для спортсменов из видов спорта на выносливость мы рекомендуем при отсутствии противопоказаний по состоянию здоровья выполнять прямое определение уровня ЧСС_{пик}.

Как видно из табл. 6, Seiler и соавт. предлагают разместить зону 2 “вокруг” уровня АЭП (среднее значения L_a на этом уровне около 2 ммоль/л), а граница зон 3 и 4 проходит по уровню АНП (среднее значения L_a на этом уровне около 4 ммоль/л). Специалисты инновационного центра Олимпийского комитета России «Рекордика» в отчётах о аэробном тестировании предлагают несколько отличающуюся 5-ти зонную модель (см. табл. 7) [81].

Как видно из табл. 7, зоны 2 и 4 находятся вокруг уровня АЭП и АНП, соответственно. Аналогичных правил зонирования будем придерживаться мы в своих рекомендациях по данным аэробных тестирований с определением уровня АЭП, АНП и ЧСС_{пик}.

Таблица 7 – Правила зонирования по 5-ти зонной модели, используемые в ИЦ ОКР «Рекордика»

Зона интенсивности	Правило зонирования
Зона 1	< зоны 2
Зона 2	± 5 уд/мин от ЧСС _{АэП}
Зона 3	> зоны 2, < зоны 4
Зона 4	± 5 уд/мин от ЧСС _{АнП}
Зона 5	> зоны 4, < ЧСС _{пик}

2 Организация и методы исследования

2.1 Выбор лактатного метода определения анаэробного порога

Методика заключается в анализе данных экспериментальных исследований, отобранных по следующим критериям: исследование должно быть проведено на тренированных в видах спорта на выносливость испытуемых с определением значений LT2, полученных различными методами, в том числе методом MLSS. Поиск исследований произведен в феврале 2023 г. в базе данных PubMed за последние 10 лет, поисковый запрос «maximal lactate steady state OR MLSS OR lactate threshold».

Для объединения результатов исследований, выполненных на различных нагрузочных устройствах с указанием интенсивности нагрузки в различных единицах измерения, была рассчитана величина стандартизированной средней разницы (standardized mean difference, далее SMD). SMD между средними значениями интенсивности LT2, определенными различными методами, и средним значением интенсивности эталонного метода MLSS в нашем исследовании служит показателем точности методов определения LT2. Методы определения LT2, в среднем завышающие значение LT2 относительно MLSS, будут иметь положительное значение SMD; методы, в среднем занижающие значение LT2 относительно MLSS, будут иметь отрицательное значение SMD; модуль значения SMD показывает среднее отклонение от MLSS, выраженное в долях от объединенного стандартного отклонения выборок (с учетом коррекции для малых выборок). Метод определения интенсивности LT2, в среднем по выборке из отобранных исследований наиболее близкий к интенсивности MLSS, должен иметь SMD, наиболее близкую к нулю.

Методика расчета SMD (Hedges' g) представлена в работе Е.Ф. Бороховского и Р.М. Бернарда (2013), для расчетов использована фиксированная модель [2].

Все расчеты и графические построения выполнены в MS Excel.

Выявление метода для определения LT2 осуществлялось по следующему критерию: SMD, рассчитанная между выбранным методом определения LT2 и методом MLSS, рассчитанная при объединении результатов всех отобранных исследований по данной теме, должна быть наиболее близкая к нулю.

2.2 Выбор наиболее информативного метода определения анаэробного порога, основанного на измерении сердечного ритма

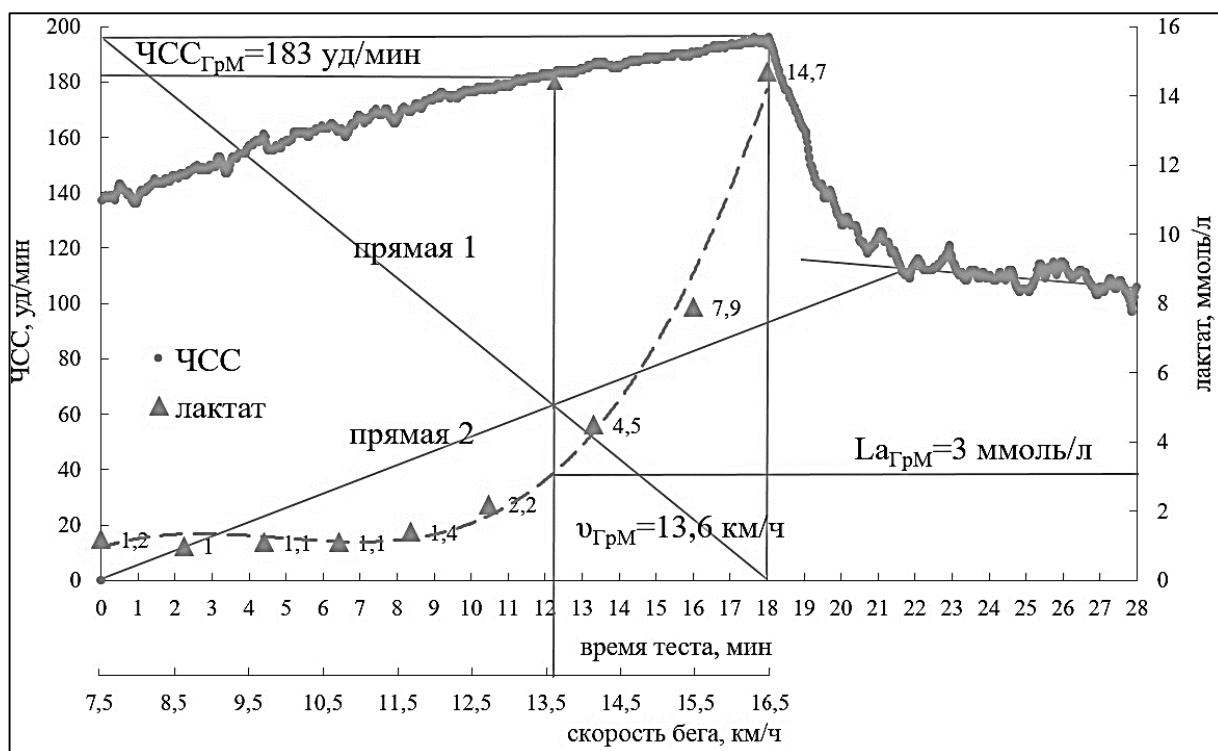
Испытуемые: 11 тренированных бегунов-любителей (1 женщина), средний возраст $30,4 \pm 7,9$ лет, средняя масса тела $70,0 \pm 9,7$ кг ($M \pm SD$). Каждый испытуемый подписал добровольное информированное согласие на участие в исследовании. Протокол нагрузочного тестирования: уклон бегового полотна 1%, начальная скорость 8 км/ч, скорость повышалась на 0,5 км/ч каждую минуту. Пробу крови получали из дистальной фаланги безымянного пальца непосредственно перед тестированием, каждые 2 минуты без остановки бега и в момент отказа испытуемого от продолжения работы. До начала теста испытуемые проводили разминку 5 минут на скорости 5-7,5 км/ч. La определяли при помощи анализатора Nova lactate plus (США). Регистрировали ЧСС и продолжительность сердечных циклов (RR-интервалы). ЧСС регистрировалась каждую секунду. Запись осуществлялась при помощи пульсометра Polar H10 (Финляндия) и приложения HR Monitor (BM innovations GmbH 2018).

В качестве эталонного метода определения АНП ($АНП_{Dmod}$) использовался модифицированный метод D_{max} [35].

АНП по тесту Конкони ($АНП_{TK}$) определялся визуально двумя квалифицированными экспертами независимо друг от друга (пример определения см. на рис. 9). После сверки и обсуждения полученных результатов эксперты приходили к единому мнению относительно значений $АНП_{TK}$ в каждом тесте. Критерием определения $АНП_{TK}$ служило отклонение динамики ЧСС от линейного повышения во время теста со ступенчато повышающейся нагрузкой.

АНП по МВСР ($АНП_{VCP}$) определялся по точке на графике, которая соответствовала достижению стабилизации (выхода на “плато”) показателя SD1 на значениях < 3 мс (см. рис. 10) [19, 58]. Значения SD1 рассчитывались следующим образом: ряд RR-интервалов разбивался на участки по 30 значений, для каждого участка рассчитывалось стандартное отклонение, которое являлось значением показателя SD1. При этом, каждому значению SD1 соответствовало значение скорости бега, соответствующее времени конечного RR-интервала из участка, который использовался для расчёта. Ряд RR-интервалов не подвергался математической обработке с целью исключения возможных артефактов записи.

АНП по графическому методу ($АНП_{ГPM}$) определялся способом, описанным в исследовании А.В. Козлова и соавт. [12]. Пример определения $АНП_{ГPM}$ см. на рис. 15.



Условные обозначения: $v_{ГрМ}$ – скорость бега, соответствующая $АнП_{ГрМ}$; $ЧСС_{ГрМ}$ – ЧСС, соответствующая $АнП_{ГрМ}$; $La_{ГрМ}$ – концентрация лактата, соответствующая $АнП_{ГрМ}$. Штриховой линией показан полином 3-ей степени, аппроксимирующий динамику лактата в тесте

Рисунок 15 – Пример определения $АнП_{ГрМ}$

В нашем исследовании скорость бега линейно зависит от времени, прошедшего от начала теста. Соответствие между временем теста и скоростью бега определялось по зависимости (5). Аналогичная зависимость представлена Д.В. Поповым и соавт. (2014) [18].

$$v(t) = v_0 + \Delta v_{1М}(t - 1) \quad (5)$$

Где $v(t)$ – значение скорости бега v , км/ч, в момент времени t , мин; v_0 – начальная скорость бега в тесте, км/ч; $\Delta v_{1М}$ – повышение скорости за 1 минуту теста, км/ч.

Сравнение информативности методов определения $АнП$, основанных на измерении сердечного ритма, проводилось по величине коэффициентов корреляции, разности показателей $АнП$ по исследуемому и эталонному методу ($M \pm SD$), а также по статистической значимости различий (при $p < 0,05$) между одноименными значениями показателей $АнП$, полученными исследуемыми методами определения $АнП$ и эталонным.

Все расчёты проводились в MS Excel. Ввиду малого размера выборки корреляция рассчитывалась по Спирмену, статистическая значимость различий определялась методом Манна-Уитни.

2.3 Модифицированный графический метод определения метаболических порогов

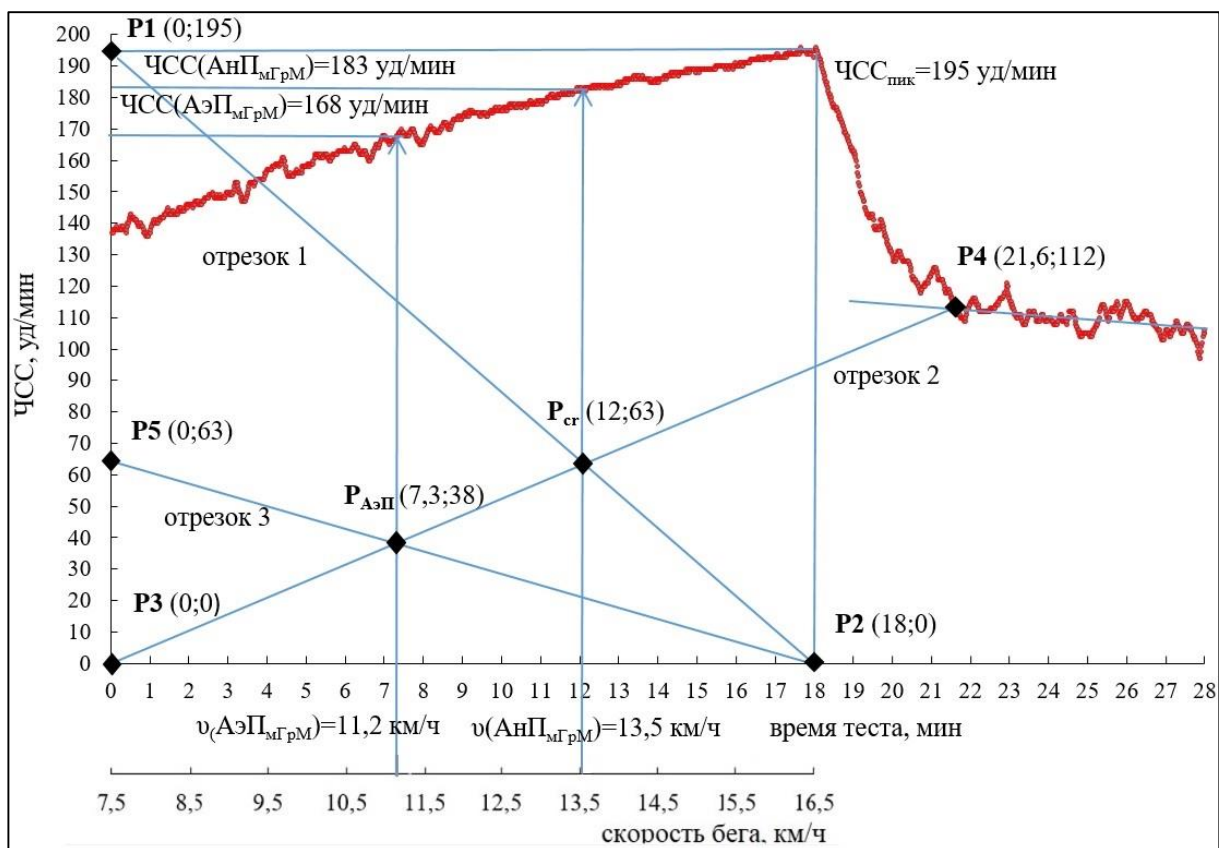
В исследовании участвовало 18 тренированных бегунов-любителей (1 женщина): масса тела $72,8 \pm 8,7$ кг, возраст $31,7 \pm 7,6$ лет, стаж регулярных тренировок на выносливость $4,3 \pm 2,1$ года ($M \pm SD$). Каждый испытуемый подписал добровольное информированное согласие на участие в исследовании. Испытуемые прошли тестирование со ступенчато возрастающей скоростью бега на тредбане с уклоном 1%. Протокол нагрузки: разминка от 5 до 7,5 км/ч в течении 5 минут, начальная скорость теста 8 км/ч, повышение скорости на 0,5 км/ч каждую минуту до отказа испытуемого от продолжения тестирования. La определяли путём пробы крови из дистальной фаланги безымянного пальца каждые 2 минуты без остановки бега и в момент отказа испытуемого от продолжения работы. La определяли при помощи анализатора Nova lactate plus (США). Запись ЧСС осуществлялась при помощи пульсометра Polar H10 (Финляндия) и приложения HR Monitor (BM innovations GmbH 2018).

АЭП по динамике лактата ($AЭП_{La}$) определяли по точке на полиноме 3-ей степени, аппроксимирующей динамику лактата, после которой полином начинает рост относительно линейной зависимости, описывающей динамику лактата в начальный момент теста [Бреслав, 2013]. АнП по лактатной кривой ($АнП_{La}$) определяли при помощи модифицированного метода D_{max} [35].

Модифицированный ГрМ ($мГрМ$) для определения МП основан на ГрМ, предложенном в исследовании А.В. Козлова и соавт. (2019) [12].

АЭП и АнП при помощи $мГрМ$ ($AЭП_{мГрМ}$ и $АнП_{мГрМ}$), определяли по эмпирически разработанной методике (см. рис. 16). Точка P1 наносится на ось ординат, её ордината равна ЧСС на отказе от продолжения работы ($ЧСС_{пик}$). Точка P2 наносится на ось абсцисс, её абсцисса равна времени отказа от продолжения работы в тесте ($t_{пик}$). Точка P3 в начале координат. Точка P4 наносится на пульсограмму в момент восстановления после отказа от продолжения работы, когда первоначальная быстрая динамика снижения ЧСС сменяется медленной линейной фазой. Для облегчения нахождения координат точки P4 можно провести дополнительную прямую, описывающую динамику ЧСС в медленной фазе восстановления. Для определения координат точки P4 запись динамики ЧСС продолжается после отказа не менее 10 минут. В момент восстановления испытуемый не должен выполнять активной физической работы. Отрезок 1 проводится через точки P1 и P2, отрезок 2 – через P3 и P4. Абсцисса точки пересечения отрезков 1 и 2 $P_{сг}$ равна времени (и соответствующей нагрузке) достижения $АнП_{мГрМ}$.

Вышеописанная методика не отличается от описания ГрМ [12]. Модифицированный ГрМ отличается от ГрМ тем, что дополнительная точка P5 наносится на ось ординат, при этом она имеет ординату, равную ординате точки $P_{сг}$. Через точки P5 и P2 проводится отрезок 3. Точка пересечения отрезков 2 и 3 ($P_{AЭП}$) определяет момент времени (и соответствующую нагрузку) достижения $AЭП_{мГрМ}$.



Примечание: В данном примере отказ от продолжения работы произошёл спустя $t_{\text{пик}}=18$ минут от начала теста, скорость бега на отказе $v_{\text{пик}}=16,5$ км/ч, ЧСС на отказе $\text{ЧСС}_{\text{пик}}=195$ уд/мин. При этом скорость бега на АнП_{МГрМ} 13,5 км/ч, на АЭП_{МГрМ} 11,2 км/ч. Значения ЧСС определяются по динамике ЧСС в соответствии со скоростями бега на метаболических порогах

Рисунок 16 – Пример определения АЭП_{МГрМ} и АнП_{МГрМ}, а также соответствующих значений ЧСС

Соответствие между временем теста и скоростью бега определялось по зависимости (5).

Все расчёты и графические построения выполнялись в MS Excel. Ввиду малого размера выборки коэффициенты корреляции ρ рассчитывались по Спирмену, статистическая значимость различий определялась при помощи U-критерия Манна-Уитни.

3 Результаты исследования и обсуждение

3.1 Оптимальный метод определения лактатного анаэробного порога

Поисковый запрос по ключевым словам позволил выделить 2313 публикаций. После изучения названий и аннотаций данных публикаций определено, что критериям отбора соответствуют 7 публикаций: J.G. Pallarés и соавт. (2016), I. Garcia-Tabar и соавт. (2018), I. Arratibel-Imaz и соавт. (2015), V. Cerezuela-Espejo и соавт. (2018), K. Płoszczyca и соавт. (2020), N.A. Jamnick и

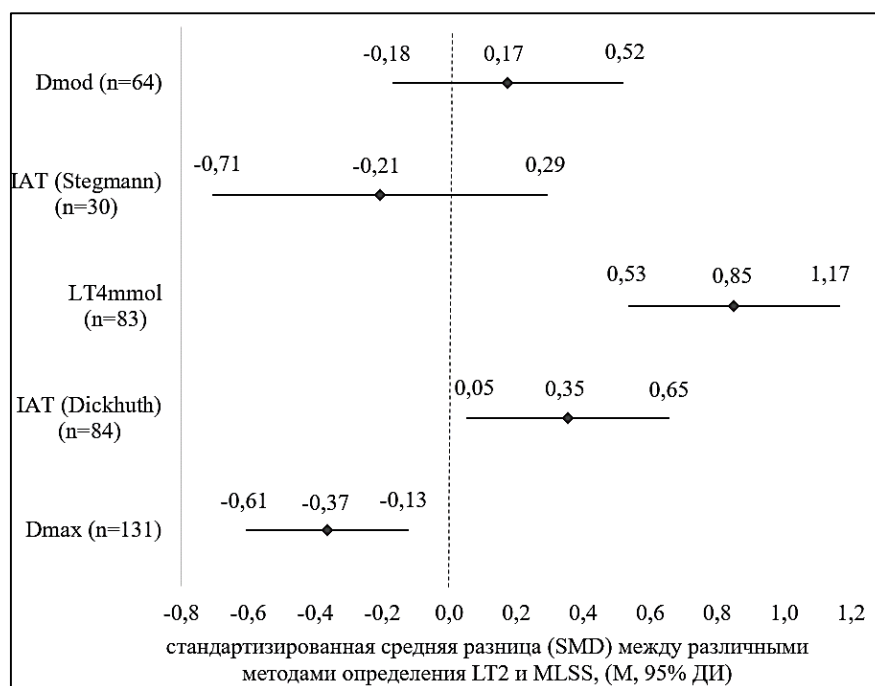
соавт. (2018), L. Zwingmann и соавт. (2018) [28, 34, 43, 48, 59, 61, 80]. Всего в данных исследованиях участвовал 131 испытуемый.

Из отобранных семи исследований собраны данные о количестве испытуемых, типе нагрузочного устройства, значениях интенсивности LT2, определённых методами Dmax, IAT (Dickhuth), LT_{4mmol}, IAT (Stegmann) и Dmod, а также данные о значении интенсивности MLSS. Вышеуказанные сведения приведены в табл. 8.

Таблица 8 – Данные о значениях интенсивности LT2 (M±SD), определённых различными методами, собранные из семи отобранных экспериментальных исследований

Источник	Кол-во исп-х	нагр-ое у-во	Dmax	IAT (Dickhuth)	LT _{4mmol}	IAT (Stegmann)	Dmod	MLSS	Единицы изм-ия
J.G. Pallarés и соавт. (2016) [22]	14	велoэрг-р	257±40	288±37	304±40	-	-	255±32	Вт
I. Garcia-Tabar и соавт. (2018) [23]	15	трeдбан	13,2±1,2	15,9±1,4	-	-	-	15±1,1	км/ч
I. Arratibel-Imaz и соавт. (2015) [24]	16	велoэрг-р	253,7±24,9	253,6±33,8	276,1±49,1	240,3±31	-	251,6±32,7	Вт
V. Cerezueta-Espejo и соавт. (2018) [25]	22	трeдбан	14,1±1,6	14,3±1,9	14,5±2,1	-	-	13,5±1,1	км/ч
K. Płoszczyca и соавт. (2020) [26]	14	велoэрг-р	296,7±22,3	-	341,7±32,1	297,1±24,3	330±32,5	298,3±21,2	Вт
N.A. Jamnick и соавт. (2018) [27]	17	велoэрг-р	232±36	254±41	291±42	-	267±39	264±39	Вт
L. Zwingmann и соавт. (2018) [28]	15	велoэрг-р	204±26	-	-	-	231±35	229±38	Вт
L. Zwingmann и соавт. (2018) [28]	18	трeдбан	12,6±0,9	-	-	-	13,2±1,4	13,6±1,4	км/ч

На основании экспериментальных данных, собранных в табл. 8, было рассчитано значение SMD между значениями интенсивности LT2, определёнными различными методами и значением интенсивности LT2 по методу MLSS. Результаты расчёта см. на рис. 17.



Критерии различных методов и примеры определения см. в табл. 2 и рис. 8. В скобках указано суммарное количество испытуемых во всех отобранных исследованиях, в которых использовался данный метод. Штриховая линия показывает нулевое значение SMD

Рисунок 17 – SMD (M, 95% ДИ) между различными методами определения LT2 и методом MLSS

Как видно из рис. 17, метод Dmod наиболее близок к методу MLSS (значение SMD ближе к нулю среди всех рассмотренных методов), однако метод Dmod применяется только в предельных протоколах (требуется максимальный тест). Вслед за методом Dmod, ближе к MLSS метод IAT (Stegmann). Этот метод, по сведениям авторов метода Н. Stegmann и соавт. (1981), не требует предельной работы (можно провести субмаксимальный тест) [70]. Однако, по данным рис. 17 он менее точен, чем Dmod, при этом, требует дополнительных измерений во время восстановления (см. рис. 8).

Также из рис. 17 видно, что метод $LT_{4\text{mmol}}$, судя по значению SMD, в среднем завышает значение интенсивности LT2 относительно значения MLSS на большую величину, чем другие проанализированные методы. Эти данные подтверждаются сведениями из обзора О. Faude и соавт. (2009), обзора V. Billat и соавт. (2003), экспериментальным исследованием (n=162) Arratibel-Imaz и соавт. (2015), а также неопубликованными данными авторов настоящей работы [28, 30, 42].

3.2 Наиболее информативный метод определения анаэробного порога, основанный на измерении сердечного ритма

У группы испытуемых (n=11) на отказе: скорость бега ($v_{\text{пик}}$) – $18,2 \pm 1,3$ км/ч, концентрация лактата ($La_{\text{пик}}$) – $11,1 \pm 3,5$ ммоль/л, ЧСС_{пик} – $187,6 \pm 8,8$ уд/мин (M \pm SD).

АнП_{ВСП} определён в 91% случаев (10 тестов из 11). АнП_{ТК}, АнП_{ГрМ} и АнП_{Dmod} определили в 100% случаев (11 тестов из 11).

В таблице 9 представлены значения показателей, соответствующих АнП, определённому в ТК, МВСП, ГрМ и Dmod, а также статистическая значимость различий (при $p < 0,05$), коэффициенты корреляции между парными значениями показателей АнП, полученными исследуемыми и лактатными методами.

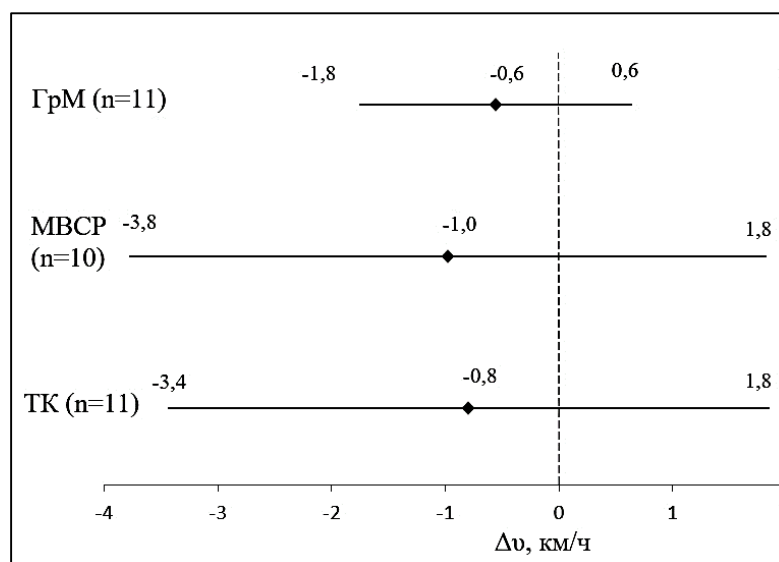
Таблица 9 – Статистические данные ($M \pm SD$), полученные при сравнении исследуемых и лактатного метода

Метод	n	v, км/ч	ЧСС, уд/мин	La, ммоль/л
АнП _{ТК} АнП _{Dmod} ns, s	11	14,6±1,4 15,4±1,3 s	168,6±16,3 170,8±12,3 ns	3,2±2,5 3,8±0,9 s
АнП _{ВСП} АнП _{Dmod} ns, s	10	14,2±1,8 15,1±1,0 ns	165,5±10,8 169,7±12,3 ns	3,0±1,5 3,8±0,9 ns
АнП _{ГрМ} АнП _{Dmod} ns, s	11	14,9±1,1 15,4±1,3 ns	168,1±10,6 170,8±12,3 ns	3,0±0,8 3,8±0,9 s
$r_{ТК}$ (p)	11	0,51 ($p > 0,1$)	0,92 ($p < 0,01$)	0,31 ($p > 0,1$)
$r_{ВСП}$ (p)	10	0,66 ($p < 0,05$)	0,72 ($p < 0,05$)	0,28 ($p > 0,1$)
$r_{ГрМ}$ (p)	11	0,85 ($p < 0,01$)	0,98 ($p < 0,01$)	0,65 ($p < 0,05$)

Примечание: n – количество тестов, использованных для расчётов; $r_{ТК}$ – коэффициенты корреляции между показателями АнП_{ТК} и АнП_{Dmod}; $r_{ВСП}$ – коэффициенты корреляции между показателями АнП_{ВСП} и АнП_{Dmod}, $r_{ГрМ}$ – коэффициенты корреляции между показателями АнП_{ГрМ} и АнП_{Dmod}; La – концентрация лактата в капиллярной крови; (p) – значимость коэффициентов корреляции; ns – незначимые различия при $p < 0,05$; s – значимые различия при $p < 0,05$.

В табл. 9 показано: значения La на уровнях АнП_{ТК} и АнП_{ГрМ} имеют значимые различия при $p < 0,05$ со значениями La на уровне АнП_{Dmod}. Значения v на уровне АнП_{ТК} имеют значимые различия при $p < 0,05$ со значениями v на уровне АнП_{Dmod}. Остальные показатели исследуемых методов не имеют значимых различий при $p < 0,05$ с одноимёнными показателями эталонного метода. Взаимосвязь всех показателей на уровне АнП_{ГрМ} с одноимёнными показателями на уровне АнП_{Dmod} сильнее, чем у других исследованных методов.

На рис. 18 представлена диаграмма, демонстрирующая 95% доверительный интервал (ДИ) разности между скоростью бега (Δv) на АнП, определённом исследуемыми и эталонными методами.



Штриховой линией показано нулевое значение разности

Рисунок 18 – Δv между показателями АНП, определёнными исследуемыми и лактатным методами (M, 95% ДИ)

Как видно из рис. 18, ГрМ имеет наименьшую разность с лактатным методом Dmod по сравнению с другими исследуемыми методами: вариационный ряд ГрМ ближе к нулевой разности.

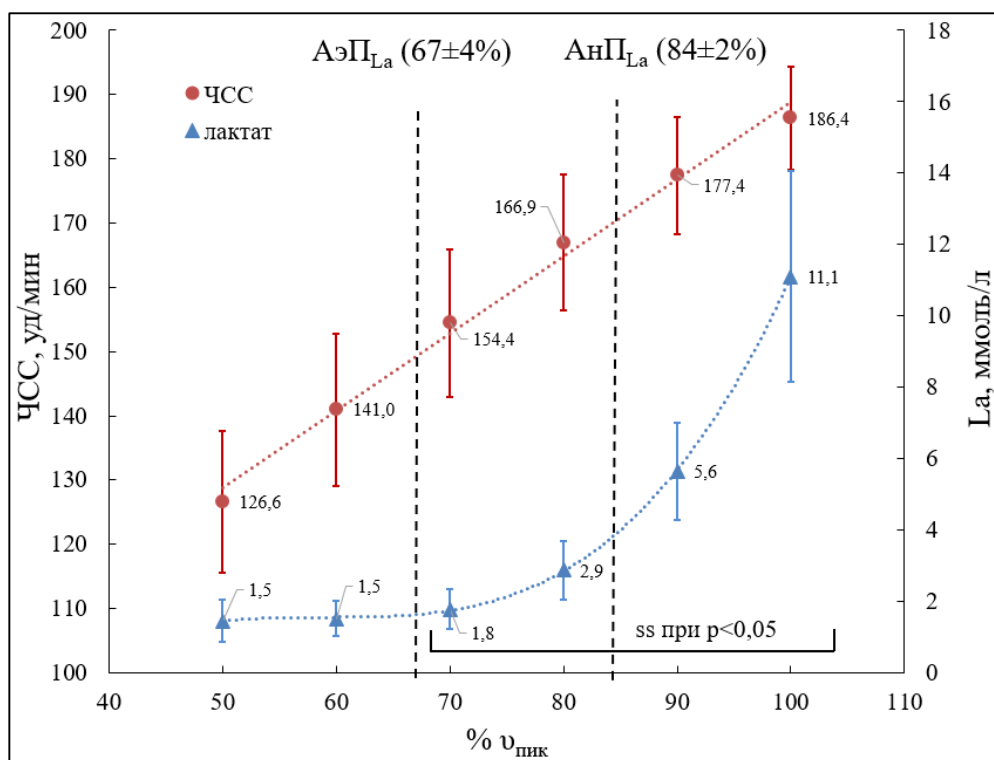
3.3 Обоснование модифицированного графического метода определения метаболических порогов

На рис. 19 приведена усреднённая динамика ЧСС и La в зависимости от доли $v_{\text{пик}}$, определённая в ступенчатых тестах (n=18).

В табл. 10 приведены показатели характеристик работоспособности испытуемых, определённых различными методами по результатам теста ($M \pm SD$, n=18). Данные представлены по скорости бега (v), ЧСС, La.

В таблице 11 представлены значения показателей, соответствующих МП, определённых при помощи динамики La и мГрМ, а также статистическая значимость различий, коэффициенты корреляции между парными значениями показателей, полученных различными методами.

В таблице 11 показано: значения La на уровне АНП_{мГрМ} имеют значимые различия при $p < 0,05$ с соответствующими парными значениями на уровне АНП_{La}. Остальные показатели мГрМ и лактатных методов определения МП не имеют значимых различий при $p < 0,05$. Корреляционная взаимосвязь между уровнями АЭП_{мГрМ} и АЭП_{La} сильная по всем показателям. Корреляционная взаимосвязь между уровнями АНП_{мГрМ} и АНП_{La} от средней до очень сильной.



Примечание: планки погрешностей равны $\pm SD$

Рисунок 19 – Усреднённая динамика ЧСС и La в зависимости от скорости бега на отказе $v_{пик}$ (n=18)

Таблица 10 – Показатели характеристик работоспособности испытуемых, определённые различными методами по результатам теста ($M \pm SD$, n=18)

показатель	v, км/ч	ЧСС, уд/мин	La, ммоль/л
АЭП _{La}	11,9±1,1	150,4±11,7	1,6±0,5
АНП _{La}	15,1±1,3	172,6±10,8	3,9±0,8
АЭП _{МГрМ}	11,8±0,8	149,1±11,4	1,6±0,5
АНП _{МГрМ}	14,5±1,1	168,6±9,6	3,1±0,7
отказ	17,9±1,4	187,2±8,6	11,1±2,9

Таблица 11 – Статистические данные ($M \pm SD$, n=18), полученные при сравнении МГрМ и лактатных методов определения МП

показатель	v, км/ч	ЧСС, уд/мин	La, ммоль/л
АЭП _{МГрМ}	11,8±0,8	149,1±11,4	1,6±0,5
АЭП _{La}	11,9±1,1	150,4±11,7	1,6±0,5
$\rho_{АЭП}$ (p)	0,75 (p<0,01)	0,86 (p<0,01)	0,84 (p<0,01)
ss, ns	ns	ns	ns
АНП _{МГрМ}	14,5±1,1	168,6±9,6	3,1±0,7
АНП _{La}	15,1±1,3	172,6±10,8	3,9±0,8
$\rho_{АНП}$ (p)	0,91 (p<0,01)	0,93 (p<0,01)	0,58 (p<0,05)
ss, ns	ns	ns	ss

Примечание: $\rho_{АНП}$ – коэффициенты корреляции между показателями АНП_{МГрМ} и АНП_{La}; $\rho_{АЭП}$ – коэффициенты корреляции между показателями АЭП_{МГрМ} и АЭП_{La}; (p) – значимость коэффициентов корреляции; ns – незначимые различия при p<0,05; ss – значимые различия при p<0,05

На рис. 20-22 представлены диаграммы, демонстрирующие 95% доверительный интервал (ДИ) *разности* между скоростями бега (Δv), ЧСС (Δ ЧСС) и концентрацией лактата (Δ La) на уровнях МП, определённых при помощи ГрМ и соответствующих методов, где МП определялись по динамике La. На всех рисунках штриховой линией показано нулевое значение Δv .

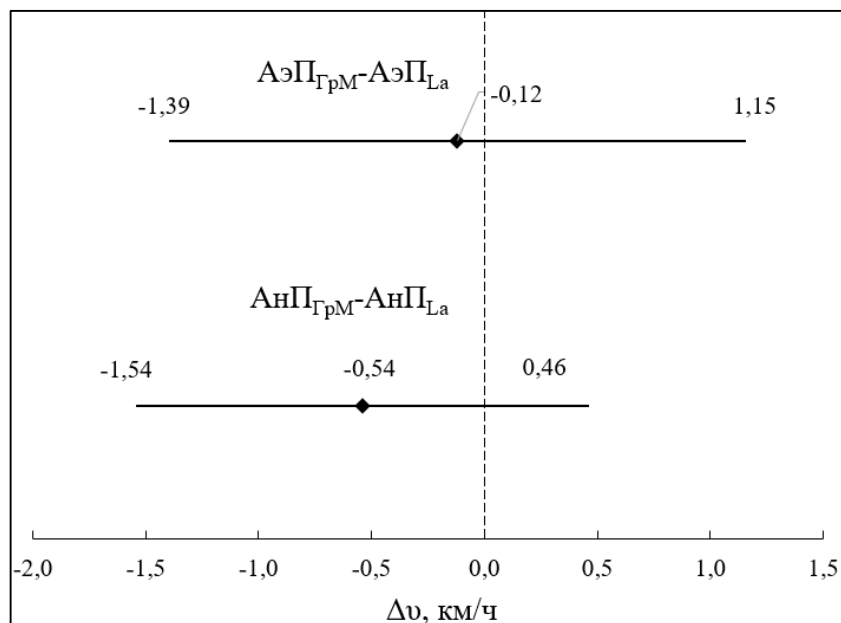


Рисунок 20 – Δv между уровнями МП, определёнными ГрМ и лактатными методами (М, 95% ДИ)

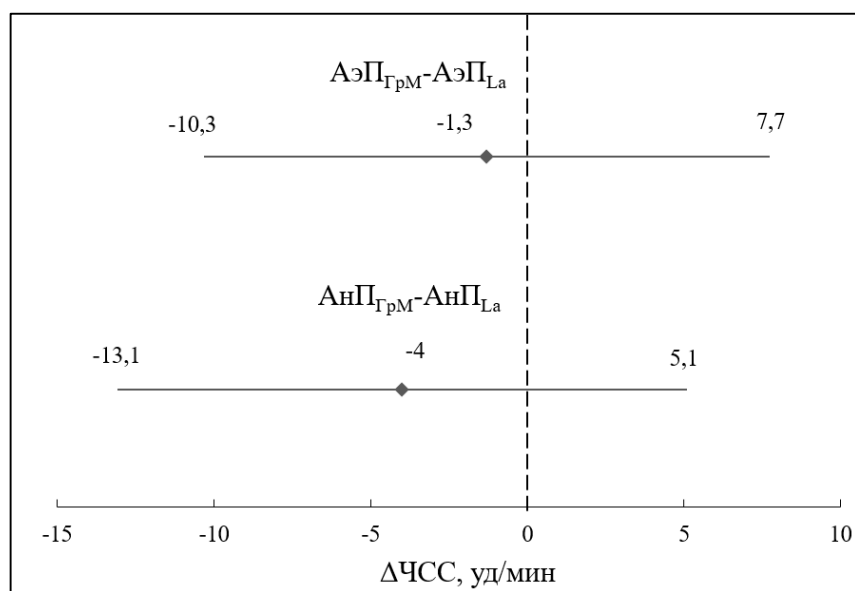


Рисунок 21 – Δ ЧСС между уровнями МП, определёнными ГрМ и лактатными методами (М, 95% ДИ)

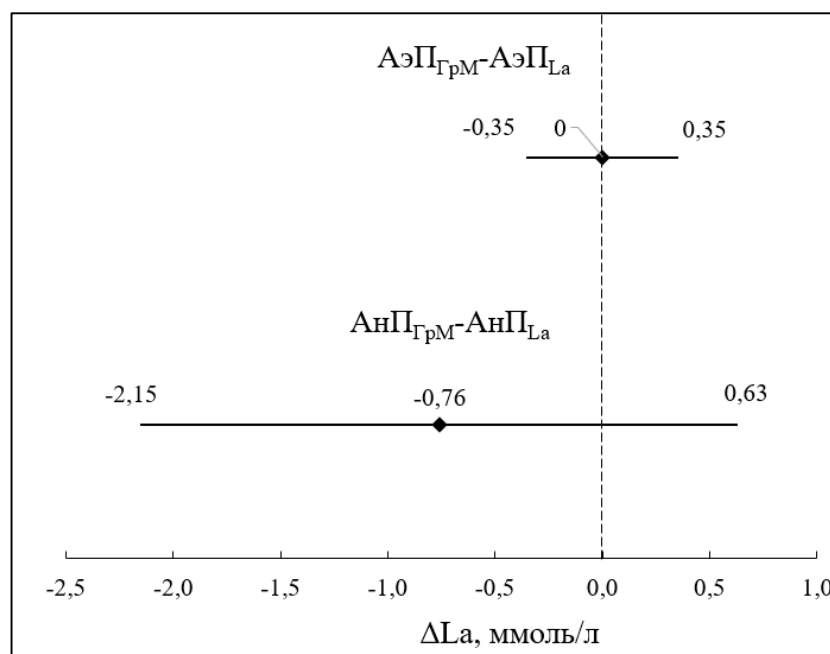


Рисунок 22 – ΔLa между уровнями МП, определёнными ГрМ и лактатными методами (М, 95% ДИ)

На рис. 20 показано, что в 95% случаев скорость бега на АЭПГрМ отличается от скорости бега на АЭПЛа в пределах от -1,39 до 1,15 км/ч. На рис. 21 и 22 показано, что ЧСС на данных уровнях отличается в пределах от -10,3 до 7,7 уд/мин, Ла от -0,35 до 0,35 ммоль/л.

3.4 Обсуждение результатов исследования

Промежуточным результатом нашего исследования является обоснованный выбор метода определения лактатного АНП, наиболее близкого к MLSS. По нашим данным это модифицированный метод Dmax (Dmod).

Анализ результатов нашего исследования позволяет сделать вывод – ГрМ наиболее информативный метод определения АНП из трёх рассмотренных методов, основанных на измерении сердечного ритма во время бега. Данный метод показал наименьшие различия с лактатным методом Dmod (см. табл. 9 и рис. 18).

Теоретические обоснования метода Конкони, особенно использованный протокол определения лактатного АНП, описанный F. Conconi и соавт. (1982), подвергаются критике авторами с 80-х годов [56]. В частности, J. Hnizdil и соавт. (2019) отмечают, что физиологическая причина отклонения динамики ЧСС от ее линейного повышения в ступенчатом тесте пока не установлена, существуют лишь различные предположения, ни одно из которых не нашло однозначного подтверждения [46].

Вероятно, в некоторых случаях появление точки перегиба динамики ЧСС может быть следствием особенностей протокола повышения нагрузки. В полевом тестировании F. Conconi скорость повышалась примерно на 0,5 км/ч каждые 200 м [38]. Участвовали высококвалифицированные бегуны, которые в

конце теста могли пробежать ступень нагрузки за 29-30 с. В таком протоколе длительность ступеней нагрузки постоянно сокращалась и на определенных уровнях скорости для некоторых спортсменов, возможно, была не достаточной для того, чтобы ЧСС выходила на стационарный режим, соответствующий этой скорости.

Однако, в обзоре концепций точки перегиба динамики ЧСС М.Е. Vodner и Е.С. Rhodes (2000) сделано заключение, что появление данной точки во время теста – это реально существующий биологический феномен, а не только следствие протокола теста. В качестве возможных физиологических причин данного феномена авторы предполагают различные механизмы, но ни одна из этих гипотез не является доминирующей [31].

Наше исследование показало субъективность в определении точки перегиба динамики ЧСС, по которой определяется $АнП_{ТК}$: данные о значениях $АнП_{ТК}$, полученные независимо двумя квалифицированными экспертами, не всегда совпадают друг с другом.

Таким образом, информативность ТК может зависеть от спортивного уровня испытуемых, используемого протокола теста, субъективности исследователей при определении $АнП_{ТК}$.

МВСП теоретически основывается на постепенном преобладании активности симпатической нервной системы над парасимпатической (по мере увеличения интенсивности нагрузки) и в зависимости от этого изменением значений показателей вариабельности сердечного ритма [58]. Однако, в нашем исследовании в 1-м случае из 11 нам не удалось определить $АнП_{ВСП}$ по причине того, что показатель $SD1$ не продемонстрировал стабильного снижения (выхода на “плато”) <3 мс вплоть до момента отказа от продолжения работы. Возможно, это связано с индивидуальными физиологическими особенностями конкретного испытуемого. По аналогичной причине в исследовании F.I. Novelli и соавт. в 1 случае из 68 не удалось определить $АнП_{ВСП}$ [58].

Кроме того, информативность МВСП, по нашему мнению, может зависеть от выбранного способа расчёта показателя $SD1$ (количества RR-интервалов, используемых для расчёта единичного значения $SD1$, метода фильтрации значений RR-интервалов для исключения артефактов записи).

Следует отметить, что теоретически у МВСП и ТК есть техническая возможность определять $АнП$ в субмаксимальном тесте – современное программное обеспечение это позволяет.

Основной результат нашего исследования – это разработка и обоснование мГрМ, позволяющего определить уровни МП у бегунов-стайеров на основе однократного максимального теста. Это позволит достигнуть цели исследования, ведь определение уровня $АЭП$, $АнП$ и $v_{пик}$ позволит оценить аэробную выносливость и определить зоны интенсивности различных видов тренировок у бегунов-стайеров.

Как видно из табл. 11 и рис. 20-22, МП, определённые при помощи мГрМ, с указанным уровнем отклонений близки к лактатным МП. По нашему мнению,

тест по мГрМ не сможет заменить лабораторный лактат-тест, однако, может служить ему альтернативой в случае отсутствия доступа к такому тестированию.

Как видно из табл. 11 и рис. 22 значения La сильно коррелируют, не имеют статистически значимых различий и отличаются в 95% случаев на величину от -0,35 до 0,35 ммоль/л между уровнями $A\dot{V}O_{2\text{мГрМ}}$ и $A\dot{V}O_{2\text{La}}$. Поэтому уровень $A\dot{V}O_{2\text{мГрМ}}$, по нашему мнению, можно использовать в качестве верхнего уровня интенсивности низкоинтенсивных тренировок (НИТ) у бегунов-любителей. Такая небольшая величина отличий между уровнями $A\dot{V}O_{2\text{мГрМ}}$ и $A\dot{V}O_{2\text{La}}$ по La в нашем исследовании объясняется тем, что как правило, оба уровня попадали в зону медленного изменения величины La .

Как видно из табл. 11, значения La на уровнях $A\dot{V}O_{2\text{мГрМ}}$ и $A\dot{V}O_{2\text{La}}$ имеют между собой статистически значимые различия при $p < 0,05$. Данные результаты говорят о том, что на уровне $A\dot{V}O_{2\text{мГрМ}}$ мощность $AN\dot{G}$ значимо ниже, чем на уровне $A\dot{V}O_{2\text{La}}$. По нашим данным ($n=18$), начало быстрой фазы накопления La (т.е. достижение уровня $A\dot{V}O_{2\text{La}}$) происходит на скорости бега $103,7 \pm 3,5\%$ ($M \pm SD$) от уровня $A\dot{V}O_{2\text{мГрМ}}$. По нашему мнению, уровень $A\dot{V}O_{2\text{мГрМ}}$ можно использовать в качестве нижнего уровня интенсивности высокоинтенсивных тренировок (ВИТ), в большинстве случаев превышая данный уровень в рабочих интервалах во время интервальных тренировок на 5-10% (при расчёте по скорости бега).

Предположительный принцип работы мГрМ можно описать следующим образом. Как показано в исследовании Н.И. Волкова и соавт. (2003), пульсовые стоимости работы и восстановления очень сильно коррелируют с энергетическими затратами во время теста и в период восстановления [7]. По мнению авторов ГрМ, площади треугольников, отсекаемых отрезками 1 и 2 относительно оси абсцисс, должны отражать уровень аэробных и анаэробных затрат энергии во время теста, соответственно [12].

В нашем исследовании площадь треугольника, отсекаемого отрезком 2 (см. рис. 16), сильно и значимо коррелирует с объёмом пульсового долга за 5 минут восстановления ($\rho=0,80$, $p < 0,01$, $n=18$), а также значимо и умеренно коррелирует с показателем $La_{\text{пик}}$ на отказе ($\rho=0,57$, $p < 0,05$, $n=18$). С некоторой условностью (связанной с различиями в объёме циркулирующей крови у испытуемых), показатель $La_{\text{пик}}$ может отражать работу, произведенную $AN\dot{G}$ за время теста.

Мы предполагаем, что угловые коэффициенты отрезков 1 и 2 относительно оси абсцисс отражают средние скорости аэробных и анаэробных затрат энергии во время теста, соответственно. Точка пересечения отрезков 1 и 2 ($P_{\text{ср}}$ на рис. 16), по нашему мнению, определяет момент времени, когда эти скорости равны. Ордината точки $P_{\text{ср}}$, вероятно, отражает равновесный уровень La , который поддерживается при равенстве скоростей образования и утилизации лактата. Подтверждением этого, на наш взгляд, является сильная и значимая корреляция между значением ординаты точки $P_{\text{ср}}$ и значением La на уровне $A\dot{V}O_{2\text{La}}$ по нашим данным ($\rho=0,71$, $p < 0,01$, $n=18$). Равенство скоростей выделения и утилизации лактата – основной критерий достижения лактатного $A\dot{V}O_{2\text{п}}$ [42, 64].

Таким образом, по результатам максимального тестирования с использованием широко доступного пульсометрического оборудования, возможно определить три уровня интенсивности нагрузки у бегунов-стайеров: $A\dot{V}O_{2\text{мГрМ}}$, $An\dot{V}O_{2\text{мГрМ}}$ и $v_{\text{пик}}$. Уровень $A\dot{V}O_{2\text{мГрМ}}$, по нашему мнению, можно рекомендовать к использованию как верхний уровень интенсивности НИТ, уровень $An\dot{V}O_{2\text{мГрМ}}$ как нижний уровень интенсивности ВИТ, а значение $v_{\text{пик}}$ позволит ранжировать спортсменов по интегральному уровню работоспособности на момент тестирования.

3.5 Ограничения и дальнейшие направления исследований

По нашему мнению, основным ограничением нашего исследования является то, что методика определения $A\dot{V}O_{2\text{мГрМ}}$ разработана эмпирически и к настоящему времени не имеет чёткого физиологического обоснования. Нам представляется вероятным, что при выполнении тестирований среди спортсменов других специализаций, не столь тесно связанных с развитием аэробной выносливости, как наши испытуемые, описанный выше метод определения $A\dot{V}O_{2\text{мГрМ}}$ будет иметь информативность (валидность) на менее значимом уровне. В настоящее время, без проведения дополнительных исследований, мы не можем рекомендовать мГрМ для определения МП среди широкого круга спортсменов.

В качестве ограничения при использовании предлагаемого мГрМ можно назвать то, что данный метод требует обязательного тестирования до предела физических возможностей испытуемого. Это ограничивает сферу применения лишь подготовленными в отношении аэробной выносливости спортсменами. Также требуется обязательное использование протоколов с *равномерным* ростом мощности в тесте.

Мы считаем, что являются перспективными следующие направления дальнейших исследований по данной тематике:

1. Определение коэффициента корреляции между уровнями МП по мГрМ в тесте и ретесте, выполненном через 1-2 недели после теста.
2. Сравнение уровней МП, определённых при помощи газометрических методов и при помощи мГрМ на тренированных в отношении аэробной выносливости испытуемых.
3. Разработка алгоритма в MS Excel и приложения для смартфона для автоматизированного расчёта уровня МП по пульсограмме, полученной в результате ступенчатого максимального теста.

По нашему мнению, реализация п. 3 из списка выше позволит сделать метод объективным. В настоящее время процедура нахождения координат точки P4 (см. рис. 16) выполняется в MS Excel вручную при помощи графических построений. При этом линейный тренд медленной фазы пульсового долга проводится “на глаз”. Таким образом, координаты точки P4 зависят от субъективных факторов. Ситуация осложняется наличием случаев, когда динамика ЧСС во время восстановления после теста плавно убывает без

видимого “излома” (см. рис. 23). Это является ограничением существующей методики мГрМ.

Предположительно, одним из вариантов нахождения координат точки P4 расчётным путём может быть использование метода Dmax (см. пример на рис. 23). Метод заключается в аппроксимации динамики ЧСС до полинома 3-ей степени (показан красным пунктиром на рис. 23) и нахождении точки пересечения полинома с наиболее длинным перпендикуляром, проведённым от отрезка, соединяющего начало и конец полинома. По динамике ЧСС, находящейся правее точки Dmax проводится линейный тренд (на рис. 23 показан оранжевой линией). Координаты точки P4 определяются по первому пересечению (минимальное значение абсциссы) динамики ЧСС и линии тренда. Для использования данного метода необходимо стандартизировать продолжительность динамики ЧСС во время восстановления, которое используется для расчёта (на примере в рис. 23 продолжительность составляет 10 мин).

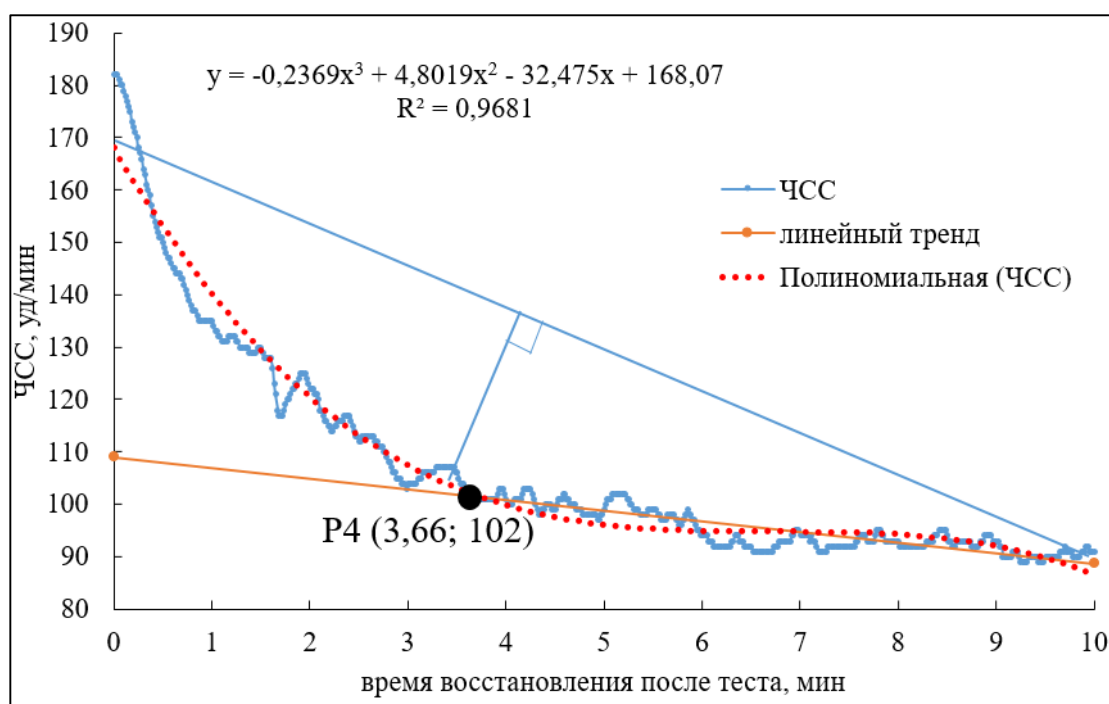


Рисунок 23 – Пример определения координат точки P4 (отмечена черным закрашенным кругом) при помощи метода Dmax в случае отсутствия явного “излома” на динамике ЧСС во время восстановления

Определение координат точки P4 расчётным путём позволит описать отрезок 2 (см. рис. 16) в виде линейного уравнения вида $y=ax+b$ по известным координатам двух точек на отрезке. Аналогично можно описать отрезки 1 и 3 (см. рис. 16). Это позволит находить координаты точек P_{АЭП} и P_{сг} при помощи решения линейного уравнения на нахождение точки пересечения двух прямых. Абсциссы данных точек укажут уровень АЭП_{мГрМ} и АнП_{мГрМ}, соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В случае наличия доступа к лактатным измерениям для определения анаэробного порога на тренированных в отношении аэробной выносливости испытуемых оптимально использовать модифицированный метод D_{max} . Данный метод не требует многократного тестирования и позволяет получать результат, в среднем наиболее близкий (из рассмотренных в исследовании методов) к эталонному методу MLSS.

2. Графический метод является наиболее информативным методом определения анаэробного порога, основанным на измерении сердечного ритма в беге среди трёх исследованных методов.

3. Предложен модифицированный графический метод определения метаболических порогов, обоснованный экспериментальным исследованием на 18 бегунах-стайерах. Данный метод неинвазивен и не требует наличия газометрического оборудования.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ААП – аэробно-анаэробный переход
АнП – анаэробный порог
АнГ – анаэробный гликолитический энергопроцесс
АэП – аэробный порог
ВИТ – высокоинтенсивные тренировки
ВСР – варибельность сердечного ритма
ГрМ – графический метод
ИГСТ – индекс Гарвардского степ-теста
ИНПД – интенсивность накопления пульсового долга
мГрМ – модифицированный графический метод
МВ – мышечные волокна
МВСР – метод определения анаэробного порога на основе показателя SD1
МП – метаболические пороги
МПК – максимальное потребление кислорода
НИТ – низкоинтенсивные тренировки
ПАНО – порог анаэробного обмена
ПК – потребление кислорода
ТК – тест Конкони
ЧСС – частота сердечных сокращений
ЧСС_{пик} – пиковое значение ЧСС, достигаемое в максимальном нагрузочном тесте
CS – критическая скорость
CP – критическая мощность
HRDP – точка перелома динамики ЧСС
IAT – индивидуальный анаэробный порог
La – концентрация лактата в капиллярной крови
LE_{min} – минимальный лактатный эквивалент
LT1 – первый лактатный порог
LT2 – второй лактатный порог
MLSS – максимальное устойчивое состояние по лактату
RPE – субъективно воспринимаемая интенсивность нагрузки по шкале Борга
SMD – стандартизированная средняя разница
TAM – threshold of anaerobic metabolism

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Приказ Минздрава России от 23.10.2020 N 1144н (ред. от 22.02.2022) "Об утверждении порядка организации оказания медицинской помощи лицам, занимающимся физической культурой и спортом (в том числе при подготовке и проведении физкультурных мероприятий и спортивных мероприятий), включая порядок медицинского осмотра лиц, желающих пройти спортивную подготовку, заниматься физической культурой и спортом в организациях и (или) выполнить нормативы испытаний (тестов) Всероссийского физкультурно-спортивного комплекса "Готов к труду и обороне" (ГТО)" и форм медицинских заключений о допуске к участию физкультурных и спортивных мероприятиях" (Зарегистрировано в Минюсте России 03.12.2020 №61238).
2. Бороховский, Е. Ф. Количественные синтезы в социальных науках: методология и практика мета-анализа / Е. Ф. Бороховский, Р. М. Бернارد // Психология. Экономика. Право. – 2013. – № 3. – С. 41-56.
3. Бреслав, И. С. Дыхание и мышечная активность человека в спорте. Руководство для изучающих физиологию человека / И. С. Бреслав, Н. И. Волков, Р. В. Тамбовцева. – Советский спорт. – Москва, 2013. – 336 с.
4. Виноградов, М. А. Практические аспекты использования математических моделей критической мощности (скорости) в видах спорта на выносливость / М. А. Виноградов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции по вопросам спортивной науки в детско-юношеском спорте и спорте высших достижений : Сборник материалов конференции. – Москва, 2016. – С. 140-144.
5. Волков, Н. И. Биохимия мышечной деятельности / Н. И. Волков, Э. Н. Несен, А. А. Осипенко, С. Н. Корсун // Олимпийская литература. – 2000. – 503 с.
6. Волков, Н.И. Об энергетических критериях работоспособности спортсменов / Н.И. Волков, Е.А. Ширковец // Сб. «Биоэнергетика». – 1973. – Л-д. – С. 18-30.
7. Волков, Н. И. Пульсовые критерии энергетической стоимости упражнения / Н. И. Волков, О. И. Попов, А. Г. Самборский // Физиология человека. – 2003. – Т. 29, № 3. – С. 98-103.
8. Волков, Н. И. Физиологические критерии выносливости спортсменов / Н. И. Волков, А. Н. Волков // Физиология человека. – 2004. – Т.30, №4. – С. 103-113.
9. Справочник тестов по оценке различных сторон подготовленности спортсменов. / А.А. Грушин, С. В. Зоткин, С. А. Шаракин [и др.] // М.: Спорт. – 2020. – 192 с.
10. Карпман, В. Л. Тестирование в спортивной медицине : текст / В. Л. Карпман, З. Б. Белоцерковский, И. А. Гудков // М.: Физкультура и спорт. – 1988. – 208 с.
11. Козлов, А.В. Взаимосвязь интенсивности накопления пульсового долга со скоростью образования кислородного запроса и накопления лактата в крови при выполнении предельных циклических упражнений различной

продолжительности / А.В. Козлов, А.Н. Блеер, С.П. Левушкин, В.Д. Сонькин // Спортивная медицина: наука и практика. – 2022. – 12(3). – С. 43-50. <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2022.3.2>.

12. Метод определения анаэробного порога по динамике ЧСС в процессе работы и восстановления при выполнении теста нарастающей мощности до отказа / А. В. Козлов, А. В. Якушкин, Р. С. Андреев [и др.] // Физиология человека. – 2019. – Т. 45, № 2. – С. 78-86. – DOI 10.1134/S0131164619020036.

13. Кряжев, В.Д. Концепция критической скорости бега и ее оценка у бегунов на средние дистанции / В. Д. Кряжев, Р. Н. Володин, В. Б. Соловьев, В. М. Скуднов // Вестник спортивной науки. – 2019. – № 6. – С. 4-8.

14. Ландырь, А. П. Тесты с дозируемой физической нагрузкой в спортивной медицине / А. П. Ландырь, Е. Е. Ачкасов, И. Б. Медведев // М.: Спорт. – 2019. – 256 с.

15. Мак-Дугалл, Дж. Д. Физиологическое тестирование спортсменов высокого класса / Дж. Д. Мак-Дугалл, Говард Э., Уэнгер // Физиологическое тестирование спортсменов высокого класса: пер. с англ. – Киев: Олимпийская литература. – 1998. – С. 430.

16. Платонов, В.Н. Двигательные качества и физическая подготовка спортсменов / В.Н. Платонов. – К.: Олимп. лит. – 2017. – 656 с.

17. Валидация метода для оценки анаэробного порога в работающей мышце / Д.В. Попов, С.Ю. Кузнецов, Е.А. Орлова [и др.] // Физиология человека, 2019. – Том 45, № 2, с. 70–77.

18. Попов, Д. В. Физиологические основы оценки аэробных возможностей и подбора тренировочных нагрузок в лыжном спорте и биатлоне / Д. В. Попов, А. А. Грушин, О. Л. Виноградова // М.: Советский спорт. – 2014. – 80 с.

19. Определение анаэробного порога по данным легочной вентиляции и вариативности кардиоинтервалов / В. Н. Селуянов, Е. М. Калинин, Г. Д. Пак [и др.] // Физиология человека. – 2011. – Т. 37, № 6. – С. 106-110.

20. Селуянов, В. Н. Физиологические механизмы и методы определения аэробного и анаэробного порогов / В.Н. Селуянов, Е.Б. Мясинченко, Д.Б. Холодняк, С.М. Обухов // Теория и практика физической культуры. – 1991. – №10. – С. 10-18.

21. Сокунова, С.Ф. Тесты и критерии выносливости в теории и практике подготовки спортсменов высокой квалификации : дис. док. пед. наук : 13.00.04 / Сокунова Светлана Феликсовна. – Москва. – 2003. – 633 с.

22. Сонькин, В.Д. Развитие мышечной энергетики и работоспособности в онтогенезе : текст / В.Д. Сонькин, Р.В. Тамбовцева. – URSS. – 2018. – 368 с.

23. Спирин, Т. С. Модифицированный графический метод определения метаболических порогов в беге / Т. С. Спирин, А. И. Чикуров, Е. И. Ковель // Современные вопросы биомедицины. – 2024. – Т. 8, № 1(26). – DOI 10.51871/2588-0500_2024_08_01_18.

24. Спирин, Т. С. Наиболее информативный метод определения анаэробного порога, основанный на измерении сердечного ритма / Т. С. Спирин,

А. И. Чикуров, Е. И. Ковель // Современные вопросы биомедицины. – 2023. – Т. 7, № 3(24). – DOI 10.51871/2588-0500_2023_07_03_16.

25. Спирин, Т. С. Оптимальный метод определения второго лактатного (анаэробного) порога в циклических видах спорта / Т. С. Спирин, А. И. Чикуров, С. В. Радаева // Вестник Томского государственного университета. – 2023. – № 489. – С. 193-200. – DOI 10.17223/15617793/489/19.

26. Спирин, Т. С. Сравнение скорости бега на лактатном анаэробном пороге, установленном различными методами у бегунов-любителей со средней соревновательной скоростью на дистанциях 10 и 21,1 км / Т. С. Спирин, Е. Л. Прокопьева // Человек. Спорт. Медицина. – 2023. – Т. 23, № 4. – С. 14-22. – DOI 10.14529/hsm230402.

27. Тамбовцева, Р. В. Состояние метаболизма при напряженной мышечной деятельности спортсменов циклических видов спорта / Р. В. Тамбовцева, Ю. Л. Войтенко, В. Р. Орел. – Москва : ТВТ Дивизион, 2017. – 120 с. – ISBN 978-5-98724-137-0.

28. Arratibel-Imaz, I. Lack of concordance amongst measurements of individual anaerobic threshold and maximal lactate steady state on a cycle ergometer / I. Arratibel-Imaz, J.C. Gonzalez, J.I. Emparanza, N. Terrados // The Physician and Sportsmedicine, 2015. – 44(1). – P. 34-45. DOI: 10.1080/00913847.2016.1122501.

29. Bishop, J. D. The relationship between plasma lactate parameters, W_{peak} and 1-h cycling performance in women / Bishop, J. D., Jenkins, G.D., MackInnon, L. // Medicine and science in Sports and exercise. – 1998. – Vol. 30(8). – Pp. 1270-1275. DOI: 10.1097/00005768-199808000-00014.

30. The concept of maximal lactate steady state: a bridge between biochemistry, physiology and sport science / V. Billat, P. Sirvent, G. Py [и др.] // Sports medicine. – 2003. – 33 (6). – P. 407-426. DOI: 10.2165/00007256-200333060-00003.

31. Bodner, M.E. A review of the concept of the heart rate deflection point / M.E. Bodner, E.C. Rhodes // Sports medicine. – 2000. – Jul;30(1). – P. 31-46. doi: 10.2165/00007256-200030010-00004.

32. Borg, E. A comparison of AME and CR100 for scaling perceived exertion / E. Borg, G. Borg // Acta psychologica (Amsterdam). – 2002. – 109(2). – P. 157-175.

33. Exercise training at maximal fat oxidation intensity for overweight or obese older women: a randomized study / L. Cao, Y. Giang, Q. Li [и др.] // Journal of sport science and medicine. – 2019. – Aug 1, 18(3). – P. 413-418.

34. Cerezuela-Espeja V. The relationship between lactate and ventilatory thresholds in runners: validity and reliability of exercise test performance parameters / V. Cerezuela-Espeja, J. Courel-Ibañez, R. Morán-Navarro, A. Martínez-Cava, J.G. Pallarés // Front. Physiol, 2018. – 9:1320. doi: 10.3389/fphys.2018.01320.

35. Chalmers, S. Standardization of the Dmax method for calculating the second lactate threshold / S. Chalmers, A. Esterman, R. Eston, K. Norton // International journal of sports physiology and performance. – 2015. – Oct 10(7) – P. 921-926. doi: 10.1123/ijsp.2014-0537.

36. A new approach for the determination of ventilatory and lactate thresholds / B. Cheng, H. Kuipers, A.C. Snyder [и др.] // *International journal of sports medicine*. – 1992. – No. 13. – P. 518-522. DOI: 10.1055/s-2007-1021309.
37. Blood lactate threshold in some well-trained ischemic heart disease patients / E.F. Coyle, W.H. Martin, A.A. Ehsani [и др.] // *Journal of applied physiology: respiratory, environmental and exercise physiology*. – 1983. – Jan, 54(1). – P. 18-23. doi: 10.1152/jappl.1983.54.1.18.
38. Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in runners / F. Conconi, M. Ferrari, P.G. Ziglio [и др.] // *Journal of Applied Physiology*, 1982. – 52:869-873.
39. Dearing, C. G. Is Stryd critical power a meaningful parameter for runners? / G. C. Dearing, C. D. Paton // *Biology of sport*. – September 2022. DOI: 10.5114/biolsport.2023.118025.
40. Ertl, P. Detecting fatigue thresholds from electromyographic signals: a systematic review on approaches and methodologies / P. Ertl, A. Kruse, M. Tilp // *Journal of electromyography and kinesiology*. – 2016. – 30. – P. 216–230. doi:10.1016/j.jelekin.2016.08.002.
41. A novel approach for lactate threshold assessment based on rating of perceived exertion / N. Fabre, L. Mourot, L. Zerbini L [и др.] // *International journal of sports physiology and performance*. – 2013. – May;8(3). – P. 263-70. doi: 10.1123/ijsp.8.3.263.
42. Faude, O. Lactate threshold concepts, how valid are they? / O. Faude, W. Kindermann, T. Meyer // *Sports Med*, 2009. – Vol. 39. – No. 6. – P. 469-490. DOI: 10.2165/00007256-200939060-00003.
43. Garcia-Tabar, I. A “blood relationship” between the overlooked minimum lactate equivalent and maximal lactate steady state in trained runners. Back to the old days? / I. Garcia-Tabar, E.M. Gorostiaga // *Frontiers in physiology*. – 2018, Jul 31. – 9. – P. 1034. doi: 10.3389/fphys.2018.01034.
44. Galán-Rioja, M.Á. Relative proximity of critical power and metabolic/ventilatory thresholds: systematic review and meta-analysis / M.Á. Galán-Rioja, F. González-Mohíno, D.C. Poole, J.M. González-Ravé // *Sports medicine*. – 2020. – Oct;50(10). – P. 1771-1783. doi: 10.1007/s40279-020-01314-8.
45. Goulding, R. P. Interaction of factors determining critical power / R. P. Goulding, S. Marwood // *Sports medicine*. – 2022. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01805-w>.
46. The Conconi test – searching for the deflection point / J. Hnízdil, M. Škopek, Š. Balko [и др.] // *Physical activity review*. – Aug 2019. – Vol. 7. – P. 160-167.
47. Hughson, R.L. Blood acid-base and lactate relationships studied by ramp work tests / R.L. Hughson, H.J. Green // *Medical science and sports exercise*. – 1982. – 14(4). – P. 297-302. doi: 10.1249/00005768-198204000-00008
48. Jannick, N.A. Manipulating graded exercise test variables affects the validity of the lactate threshold and VO_{2peak} / N.A. Jannick, J. Botella, D.B. Pyne, D.J. Bishop // *PLoS One*. – 2018. – Jul 30;13(7):e0199794. doi: 10.1371/journal.pone.0199794.

49. Jones, A. M. A 1% treadmill grade most accurately reflects the energetic cost of outdoor running / A. M. Jones, J. H. Doust // *Journal of sports sciences*. – 1996. – 14. – P. 321-327. DOI: 10.1080/02640419608727717.
50. The maximal metabolic steady state: redefining the “gold standard” / A.M. Jones, M. Burnley, M.I. Black [и др.] // *Physiology reports*. – 2019. – May, 7(10). doi: 10.14814/phy2.14098.
51. Physiological demands of running at 2-hour marathon race pace / A.M. Jones, B.S. Kirby, I.E. Clark [и др.] // *Journal of applied physiology*. – 2021. – 130(2). – P. 369-379. doi: 10.1152/jappphysiol.00647.2020.
52. Karvonen, M.J. The effects of training on heart rate; a longitudinal study / M.J. Karvonen, E. Kentala, O. Mustala // *Annales medicinae experimentalis et biologiae fenniae*. – 1957. – 35(3). – P. 307-315
53. Features of electromyography threshold of the respiratory muscles during incremental exercise test / K. Kawamura, S. Iida, M. Kobayashi [и др.] // *Respiratory Physiology & Neurobiology*. – 2022. – 295, 103785. doi:10.1016/j.resp.2021.103785.
54. Kindermann, W. The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training / W. Kindermann, G. Simon, J. Keul // *European journal of applied physiology*. – 1979. – 42. – P. 25-34. DOI: 10.1007/BF00421101.
55. HR max prediction based on age, body composition, fitness level, testing modality and sex in physically active population / J. Lach, S. Wiecha, D. Šliž [и др.] // *Frontiers in physiology*. – 2021. – Jul 30;12:695950. doi: 10.3389/fphys.2021.695950.
56. Legér, L. Use of the heart rate deflection point to assess the anaerobic threshold / L. Legér, S. Tokmakidis // *Journal of applied physiology*. – 1988. – Apr, 64(4). – P. 1758-1760. doi: 10.1152/jappl.1988.64.4.175.
57. Margaria, R. Biomechanics and energetics of muscular exercise / R. Margaria. – Oxford university press. – 1976. – P. 156.
58. Reproducibility of heart rate variability threshold in untrained individuals / F.I. Novelli, J.A. de Araújo, G.J. Tolazzi [и др.] // *International journal of sports medicine*. – 2019. – 40(2). – P. 95-99.
59. Pallarés, J. G. Validity and reliability of ventilatory and blood lactate thresholds in well-trained cyclists / J. G. Pallarés, R. Morán-Navarro, J. Ortega, V. Fernández-Elias // *PLoS ONE*, 2016, Sep 22. – 11(9). doi:10.1371/journal.pone.0163389.
60. A systematic review and meta-analysis on the association and differences between aerobic threshold and point of optimal fat oxidation / R. Peric, Z. Nikolovski, M. Meucci [и др.] // *International journal of environmental research and public health*. – 2022. – 19, 6479. DOI: 10.3390/ijerph19116479.
61. Comparison of maximal lactate steady state with anaerobic threshold determined various methods based on graded exercise test with 3-min stages in elite cyclists / K. Ploszczyca, D. Jazic, Z. Piotrowicz [и др.] // *BMC sports science, medicine and rehabilitation*. – 2020. – No. 12. – P. 70. DOI: 10.1186/s13102-020-00219-3.

62. Podlogar, T. Utility of INSCYD athletic performance software to determine maximal lactate steady state and maximal oxygen uptake in cyclists / T. Podlogar, S. Cirnski, Š. Bokal, T. Kogoj // *Journal of science & cycling*. – 2022. – 11(1). – P. 30-38. DOI: 10.28985/1322.jsc.06.
63. Poole, D.C. Measurement of the maximum oxygen uptake $\dot{V}O_{2max}$: $\dot{V}O_{2peak}$ is no longer acceptable / D.C. Poole, A.M. Jones // *Journal of applied physiology*. – 2017. – Apr 1, 122(4). – P. 997-1002. doi: 10.1152/jappphysiol.01063.2016.
64. Poole, D.C. The anaerobic threshold: 50+ years of controversy / D.C. Poole, H.B. Rossiter, G.A. Brooks, L.B. Gladden // *The Journal of Physiology*. – 2020. – JP279963. DOI: 10.1113/JP279963.
65. The Chester step test is a reproducible tool to assess exercise capacity and exertional desaturation in post-COVID-19 patients / R. Peroy-Badal, A. Sevillano-Castaño, R. Núñez-Cortés [и др.] // *Healthcare (Basel)*. – 2022. – Dec 24, 11(1). – P. 51. doi: 10.3390/healthcare11010051.
66. Predicting competition performance in long-distance running by means of a treadmill test / K. Roecker, O. Schotte, A.M. Niess [и др.] // *Medicine & Science in Sports & Exercise*. – 1998. – Vol. 30. – No. 12. – P. 1750. DOI: 10.1097/00005768-199810000-00014.
67. A new detection method defining the aerobic threshold for endurance exercise and training prescription based on fractal correlation properties of heart rate variability / B. Rogers, D. Giles, N. Draper [и др.] // *Frontiers in physiology*. – 2021. – 11:596567. doi: 10.3389/fphys.2020.596567.
68. Seiler, S. Intervals, thresholds, and long slow distance: the role of intensity and duration in endurance training / S. Seiler, E. Tønnessen // *Sportscience*. – 2009. – 13. – P. 32-53.
69. Skinner, J. S. The transition from aerobic to anaerobic metabolism / J.S. Skinner, T.H. McLellan // *Research quarterly for exercise and sport*, 1980. – 51:1. – P. 234-248. DOI: 10.1080/02701367.1980.10609285.
70. Stegmann, H. Lactate kinetics and individual anaerobic threshold / H. Stegmann, W. Kindermann, A. Schnabel // *International journal of sports medicine*. – 1981. – Aug, 2(3) – P. 160-165. DOI: 10.1055/s-2008-1034604.
71. Stegmann, H. Comparison of prolonged exercise tests at the individual anaerobic threshold and the fixed anaerobic threshold of 4 mmol·l⁻¹ lactate / H. Stegmann, W. Kindermann // *International journal of sports medicine*. – 1982. – May, 3(2). – P. 105-110. DOI: 10.1055/s-2008-1026072.
72. Vanhatalo, A. Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test / A. Vanhatalo, J.H. Doust, M. Burnley // *Medical & science in sports & exercises*. – 2007. – Mar;39(3). – P. 548-555. doi: 10.1249/mss.0b013e31802dd3e6.
73. Vanhatalo, A. Application of critical power in sport / A. Vanhatalo, A. M. Jones, M. Burnley // *International journal of sports physiology and performance*. – 2011. – March, 6(1). – P. 128-36. DOI: 10.1123/ijsp.6.1.128.
74. Volkov, N.I. Assessment of aerobic and anaerobic capacity of athletes in treadmill running tests / N.I. Volkov, E.A. Shirkovets, V.E. Borilkevich // *European*

journal of applied physiology and occupational physiology. – 1975. – Apr 4, 34(2). – P. 121-130. doi: 10.1007/BF00999924.

75. Wasserman, K. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise / K. Wasserman, B. Whipp, S. Koyak, W. Beaver // Journal of applied physiology. – 1973. – V. 35. – P. 236. DOI: 10.1152/jappl.1973.35.2.236.

76. Wasserman, K. Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise / K. Wasserman, M.B. McIlroy // American journal of cardiology. – 1964. – Dec, 14. – P. 844-852. doi: 10.1016/0002-9149(64)90012-8.

77. Modeling physiological predictors of running velocity for endurance athletes / S. Wiecha, P.S. Kasiak, I. Cieslinski [и др.] // Journal of clinical medicine. – 2022. – 11, 6688. <https://doi.org/10.3390/jcm11226688>.

78. Whipp, B.J. Ventilatory control of the “isocapnic buffering” region in rapidly-incremental exercise / B.J. Whipp, J.A. Davis, K. Wasserman // Respiration physiology. – 1989. – 76(3). – P. 357–367. doi:10.1016/0034-5687(89)90076-5.

79. Detecting metabolic thresholds from nonlinear analysis of heart rate time series: a review / G. Zimatore, M.C. Gallotta, M. Campanella [и др.] // International journal of environmental research and public health. – 2022. – 19, 12719. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912719>.

80. Modifications of the Dmax method in comparison to the maximal lactate steady state in young male athletes / L. Zwingmann, S. Strutt, A. Martin [и др.] // Physiology and sportsmedicine. – 2019. – Vol. 47., No. 2. – P. 174–181. DOI: 10.1080/00913847.2018.1546103.

81. Инновационный центр Олимпийского комитета России – 2014 – URL: <https://icroc.ru/> (дата обращения 16.05.2024).

82. Improve your athlete’s performance – 2016 – URL: www.inscydb.com (дата обращения 09.09.2023).

83. Датчик мощности в беге – 2018 – URL: <https://stryd.ru/> (дата обращения 01.12.2023).

84. Шкала интенсивности Olympiatoppen – 2020 – URL: https://olt-skala.nif.no/I-skala_2020.pdf (дата обращения 01.04.2024).

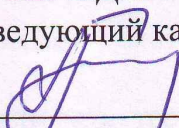
85. Википедия – свободная энциклопедия – 2001 – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_Карвонена (дата обращения 01.04.2024).

86. Марафонец – журнал о беге, марафонах и триатлоне – 2013 – URL: <https://marathoner.ru/hr-zones/> (дата обращения 01.04.2024).

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт физической культуры, спорта и туризма
Кафедра теории и методики спортивных дисциплин

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



А.Ю. Близневский

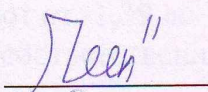
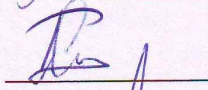
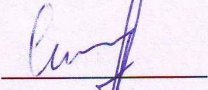
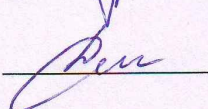
« 19 » июня 2024 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ ПОРОГОВ У БЕГУНОВ-СТАЙЕРОВ

49.04.01 Физическая культура

49.04.01.04 Спорт высших достижений в избранном виде спорта

Руководитель		доцент, канд. пед. наук	А.И. Чикуров
Выпускник			Т.С. Спирин
Рецензент		доцент, канд. пед. наук	С.С. Ситничук
Нормоконтроль			М.В. Думчева

Красноярск 2024