

ISSN 2782-3806

ISSN 2782-3814 (Online)

УДК [613.166+612.17]:159.944.4

ВЫСОКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Муртазин А. А.¹, Максютлов Н. Ф.¹, Усенко А. Б.¹, Изотов А. А.²,
Мальсагова К. А.², Буткова Т. В.², Степанов А. А.², Петров А. А.¹,
Балакин Е. И.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр имени А. И. Бурназяна», Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича», обособленное подразделение «Научно-практический образовательный центр», Москва, Россия

Контактная информация:

Мальсагова Кристина Ахмедовна,
ОП «Научно-практический образовательный центр» Института биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича,
Большой Николоворобинский пер., 7,
стр. 5, Москва, Россия, 109028.
E-mail: kristina.malsagova86@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20.11.2022
и принята к печати 05.12.2022.

РЕЗЮМЕ

Оценка вариабельности сердечного ритма (ВСР) широко применяется в современной спортивной медицине для определения функционального состояния организма, планирования тренировочных циклов и реабилитационных программ. Этот метод отличается не только своей доступностью и универсальностью, но и высокой чувствительностью к условиям внешней среды. В данной статье была рассмотрена возможность использования параметров ВСР для оценки степени адаптации организма к тепловому стрессу, а также степени стрессового воздействия высокой температуры, для описания основных механизмов адаптации и физиологических процессов при тепловом стрессе. Проведен анализ литературных источников, в которых оценивалось воздействие высокой температуры и ВСР на организм человека.

Ключевые слова: адаптация, ВСР, стресс, температура, функциональное состояние организма.

Для цитирования: Муртазин А.А., Максютлов Н.Ф., Усенко А.Б., Изотов А.А., Мальсагова К.А., Буткова Т.В., Степанов А.А., Петров А.А., Балакин Е.И. Высокая температура окружающей среды и вариабельность сердечного ритма. Российский журнал персонализированной медицины. 2022;2(6):42-53. DOI: 10.18705/2782-3806-2022-2-6-42-53.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON HEART RATE VARIABILITY PARAMETERS

**Murtazin A. A.¹, Maksjutov N. F.¹, Usenko A. B.¹, Izotov A. A.²,
Malsagova K. A.², Butkova T. V.², Stepanov A. A.², Petrov A. A.¹,
Balakin E. I.¹**

¹ State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

² V. N. Orekhovich Research Institute of Biomedical, Moscow, Russia

Corresponding author:

Malsagova Kristina A.,
V. N. Orekhovich Research Institute of
Biomedical,
Bol'shoi Nikolovorobinskiy per., 7/5,
Moscow, Russia, 109028.
E-mail: kristina.malsagova86@gmail.com

Received 20 November 2022; accepted
05 December 2022.

ABSTRACT

Assessment of heart rate variability (HRV) is widely used in modern sports medicine to determine the functional state of the body, planning of training cycles and rehabilitation programs. This method is distinguished not only by its accessibility and versatility, but also by its high sensitivity to environmental conditions. In this article we decided to consider the possibility of using HRV parameters to assess the degree of body adaptation to heat stress. The article considers the impact of high temperature from the position of stress, gives a description of the basic mechanisms of adaptation and physiological processes under heat stress and considers the main works in which the impact of high temperature and HRV appears.

Key words: adaptation, functional state of the body, HRV, stress, temperature.

For citation: Murtazin AA, Maksjutov NF, Usenko AB, Izotov AA, Malsagova KA, Butkova TV, Stepanov AA, Petrov AA, Balakin EI. Influence of temperature on heart rate variability parameters. *Russian Journal for Personalized Medicine*. 2022;2(6):42-53. (In Russ.) DOI: 10.18705/2782-3806-2022-2-6-42-53.

Список сокращений: ВНС — вегетативная нервная система, ВСР — вариабельность сердечного ритма, ЧСС — частота сердечных сокращений, ФСО — функциональное состояние организма.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема адаптации организма к экстремальной температурной среде всегда была актуальна как для спортсменов, которым часто приходится выступать и тренироваться в условиях неоптимальных температур, так и для представителей профессий, чья работа часто связана с преодолением вызовов внешней среды. Также в последнее время в связи с глобальным изменением климата и регулярно возникающими в разных частях света так называемыми тепловыми волнами (Heat waves), уносящими жизни огромного числа людей, эта проблема становится чрезвычайно важной и для широких слоев населения [1, 2]. Поэтому достаточно остро стоит вопрос поиска инструментов для определения толерантности организма к тепловому стрессу, оценки последствий воздействия высоких температур на организм человека.

Учитывая вышеописанную актуальность, рассмотрена возможность решения этой задачи методом оценки функционального состояния организма с помощью анализа параметров вариабельности сердечного ритма (ВСР).

Анализ ВСР основан на определении последовательности R-R интервалов электрокардиограм-

мы (рис. 1). ВСР — это колебание временных интервалов между идущими друг за другом ударами сердца. ВСР возникает вследствие взаимодействия между сердечно-сосудистой и нервной системами и отражает баланс между симпатической и парасимпатической частями вегетативной нервной системы (ВНС).

ВСР отражает способность сердца реагировать на различные физиологические стимулы. Низкая ВСР связана с нарушением регуляторных и гомеостатических функций вегетативной нервной системы (ВНС), которое снижает способность организма справляться с внутренними и внешними стрессорами. Таким образом, можно предположить, что параметры ВСР могут отражать уровень стресса [3].

СТРЕСС И МЕХАНИЗМЫ АДАПТАЦИИ ОРГАНИЗМА

Стресс — это реакция организма на нетипичное воздействие внешней среды [4, 5]. Ответ организма на стресс проявляется в виде адаптации, которая может быть срочной или длительной в зависимости от типа воздействия [6, 7]. Нейрофизиологический механизм ответа на стресс реализуется за счет работы вегетативной нервной системы и связан с активностью гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси, а также с изменением в работе иммунной системы [8].

Адаптация к стрессу происходит за счет многочисленных реакций в организме [9], описываемых



Рис. 1. Вариабельность сердечного ритма (R-R интервал).

Обозначения на рисунке: P — возбуждение обоих предсердий (деполяризация); Q — реполяризация предсердий и деполяризация межжелудочковой перегородки; R — деполяризация боковых стенок и верхушки желудочков; S — деполяризация оснований желудочков; T — реполяризация желудочков

теорией аллостаза, которая в дополнение к теории гомеостаза, подразумевающей поддержание постоянства внутренней среды организма, предполагает наличие постоянных изменений в работе физиологических систем для обеспечения адаптации к внешним воздействиям [10]. В рамках этой теории существует понятие аллостатической нагрузки — кумулятивных негативных изменений в работе адаптивных систем организма, связанных с чрезмерной активностью работы нервных и гуморальных регуляторных систем. Эти изменения вызывают нарушение адаптивных процессов в организме человека [11, 12].

Адаптационные возможности организма зависят от функционального состояния организма (ФСО) [13] и складываются из нескольких факторов:

- 1) наличия ресурсов организма для осуществления адаптации;
- 2) эффективности расходования этих ресурсов;
- 3) эффективности восстановительных процессов организма;
- 4) регуляторных механизмов, обеспечивающих распределение, перераспределение, расходование, восстановление и накопление ресурсов в зависимости от потребностей организма [14].

Одной из важнейших функций организма, подвержающейся контролю ВНС, является работа сердечно-сосудистой системы, а именно: сокращение сердечной мышцы. Со стороны симпатического отдела ВНС этот процесс контролируется через выброс медиатора норадреналина, который связывается с β_1 -адренорецептором, расположенным на мембране клеток синоатриального узла. Этот процесс в свою очередь запускает аденилатциклазный (цАМФ-зависимый) сигнальный каскад, формирующий приток Na^+ , Ca^{2+} в клетки и следующее за ним ускорение формирования потенциала действия, и таким образом способствует учащению сердцебиения [15]. Парасимпатическая регуляция осуществляется через вагусный нерв путем выброса медиатора ацетилхолина, связывающегося с М2-мускариновым рецептором, который, напротив, блокирует аденилатциклазный каскад и, замедляя формирование потенциала действия в клетках, снижает частоту сердечных сокращений [16].

Динамический баланс ВНС характеризуется постоянными изменениями длины R-R интервалов сердечного ритма. Поскольку снабжение тканей кислородом через кровь лежит в основе работы всех органов и систем организма, ВСР может отражать регуляцию вегетативного баланса, артериального давления, газообмена, работы кишечника, сердца, тонуса сосудов и служить универсальным методом оценки состояния ВНС [17].

Следующим важным аспектом гомеостаза является терморегуляция, которая представляет собой способность организма поддерживать температуру тела в определенных пределах в изменяющихся условиях окружающей среды [18]. При этом стоит отметить, что оба параметра (ВСР и температура) являются взаимозависимыми, и это формирует сложные взаимодействия всех систем организма в ходе поддержания баланса, а также представляет дополнительный интерес для изучения.

МЕХАНИЗМЫ ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Организм человека использует следующие физические механизмы для автономной регуляции температуры тела в случае внешнего воздействия высоких температур:

- испарение воды с поверхности кожи в виде пота, а также с выдыхаемым воздухом. Это очень эффективный механизм рассеивания избыточного тепла в организме, он является основным для спортсменов, тренирующихся в жаркой среде.
- излучение, то есть рассеяние электромагнитных волн в инфракрасном диапазоне. Такая передача энергии не требует прямого контакта или движения воздуха.
- конвекция, то есть передача тепла газу или жидкости, движущейся над телом. Теплоотдача происходит, когда газ или жидкость холоднее тела, и особенно важна для спортсменов. Важными параметрами в этом процессе являются скорость циркуляции воздуха и площадь поверхности тела.
- теплопередача (прямая передача тепла соседнему более холодному объекту) [19].

Последние три механизма напрямую связаны с расширением сосудов кожи, то есть с выносом тепла к поверхности тела. В результате возрастает нагрузка на сердечно-сосудистую систему. Вклад каждого из механизмов зависит от внешних факторов. Эффективность излучения и конвекции падает при высоких температурах окружающей среды. Испарение происходит труднее при высокой влажности, а теплопередача возможна только при прямом контакте с более холодным объектом (например, специальными охлаждающими накладками со льдом). Контроль автономных механизмов терморегуляции осуществляется с помощью терморепрепторов, расположенных как в коже, так и во внутренних органах, которые посылают сигналы к центру терморегуляции в гипоталамусе. В ответ на эти сигналы запускаются компенсаторные механизмы, направленные на усиление теплоотдачи: возрастает потоотделение, расширяются перифери-

ческие сосуды кожи, увеличивается интенсивность кровотока в органах [20, 21].

Также существуют поведенческие механизмы терморегуляции, которые выражаются в избегании теплового воздействия, поиске тени, подборе правильной одежды, потреблении холодных жидкостей и т. д. [22].

ПАТОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

При высокой температуре у человека растет объем сердечного выброса, который в обычном состоянии может составлять около 5 л/мин, а при тепловом стрессе может увеличиться в 2,5 раза для полного насыщения кожных капилляров. Это происходит в том числе за счет увеличения частоты сердечных сокращений (ЧСС) в условиях жаркой температуры [23].

Контроль и регуляция работы сердца во время теплового стресса определяются прямым воздействием температуры на клетки синоатриального и атриовентрикулярного узлов, составляющих проводящую систему сердца, а также симпатическими и парасимпатическими воздействиями на них [24]. В дополнение к положительному хронотропному эффекту (увеличение частоты сокращений), повышенная температура увеличивает скорость проведения сигнала клеток водителей ритма к соседним кардиомиоцитам за счет влияния температуры на проводимость щелевых контактов [25].

Со стороны автономного контроля тепловой стресс вызывает значительное усиление симпатической активности и, как следствие, увеличение общего количества катехоламинов, циркулирующих в крови [26]. Парасимпатическое влияние на сердце при этом уменьшается [24]. Такое смещение вегетативного баланса в сторону симпатотонии приводит к увеличению ЧСС. Симпатическая стимуляция имеет хорошо документированный эффект увеличения сократимости миоцитов как предсердий, так и желудочков, однако это не влияет на объем сердечного выброса [27].

Сочетание высокой температуры окружающей среды и выполняемой физической работы может приводить к дополнительным рискам для здоровья в связи с дополнительной термогенерацией в мышцах [28, 29].

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ВСР

Наиболее точным и научно обоснованным методом получения хронокардиограммы (записи периодов сердечных сокращений) является запись ЭКГ, и следует пользоваться этим методом в ситуациях, где это возможно. В частности, при учете способа записи ритмограммы в экстремальных температурных условиях, анализ параметров variability ритма сердца на фоне высокой температуры окружающей среды показал наибольшую

Таблица 1. Основные линейные параметры

Величина	Единицы измерения	Принцип формирования
RMSSD	мс	Квадратный корень из суммы квадратов разности величин последовательных пар интервалов NN (нормальных интервалов RR), часто используется значение линейного логарифма этого параметра (LnRMSSD)
ЧСС	удары в минуту	Частота сердечных сокращений
SDNN	мс	Стандартное отклонение всех интервалов N-N
SDANN	мс	Стандартное отклонение средних значений интервалов N-N для каждого 5-минутного сегмента 24-часовой записи ЭКГ
pNN50	%	Процент последовательных интервалов R-R, отличающихся более чем на 50 мс
HR Max - HR Min	удары в минуту	Средняя разница между самой высокой и самой низкой частотой сердечных сокращений во время каждого дыхательного цикла

разницу между значениями ВСП и вариабельностью пульса, который определяется большинством фотоплетизмографических датчиков. Эта разница не объясняется высоким уровнем белого шума вследствие возникающих помех при измерении, а является результатом трансформации транзита пульса во времени, находящейся в прямой зависимости от дыхательной активности [30]. Показано, что при температурах 17, 25 и 38 °C разница для большинства параметров ритмограммы между ВСП и вариабельностью пульса становится статистически значимой [31].

Для оценки ФСО при физических нагрузках широко используется метод анализа ВСП [32–36], в котором к настоящему времени остаются утвержденными три основных группы параметров — линейные, волновые и нелинейные [37].

Линейные или статистические параметры отражают величину вариабельности во времени между следующими друг за другом ударами сердца (R-R интервалами) [38]. Эти величины могут быть выражены в абсолютном значении или логарифмированы для достижения нормального распределения. Основные линейные параметры представлены в таблице 1.

Волновые параметры показывают распределение общей или относительной мощности спектра по различным частотным полосам [39] (рис. 2).

Кроме абсолютной и относительной мощности различных спектральных компонентов ВСП важным параметром является отношение коротких частот (low frequency, LF) к высоким частотам (high frequency, HF), которое характеризует баланс активности симпатической и парасимпатической частей вегетативной нервной системы [40].

Нелинейные параметры отражают непредсказуемость временного ряда R-R интервалов [41]. Основным инструментом при нелинейном анализе является график Пуанкаре, который получается путем сопоставления каждого R-R интервала с предыдущим интервалом, в результате чего об-

разуется диаграмма рассеяния. Нелинейные индексы коррелируют с измерениями в частотных и временных параметрах, если они генерируются одними и теми же процессами [40]. Основные параметры нелинейной области представлены в таблице 2.

Подбор рассматриваемых параметров и продолжительности измерений зависит от задачи исследования. При рассмотрении работ, посвященных влиянию внешней температуры на параметры ВСП, необходимо учитывать характер этого воздействия: краткосрочное (погружение в ванну или специальную камеру), длительное (рабочий день в определенных условиях) проживание в условиях экстремальных температур.

СВЯЗЬ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗМА И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВСП

Динамика показателей ВСП напрямую зависит от функционального состояния организма [42], на которое оказывают воздействие факторы окружающей среды [39], в первую очередь температура и влажность.

Регуляция гомеостаза направлена на поддержание нормальной температуры тела, незначительное изменение которой может привести к флуктуации показателей ВСП. Например, показано, что повышение или понижение температуры тела способствует значимому изменению ВСП. По данным Mowery, низкая (< 36 °C) и высокая (> 39 °C) температура тела вызывает серьезное уменьшение вариабельности ритма у пациентов, поступавших в отделение интенсивной терапии травматологических отделений, которое авторы оценивали с помощью стандартного отклонения длины интервалов, а не классических параметров ВСП. Авторы заключают, что низкая ВСП отражает дисфункцию системы вегетативного контроля работы сердечно-сосудистой системы [43].



Рис. 2. Характеристики волновых параметров

Таблица 2. Основные параметры нелинейной области

Величина	Единицы измерения	Принцип формирования
SD1	мс	Стандартное отклонение ширины облака графика Пуанкаре
SD2	мс	Стандартное отклонение длины облака графика Пуанкаре
SD1/SD2	%	Отношение SD1 к SD2
ApEn	–	Приближенная энтропия, измеряющая регулярность и сложность временного ряда R-R интервалов
SampEn	–	Выборочная энтропия, которая измеряет регулярность и сложность временного ряда R-R интервалов
DFA α_1	–	Детрендрованный флуктуационный анализ, который описывает краткосрочные колебания
DFA α_2	–	Детрендрованный флуктуационный анализ, описывающий долгосрочные флуктуации.
D2	–	Корреляционная размерность, оценивающая минимальное количество переменных, необходимых для построения системы динамической модели

В работе Abellán-Aynés и соавторов рассматривалось, как BCP может изменяться в зависимости от температуры окружающей среды при 19 °C и 35 °C. Эксперимент проводился с участием контрольной группы, запись ритмограммы проходила в лежачем положении, длительность записи 10 минут, были отдельно вычислены значения параметров BCP для первых 5 минут воздействия и 5 минут оставшейся записи. Авторы отмечают уменьшение значений RMSSD и SDNN в условиях высокой температуры, уменьшение параметра HFnu и увеличение LFnu. Параметр SD1 в этой работе не рекомендуется к использованию, так как он идентичен по своей сути RMSSD, также авторы заключают, что соотношение SD2/SD1 не является столь четким показателем вегетативного баланса.

По мнению авторов, уменьшение вариабельности в условиях высокой температуры происходит за счет снижения влияния парасимпатического контура регуляции автономной нервной системы, а не увеличения активности симпатического отдела нервной системы, что выражается в отсутствии изменений в значении параметра стресс-индекса [44].

Существуют противоречивые данные об изменении некоторых показателей BCP в разных темпера-

турных условиях. Так, например, отношение LF/HF, называемое показателем вегетативного баланса, показывает достаточно противоречивую динамику в разных исследованиях.

Некоторые исследователи связывают показатели BCP с субъективными так называемыми ощущениями термального комфорта, то есть того, как сами испытуемые описывают свои ощущения от температурного режима, в котором они находятся. В частности, показано, что отношение LF/HF снижается, а мощность HF увеличивается при повышении температуры окружающей среды и характеризуется статистически значимой ($p < 0,05$) сильной корреляционной связью с ее колебаниями от 21 °C до 30 °C и субъективными ощущениями испытуемых [45].

Другими исследователями было отмечено повышение средних значений отношения LF/HF в результате воздействия высокой и низкой температуры на организм обследуемых лиц. Эти данные также были подтверждены в других исследованиях, где нейтральное состояние характеризовалось значениями LF/HF близкими к единице [46]. Результаты этих исследований, где авторы фокусируются на параметре LF/HF, который увеличивается при достижении высокой (некомфортной) температу-

ры [45], противоречат выводам других ученых, показавших, что все параметры ВСР, особенно: VLF (очень короткие волновые частоты, рис. 2), pNN20 и SampEn, кроме спектральной мощности LF, HF и отношения LF/HF, имеют статистически значимые различия между нейтральной (26 °C) и жаркой (30 °C) температурой окружающей среды [47]. Возможно, это объясняется разницей в диапазоне температур.

Возможность использования параметров ВСР и важность анализа отношения LF/HF в оценке уровня термального комфорта были подтверждены работой научной группы в другом исследовании, где рассматривалась температура в транспортном средстве [48]. Также подтверждена значимая корреляционная связь параметра LF/HF с ощущением термального комфорта в экспериментальном исследовании воздействия температурных колебаний на организм испытуемых в зимний период времени [49].

ПОКАЗАТЕЛИ ВСР ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ВОЗДУХА И ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

Большинство клинико-экспериментальных исследований с участием спортсменов или специалистов экстремальных профессий в условиях высокой температуры демонстрируют значимое увеличение ЧСС [50]. Это связано с высоким значением температурного градиента между телом человека и окружающей средой, и такое соотношение приводит к нарушению процессов терморегуляции организма посредством конвекции и излучения [18].

Регулярные физические тренировки в высокотемпературных условиях способствуют увеличению функциональных резервов и физической работоспособности организма [51], а также повышению показателей объема потребления кислорода (VO_2) на уровне аэробного и анаэробного порогов, с ростом интенсивности выполняемой работы при экстремальных условиях [52]. Данные изменения связаны с увеличением объема плазмы крови, оптимизацией процессов поддержания баланса жидкости в организме, усилением потоотделения и кожного кровотока, снижением интенсивности метаболических процессов при физической нагрузке и приобретением тепловой устойчивости через реакцию теплового шока. Это способствует улучшению стабильности работы сердечно-сосудистой системы и, соответственно, физической работоспособности во время теплового стресса [53].

В одном из исследований при наблюдении работников старшего возраста (от 53 до 64 лет) исследователями было отмечено отсутствие изменения как

в сердечном ритме, так и в различных параметрах ВСР после длительной (7,5 часов) рабочей нагрузки, хотя при этом отмечалось изменение температуры тела. Это может свидетельствовать о снижении адаптационных возможностей организма с возрастом [54].

В еще одном научном исследовании *D. Flouris* и коллеги проводили динамическое обследование испытуемых лиц методикой ВСР в период выполнения протокола по акклиматизации организма в условиях высокой температуры (40 °C, 20 % влажность), и было показано, что на пике адаптационных реакций регистрируются значимые изменения в показателях ВСР по сравнению с фоновым обследованием [55].

Другим авторам в рамках клинико-экспериментального исследования удалось построить предиктивную модель на основе методов машинного обучения, которая определяла уровень термального комфорта организма, основываясь на значениях ВСР [56]. Таким образом, можно видеть, что существует возможность для построения корреляционной связи между параметрами ВСР и ФСО применительно к температурному стрессу.

Длительное воздействие высокой температуры на организм человека, несомненно, является фактором экзогенного стресса, увеличивающим риски возникновения кардиореспираторных, эндокринных патологий и заболеваний мочевыделительной системы [57]. В связи с этим на первое место встает решение проблемы тепловой акклиматизации организма. В этом может помочь поиск новых способов метаболической поддержки для облегчения предвальной адаптации и снижения заболеваемости лиц, деятельность которых связана с работой в условиях жаркого климата [58].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном обзоре рассмотрено влияние теплового стресса на ФСО, которое отражается на значениях параметров ВСР. Исследования подтверждают влияние высокой внешней температуры как фактора стресса, который уменьшает ВСР. Однако также наблюдается непостоянство изменений параметров в этих исследованиях: параметры меняются в одних исследованиях, а в других, похожих по дизайну, — авторы не отмечают изменений этих параметров. Также зачастую изменения связаны с близким к предельному значению *p-value*. Вероятно, это говорит о недостаточной, на наш взгляд, достоверности и отсутствии единообразия в дизайне этих исследований, и, хотя косвенно нам удалось подтвердить гипотезу о возможности использования параметров

ВСП для оценки степени влияния теплового стресса на организм, для установления четких критериев и значений параметров ВСП следует провести дополнительные исследования по оценке параметров ВСП в условиях высокой температуры.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявляют об отсутствии потенциального конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена в рамках проекта по созданию и развитию научных центров мирового уровня «Цифровой дизайн и персонализированное здравоохранение» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 075-15-2022-305). / The work was carried out within the framework of the project on the creation and development of world-class scientific centers “Digital Design and personalized healthcare” with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2022-305).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Rossati A. Global Warming and Its Health Impact. *The International Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2017;8(1):7–20.
- Stillman JH. Heat Waves, the New Normal: Summertime Temperature Extremes Will Impact Animals, Ecosystems, and Human Communities. *Physiology* (Bethesda, Md.). 2019;34(2):86–100.
- Kim HG, Cheon EJ, Bai DS, et al. Stress and Heart Rate Variability: A Meta-Analysis and Review of the Literature. *Psychiatry Investigation*. 2018;15(3):235–245.
- Самойлов А.С., Никонов Р.В., Пустовойт В.И. Стресс в экстремальной профессиональной деятельности: монография ФГБУ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России. — Москва, 2022. — С. 84.
- Dong SY, Lee M, Park H, et al. Stress Resilience Measurement With Heart-Rate Variability During Mental And Physical Stress. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference*. 2018;2018:5290–5293.
- Пустовойт В.И., Балакин Е.И., Максюттов Н.Ф. и др. Изменение функционального состояния спортсменов экстремальных видов спорта в ответ на экзогенный стресс. *Человек. Спорт. Медицина*. 2022; S2:22–29.
- Eston RG, Felix Z. Meerson “Adaptation, Stress and Prophylaxis”. *British Journal of Sports Medicine*. 1984;18(4):267.
- Пустовойт В.И., Никонов Р.В., Самойлов А.С. и др. Цитологические и биохимические показатели крови при развитии различных неспецифических адаптационных реакций у спортсменов экстремальных видов спорта. *Курортная медицина*. 2021;2:85–91.
- Пустовойт В.И., Самойлов А.С., Никонов Р.В. Особенности инфекционной патологии у спортсменов-дайверов в сложных климатических условиях. *Спортивная медицина: наука и практика*. 2020;10(1):67–75.
- Romero LM, Dickens MJ, Cyr NE. The Reactive Scope Model — a new model integrating homeostasis, allostasis, and stress. *Hormones and Behavior*. 2009;55(3):375–389.
- Crews DE, Tuggle AC. What is health? Allostasis and the evolution of human design. Peter Sterling Cambridge, MA: The MIT Press, 2020. *American Journal of Human Biology: The Official Journal of the Human Biology Council*. 2022;34(5):e23698.
- Logan JG, Barksdale DJ. Allostasis and allostatic load: expanding the discourse on stress and cardiovascular disease. *Journal of Clinical Nursing*; 2008;17(7B):201–208.
- Пустовойт В.И., Самойлов А.С. Разработка основных критериев для оценки степени адаптации организма спортсменов-альпинистов к условиям горного климата. *Бюллетень физиологии и патологии дыхания*. 2019;(73):42–48.
- McEwen BS. Stress, adaptation, and disease. Allostasis and allostatic load. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1998;840:33–44.
- Bers DM. Cardiac excitation–contraction coupling. *Nature*. 2002;415(6868):198–205.
- Michael SK, Graham S, Davis GM. Cardiac Autonomic Responses during Exercise and Post-exercise Recovery Using Heart Rate Variability and Systolic Time Intervals — A Review. *Frontiers in Physiology*. 2017;8.
- Tiwari R, Kumar R, Malik S, et al. Kumar Analysis of Heart Rate Variability and Implication of Different Factors on Heart Rate Variability. *Current Cardiology Reviews*. 2021;17(5):e160721189770.
- Périard JD, Travers GJS, Racinais S, et al. Cardiovascular adaptations supporting human exercise-heat acclimation. *Autonomic Neuroscience: Basic & Clinical*. 2016;196:52–62.
- Périard JD, Travers GJS, Racinais S, et al. Cardiovascular adaptations supporting human exercise-heat acclimation. *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*. 2016;196:52–62.
- Brengelmann GL, Savage MV. Temperature regulation in the neutral zone. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1997;813:39–50.

21. Schlader ZJ, Vargas NT. Regulation of Body Temperature by Autonomic and Behavioral Thermoeffectors. *Exercise and Sport Sciences Reviews*. 2019;47(2):116–126.
22. Flouris AD, Schlader ZJ. Human behavioral thermoregulation during exercise in the heat. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 2015;25 Suppl 1:52–64.
23. Kobayashi M, Godin D, Nadeau R. Sinus node responses to perfusion pressure changes, ischaemia and hypothermia in the isolated blood-perfused dog atrium. *Cardiovascular Research*. 1985;19 (1):20–26.
24. Crandall CG, Wilson TE. Human cardiovascular responses to passive heat stress. *Comprehensive Physiology*. 2015;5(1):17–43.
25. Chen YH, DeHaan RL. Temperature dependence of embryonic cardiac gap junction conductance and channel kinetics. *The Journal of Membrane Biology*. 1993;136(2):125–134.
26. Rowell LB. Hyperthermia: a hyperadrenergic state. *Hypertension (Dallas, Tex.: 1979)*. 1990;15(5):505–507.
27. Jose AD, Stitt F, Collison D. The effects of exercise and changes in body temperature on the intrinsic heart rate in man. *American Heart Journal*. 1970;79(4):488–498.
28. Bedno SA, Li Y, Han W, et al. Niebuhr Exertional heat illness among overweight U.S. Army recruits in basic training Aviation, Space, and Environmental Medicine. 2010;81(2):107–111.
29. Trangmar SJ, González-Alonso J. Heat, Hydration and the Human Brain, Heart and Skeletal Muscles. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*. 2019;49(Suppl 1):69–85.
30. Schäfer A, Vagedes J. How accurate is pulse rate variability as an estimate of heart rate variability? A review on studies comparing photoplethysmographic technology with an electrocardiogram. *International Journal of Cardiology*. 2013;166(1):15–29.
31. Shin H. Ambient temperature effect on pulse rate variability as an alternative to heart rate variability in young adult. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*. 2016;30(6):939–948.
32. Baevskiy RM, Chernikova AG. Analysis of heart rate variability: physiological bases and main methods of conducting. *Cardiometry*. 2017;10:66–76. In Russian [Баевский Р.М., Черникова А.Г. Анализ вариабельности сердечного ритма: физиологические основы и основные методы проведения. *Кардиометрия*. 2017;10:66–76.]
33. Земцовский Э.В. Современные представления о стрессорной кардиомиопатии у спортсменов. 2008;2:69–92.
34. Пустовойт В.И., Ключников М.С., Никонов Р.В. и др. Характеристика основных показателей вариабельности сердечного ритма у спортсменов циклических и экстремальных видов спорта. *Кремлевская медицина. Клинический вестник*. 2021;1:26–30.
35. Пустовойт В.И., Ключников М.С., Назарян С.Е. и др. Вариабельность сердечного ритма как основной метод оценки функционального состояния организма спортсменов, принимающих участие в экстремальных видах спорта. *Современные вопросы биомедицины*. 2021;15(2).
36. Пустовойт В.И. Скрининг-диагностика психоэмоционального состояния спортсменов экстремальных видов спорта методом электроэнцефалографии. *Современные вопросы биомедицины*. 2022;6(1).
37. Catai AM, Pastre CM., de Godoy MF, et al. Heart rate variability: are you using it properly? Standardisation checklist of procedures. *Brazilian Journal of Physical Therapy*. 2020;24(2):91–102.
38. Баевский Р.М. Вариабельность сердечного ритма: Теоретические аспекты и возможности клинического применения. *Ультразвуковая и функциональная диагностика*. 2001;3:108–127.
39. Самойлов А.С., Никонов Р.В., Пустовойт В.И. и др. Применение методики анализа вариабельности сердечного ритма для определения индивидуальной устойчивости к токсическому действию кислорода. *Спортивная медицина: наука и практика*. 2020;10(3):73–80.
40. Shaffer F, Ginsberg JP. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health*. 2017;5.
41. Yaduraj SR, Sudarshan BG, Prasanna Kumar SC, et al. Analysis of Linear and Non-linear parameters of HRV for opting optimum parameters in wearable device. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5:10644–10651.
42. Земцовский Э.В. Спортивная кардиология: Монография. — СПб, 2005. — С. 448.
43. Mowery NT, Morris JA, Jenkins JM, et al. Core temperature variation is associated with heart rate variability independent of cardiac index: a study of 278 trauma patients. *Journal of Critical Care*. 2011;26(5):534.e9-534.e17.
44. Abellán-Aynés O, Manonelles P, Alacid F. Cardiac Parasympathetic Withdrawal and Sympathetic Activity: Effect of Heat Exposure on Heart Rate Variability. *International journal of environmental research and public health*. 2021;18(11).
45. Zhu H, Wang H, Liu Z, et al. Experimental study on the human thermal comfort based on the heart rate variability (HRV) analysis under different environments. *The Science of the Total Environment*. 2018;616–617:1124–1133.
46. Liu W, Lian Z, Liu Y. Heart rate variability at different thermal comfort levels. *European Journal of Applied Physiology*. 2008;103(3):361–366.

47. Wu G, Liu H, Wu S, et al. Can Heart Rate Variability (HRV) Be Used as a Biomarker of Thermal Comfort for Mine Workers? *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(14):7615.

48. Gwak J, Shino M, et al. Interaction between Thermal Comfort and Arousal Level of Drivers in Relation to the Changes in Indoor Temperature. *International Journal of Automotive Engineering*. 2018;9(2):86–91.

49. Xiong J, Lian Z, Zhang H. Physiological response to typical temperature step-changes in winter of China. *Energy and Buildings*. 2017;138:687–694.

50. Brenner IK, Thomas S, Shephard RJ. Autonomic regulation of the circulation during exercise and heat exposure. Inferences from heart rate variability. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*. 1998;26(2):85–99.

51. Tyler CJ, Reeve T, Hodges GJ, et al. The Effects of Heat Adaptation on Physiology, Perception and Exercise Performance in the Heat: A Meta-Analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*. 2016;46(11):1699–1724.

52. Lorenzo S, Halliwill JR, Sawka MN. Heat acclimation improves exercise performance. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*. 2010;109(4):1140–1147.

53. Rizzo L, Thompson MW. Cardiovascular adjustments to heat stress during prolonged exercise. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. 2018;58(5):727–743.

54. Macartney MJ, Notley SR, Meade RD. Heart rate variability in older men on the day following prolonged work in the heat. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2020;17(9):383–389.

55. Flouris AD, Poirier MP, Bravi A, et al. Changes in heart rate variability during the induction and decay of heat acclimation. *European Journal of Applied Physiology*. 2014;114(10):2119–2128.

56. Nkurikiyeyezu KN, Suzuki Y, Lopez GF. Heart rate variability as a predictive biomarker of thermal comfort. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2018;9(5):1465–1477.

57. Périard JD, Racinais S, Sawka MN. Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: Applications for competitive athletes and sports. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 2015;25 Suppl 1:20–38.

58. Ihsan M, Périard JD, Racinais S. How to integrate recovery during heat acclimation. *British Journal of Sports Medicine*. 2021;55(4):185–186.

Информация об авторах:

Муртазин Артур Амирович, младший научный сотрудник лаборатории больших данных и прецизионной спортивной медицины центра спортивной медицины и реабилитации ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России;

Максютов Наиль Фанисович, младший научный сотрудник лаборатории больших данных и прецизионной спортивной медицины центра спортивной медицины и реабилитации ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России;

Усенко Анна Борисовна, к.м.н., научный сотрудник лаборатории больших данных и прецизионной спортивной медицины ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России;

Изотов Александр Александрович, научный сотрудник Группы биобанкинга обособленного подразделения «Научно-практический образовательный центр» Института биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича;

Мальсагова Кристина Ахмедовна, к.б.н., научный сотрудник Группы биобанкинга обособленного подразделения «Научно-практический образовательный центр» Института биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича;

Буткова Татьяна Владимировна, к.м.н., научный сотрудник Группы биобанкинга обособленного подразделения «Научно-практический образовательный центр» Института биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича;

Степанов Александр Александрович, научный сотрудник Группы биобанкинга обособленного подразделения «Научно-практический образовательный центр» Института биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича;

Петров Александр Александрович, младший научный сотрудник лаборатории больших данных и прецизионной спортивной медицины ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России;

Балакин Евгений Игоревич, к.м.н., старший научный сотрудник лаборатории больших данных и прецизионной спортивной медицины ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России.

Author information:

Murtazin Artur A., junior researcher in the Big Data and Precision Sports Medicine Laboratory, Sports Medicine and Rehabilitation Center, State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency;

Maksjutov Nail' F., junior researcher in the Big Data and Precision Sports Medicine Laboratory, Sports Medicine and Rehabilitation Center, State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency;

Usenko Anna B., PhD, researcher, Laboratory of Big Data and Precision Sports Medicine, Laboratory, Sports Medicine and Rehabilitation Center, State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency;

Izotov Alexander A., research fellow of the Biobanking Group, V. N. Orekhovich research Institute of Biomedical Chemistry;

Malsagova Kristina A., PhD, research fellow of the Biobanking Group, V. N. Orekhovich Research Institute of Biomedical Chemistry, resident physician in Peoples' Friendship University of Russia;

Butkova Tatyana V., MD, PhD, research fellow of the Biobanking Group, V. N. Orekhovich Research Institute of Biomedical Chemistry;

Stepanov Aleksander A., research fellow of the Biobanking Group, V. N. Orekhovich Research Institute of Biomedical Chemistry;

Petrov Alexander Alexandrovich, Junior Researcher, Laboratory of Big Data and Precision Sports Medicine, Sports Medicine and Rehabilitation Center, State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency;

Balakin Evgenii I., MD, PhD, Senior Researcher, Laboratory of Big Data and Precision Sports Medicine, State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia.