



Обзорная статья
УДК 612.172.2(045)
DOI: 10.37482/2687-1491-Z287

Вариабельность сердечного ритма: индивидуальные различия, роль в нейровисцеральной интеграции и оценке адаптационного потенциала человека (обзор)

Борис Юрьевич Михайленко* ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4983-9218>
Михаил Николаевич Панков** ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3293-5751>

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
(Архангельск, Россия)

**Северный государственный медицинский университет
(Архангельск, Россия)

Аннотация. В данной статье систематизируются современные представления о вариабельности сердечного ритма (ВСП) как неинвазивном маркере нейровисцеральной интеграции и адаптационного потенциала человека. Рассматриваются основные методы анализа ВСП (временные, частотные и нелинейные), ее онтогенетическая динамика, включая пик в молодом возрасте и прогрессирующее снижение при старении, а также индивидуальные различия (гендерные, генетические). Особое внимание уделено роли ВСП в оценке функционального состояния организма человека, его стрессоустойчивости, когнитивной эффективности и связи ВСП с риском сердечно-сосудистых событий. В рамках модели нейровисцеральной интеграции, объединяющей активность центральной автономной сети (в частности, вентромедиальной префронтальной коры) с вегетативным балансом, обсуждается значение ВСП для прогнозирования долголетия и поддержания здоровья. Подчеркивается, что высокие показатели ВСП, особенно у долгожителей, коррелируют с лучшей сохранностью регуляторных систем. В обзоре также освещаются практические аспекты применения ВСП-мониторинга для объективной оценки психического напряжения и когнитивной нагрузки в реальном времени, в т. ч. в профессиональных группах (например, у медицинских работников и спортсменов). Обсуждаются методологические аспекты интерпретации показателей ВСП, необходимость учета вмешивающихся факторов (частота сердечных сокращений, фрагментация ритма) и перспективы использования новых интегральных индексов и нелинейных методов для повышения диагностической чувствительности. Делается вывод о том, что ВСП представляет собой мощный инструмент комплексной

© Михайленко Б.Ю., Панков М.Н., 2026

Ответственный за переписку: Борис Юрьевич Михайленко, адрес: 163001, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; e-mail: borisstarkov06@gmail.com

Михайленко Б.Ю., Панков М.Н.

Вариабельность сердечного ритма: индивидуальные различия, роль в нейровисцеральной интеграции...

оценки адаптационного резерва, объединяющий показатели вегетативного баланса, центральной регуляции и психофизиологического состояния, что открывает пути для интеграции данного маркера в профилактическую и клиническую медицину.

Ключевые слова: *вариабельность сердечного ритма, нейровисцеральная интеграция, адаптационный потенциал организма, стрессоустойчивость, симпатовагальный баланс, центральная автономная сеть*

Для цитирования: Михайленко, Б. Ю. Вариабельность сердечного ритма: индивидуальные различия, роль в нейровисцеральной интеграции и оценке адаптационного потенциала человека (обзор) / Б. Ю. Михайленко, М. Н. Панков // Журнал медико-биологических исследований. – 2026. – Т. 14, № 2. – С. 91-105. – DOI 10.37482/2687-1491-Z287.

Review article

Heart Rate Variability: Individual Differences, Role in Neurovisceral Integration and Assessment of Human Adaptive Potential (Review)

Boris Yu. Mikhaylenko* ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4983-9218>

Mikhail N. Pankov** ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3293-5751>

*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russia)

**Northern State Medical University
(Arkhangelsk, Russia)

Abstract. This review systematizes contemporary concepts of heart rate variability (HRV) as a non-invasive marker of neurovisceral integration and human adaptive potential. The authors consider the main methods of HRV analysis (temporal, frequency, and non-linear) and its ontogenetic dynamics, including a peak in young adulthood and progressive decline with aging, as well as individual differences (gender, genetic). Special attention is paid to the role of HRV in assessing the functional state of the human body, stress resistance, and cognitive performance, as well as the association of HRV with the risk of cardiovascular events. Within the framework of the neurovisceral integration model, which links the activity of the central autonomic network (particularly the ventromedial prefrontal cortex) with autonomic balance, the significance of HRV for predicting longevity and maintaining health is discussed. It is emphasized that high HRV values, especially among long-livers, correlate with better preservation of regulatory systems. The review also highlights practical aspects of using HRV monitoring for the objective, real-time assessment of mental strain and cognitive load, including in professional groups (e.g., healthcare workers and athletes). Methodological aspects of interpreting HRV indices, the necessity of accounting for confounding factors (heart rate, heart rhythm fragmentation), and the prospects of using new integral indices and non-linear methods to improve

Corresponding author: Boris Mikhaylenko, *address:* nab. Severnoy Dviny 17, Arkhangelsk, 163001, Russia; *e-mail:* borisstarkov06@gmail.com

diagnostic sensitivity are examined. It is concluded that HRV is a powerful tool for the comprehensive assessment of adaptive reserve, integrating indicators of autonomic balance, central regulation, and psychophysiological state, which paves the way for its integration into preventive and clinical medicine.

Keywords: *heart rate variability, neurovisceral integration, adaptive potential of the body, stress resistance, sympathovagal balance, central autonomic network*

For citation: Mikhaylenko B.Yu., Pankov M.N. Heart Rate Variability: Individual Differences, Role in Neurovisceral Integration and Assessment of Human Adaptive Potential (Review). *Journal of Medical and Biological Research*, 2026, vol. 14, no. 2, pp. 91–105. DOI: 10.37482/2687-1491-Z287

Вариабельность сердечного ритма (ВСР) – физиологическое явление, отражающее колебания длительности последовательных кардиоинтервалов (R-R-интервалов), – давно перестала быть предметом исключительно научного интереса. На сегодняшний день признано, что ВСР служит интегральным неинвазивным маркером активности вегетативной нервной системы (ВНС), индикатором адаптационного потенциала организма, а также оценивает эффективность нейровисцеральной интеграции – скоординированной работы центральных мозговых структур, регулирующих внутренний гомеостаз и поведенческие реакции [1, 2].

Актуальность комплексного изучения ВСР обусловлена ее высокой чувствительностью к широкому спектру факторов: от генетической детерминации и возрастно-половых особенностей до острых и хронических психоэмоциональных нагрузок. Анализ ВСР позволяет оценить баланс симпатического и парасимпатического отделов ВНС и получить информацию о функциональном состоянии высших надсегментарных центров регуляции, в частности префронтальной коры, что связывает соматическое здоровье с когнитивно-эмоциональной сферой [3, 4].

Целью данной обзорной статьи является систематизация современных представлений о ВСР как ключевом индикаторе адаптационного резерва. В работе последовательно рассматриваются: основные показатели ВСР, их онтогенетические и индивидуальные различия, роль ВСР в модели нейровисцеральной интеграции, а также практическое применение ВСР для оценки стрессоустойчивости, когнитивной эффективности и прогнозирования долголетия.

Краткий обзор основных показателей ВСР

Анализ ВСР базируется на обработке динамического ряда R-R-интервалов, зарегистрированных с помощью электрокардиографии или кардиоинтервалографии. Существующие методы оценки, стандартизованные международными рекомендациями [1, 2], можно разделить на три основные группы: временные, частотные и геометрические [5, 6].

Временные (статистические) показатели рассчитываются непосредственно из ряда R-R-интервалов и наиболее широко используются в клинической практике [3, 7]:

- SDNN (мс) – стандартное отклонение всех нормальных интервалов (NN). Является интегральным показателем общей ВСР. Снижение SDNN указывает на уменьшение общего адаптационного резерва [1];

- RMSSD (мс) и pNN50 (%) – показатели, наиболее тесно связанные с быстрыми, дыхательными влияниями. RMSSD вычисляется как квадратный корень из среднего квадратов последовательных разностей интервалов, а pNN50 отражает долю пар соседних интервалов, различающихся более чем на 50 мс [1, 3];

- MxDMn, или вариационный размах, ΔX (мс), – разность между максимальным и минимальным R-R-интервалами. Рассматривается как маркер преимущественно парасимпатических влияний [5].

Частотные (спектральные) показатели получают с помощью спектрального анализа, который позволяет выделить периодические составляющие в колебаниях ритма и оценить мощность этих колебаний в определенных частотных диапазонах [1, 8]:

- HF (мс^2) – мощность высокочастотного компонента (0,15–0,40 Гц). Маркер парасимпатической активности, тесно коррелирует с дыхательной аритмией;

- LF (мс^2) – мощность низкочастотного компонента (0,04–0,15 Гц). Современные данные указывают на его смешанное происхождение с вкладом как симпатической системы, так и барорефлекс-опосредованных парасимпатических влияний;

- VLF (мс^2) – мощность очень низкочастотного компонента (0,003–0,04 Гц). Его генез до конца не ясен; предполагается связь с гуморально-метаболическими влияниями, терморегуляцией и активностью ренин-ангиотензиновой системы;

- LF/HF – соотношение мощностей низко- и высокочастотного компонентов. Несмотря на продолжающиеся методологические споры о его точной интерпретации, он широко используется в исследовательской практике как индекс, отражающий сдвиг вегетативного баланса.

Геометрические и нелинейные методы включают анализ формы гистограммы распределения R-R-интервалов, а также анализ Пуанкаре (SD1/SD2), детрендрованный флуктуационный анализ и энтропийные методы [1]. Ключевым производным показателем является *индекс напряжения (стресс-индекс)*, отражающий активность симпатического звена и степень централизации управления ритмом [5, 6].

Онтогенетические аспекты и индивидуальные различия ВСР

Возрастная динамика и связь с долголетием. Возрастная динамика ВСР имеет сложный, нелинейный характер, определяемый процессами созревания, старения организма и его коморбидным фоном. В детском и подростковом возрасте происходит значительный рост показателей ВСР, достигающий пика к концу пубертатного периода [9, 10]. Динамика снижения ВСР с возрастом нелинейна – например, показатели SDNN, RMSSD и pNN50 демонстрируют резкое изменение характера зависимости от возраста: у детей старше 12 лет проявляются гендерные различия,

затрагивающие преимущественно высокочастотный компонент [11]. Также исследования, проведенные в группах школьников, указывают на возрастные различия в реактивности вегетативной системы при ортостатической нагрузке, что подтверждает различия в высокочастотном компоненте [12].

У взрослых людей по мере старения наблюдается прогрессирующее снижение ВСР, затрагивающее как парасимпатические (RMSSD, pNN50, HF), так и глобальные (SDNN, LF) маркеры. Лонгитюдные данные [13] демонстрируют устойчивую тенденцию к уменьшению временных и частотных показателей ВСР, причем его темп выше в более молодых возрастных группах. SDNN может снижаться к 60–70 годам на 25–50 % от пиковых значений молодого возраста.

Согласно ключевому выводу лонгитюдного исследования [13], возрастное уменьшение ВСР в большей степени является нормативным, т. е. обусловлено самим процессом старения. При этом изменения отдельных показателей могут различаться: глобальный маркер SDNN показывает линейное снижение, в то время как парасимпатические маркеры RMSSD, pNN50 могут проявлять нелинейную динамику (например, U-образный паттерн с наименьшими значениями примерно в 50–55 лет).

Особый интерес представляет динамика ВСР у лиц, достигших исключительного долголетия (старше 100 лет). С одной стороны, в этой группе продолжается возрастное снижение парасимпатических компонентов ВСР. С другой стороны, индивидуальные значения, в частности показателя SDNN, оказываются важным предиктором выживаемости. Низкие значения SDNN (<19 мс) являются маркером повышенного риска смертности у лиц старше 100 лет, тогда как относительно высокие – ассоциированы с большей продолжительностью жизни [14]. Таким образом, поддержание оптимальных значений ВСР в пожилом и старческом возрасте можно рассматривать как индикатор сохранности регуляторных систем организма, что согласуется с теоретической моделью нейровисцеральной интеграции [15].

Важным фактором, осложняющим интерпретацию возрастных изменений «вагусных» показателей (pNN50, RMSSD, HF), служит фрагментация ритма сердца (ФРС). Этот феномен, предположительно связанный с изменениями проводящей системы сердца, может приводить к артефактному завышению показателей ВСР. ФРС может указывать на патологию, ассоциированную с повышенным риском сердечно-сосудистых событий, и поэтому данный фактор необходимо учитывать при исследовании пожилых пациентов [16, 17].

Таким образом, несмотря на общую тенденцию к снижению ВСР с возрастом, абсолютные величины и скорость этого снижения варьируют в зависимости от конкретного показателя, состояния здоровья человека и возрастного периода. Нелинейные траектории некоторых маркеров, возможность их артефактного завышения вследствие ФРС, а также выявленная прогностическая роль SDNN у долгожителей требуют осторожности в интерпретации данных ВСР и дальнейшего их изучения для установления истинной клинической значимости ВСР в разных возрастных группах.

Гендерные различия. Особенности ВСР у людей разного пола в значительной степени опосредованы влиянием половых гормонов на ВНС. Многочисленные исследования свидетельствуют о более высоком парасимпатическом тоне у женщин репродуктивного возраста по сравнению с мужчинами, что проявляется в статистически значимо больших значениях вагус-ассоциированных параметров, таких как RMSSD и HF [18, 19]. Это подтверждается, например, данными лонгитюдного исследования Whitehall II, где у женщин 44–69 лет исходно регистрировались более высокие значения HF [13].

В то же время некоторые работы демонстрируют противоположную тенденцию. Так, в когорте Vaerendi в возрастной группе 18–30 лет среднее значение RMSSD у мужчин оказалось выше (60 мс против 47 мс у женщин) [20]. Противоречия в результатах исследований Vaerendi и Whitehall II могут объясняться зависимостью

параметров ВСР от частоты сердечных сокращений (ЧСС), которая не всегда учитывалась в статистическом анализе [21].

Гендерные различия нивелируются после 50 лет, что связывают с уменьшением уровня эстрогенов у женщин в постменопаузе [18]. Это подтверждается данными лонгитюдных исследований (например, [13]), показывающих сходные траектории снижения ВСР у мужчин и женщин в указанном возрасте. В кросс-секционных исследованиях полное выравнивание показателей наблюдается в более старших возрастных группах: так, в когорте Vaerendi у лиц старше 60 лет разница в средних значениях RMSSD между мужчинами и женщинами полностью исчезала (40 мс в обеих группах), а разница по pNN50 сокращалась до 2 % [20].

Таким образом, гендерные различия в вегетативной регуляции сердца носят динамический характер и тесно связаны с гормональным статусом. Противоречивость данных в разных крупных когортах указывает на необходимость применения более строгих методологических подходов в будущих исследованиях. Для получения однозначных выводов требуется использование статистических методов, учитывающих влияние ЧСС (ковариационный анализ, нелинейные регрессионные модели), и стандартизированных протоколов, позволяющих нивелировать влияние вмешивающихся факторов.

Генетическая детерминация. Результаты исследования [22], проведенного на репрезентативной популяционной выборке молодых взрослых близнецов ($n = 1060$), демонстрируют значимую генетическую детерминацию ВСР. Было показано, что индивидуальные различия в параметрах ВСР объясняются аддитивными генетическими влияниями и уникальной средой. При этом статистически значимый вклад факторов общей для членов семьи среды выявлен не был, что свидетельствует о преимущественно генетической природе сходства между родственниками по изучаемым признакам. Оценки наследуемости (h^2) варьировали от 47 до 64 %, причем они были сопоставимы для

показателей, полученных в разных областях измерения: временной, частотной и нелинейной динамики.

Важно отметить, что наследуемость ВСП в значительной степени независима от наследуемости ЧСС. Многомерный генетический анализ показал наличие специфической генетической дисперсии ВСП, не связанной с ЧСС [22]. Таким образом, около 40 % генетической вариативности ВСП является общей с ЧСС, тогда как оставшаяся часть обусловлена независимыми генетическими факторами. Это указывает на то, что, несмотря на функциональную взаимосвязь, генетическая архитектура ВСП и ЧСС не идентична, и ВСП представляет собой самостоятельный, высоконаследуемый признак.

Крупное полногеномное ассоциативное исследование (GWAS) выявило множество локусов, значимо связанных с ВСП, что подтверждает сложную полигенную природу этого признака и его связь с генами, вовлеченными в развитие сердечной мышцы и нейронные функции [23]. Другие работы подчеркивают генетическую связь между ВСП и риском сердечно-сосудистых заболеваний, а также наличие общей генетической основы для ЧСС и кардио-метаболических признаков [24].

ВСП как интегральный маркер адаптационного потенциала.

Нейровисцеральная интеграция

Основу концепции нейровисцеральной интеграции [9, 10] составляет понятие центральной автономной сети (ЦАС) [25, 26]. ЦАС – это интегративная система, которая связывает префронтальную кору, миндалину, островок, гипоталамус и ствол мозга. Согласно модели J.F. Thayer et al. [27, с. 748], ЦАС функционирует как структура, объединяющая восприятие, моторику, interoцепцию и память для генерации адаптивных ответов на изменения среды.

В рамках модели нейровисцеральной интеграции ВСП является отражением эффективного функционирования всей ЦАС [9, 10, 28]. Таким образом, ВСП служит неинвазивным маркером способности организма к гибкому и

адаптивному регулированию внутренних процессов в ответ на внутренние и внешние изменения.

Ранее проведенный метаанализ нейровизуализационных исследований показывает, что активность вентромедиальной префронтальной коры (vmPFC) и смежных областей (включая субгенуальную и прегенуальную переднюю поясную кору – sgACC, pgACC) тесно связана с ВСП. Эти регионы, согласно функциональному разделению vmPFC [29, 30], отвечают за эмоциональные и вегетативные аспекты поведения. Основная функция vmPFC – обеспечение контекстно-зависимого тормозного контроля над субкортикальными центрами, генерирующими реакции на угрозу, такими как миндалина [31–33]. В условиях, когда нет опасности, vmPFC подавляет активность «центров страха», предотвращая избыточные стрессовые реакции [34, 35]. Таким образом, высокая ВСП отражает эффективный контроль со стороны vmPFC, который:

1) выступает в роли тормоза для системы реакции на стресс: снижает возбуждение миндалины и, как следствие, нивелирует избыточную активацию симпатической нервной системы, не давая ей перейти в режим гипермобилизации [10, 27];

2) способствует подавлению условных страхов [36];

3) обеспечивает адекватное распознавание сигналов безопасности, противодействуя врожденной гиперчувствительности к угрозам [37].

Нейровизуализационные исследования последних лет предоставляют прямые доказательства этой связи. Показано, что ВСП коварирует с функциональной связностью между миндалиной и префронтальной корой во время добровольной регуляции эмоций, что является ключевым механизмом нейровисцеральной интеграции [38]. Также продемонстрировано, что вариации ВСП непосредственно отражают активность ЦАС в условиях стресса [39]. Интересные данные получены в исследовании биологической обратной связи по ВСП: было показано, что такой тренинг повышает нейровисцераль-

ную сложность, что напрямую связано с улучшением адаптивного ответа на стресс [40].

Напротив, снижение ВСР наблюдается при гипоактивности vmPFC, что приводит к росту активности стресс-реактивных систем, истощению ресурсов организма и хроническому стрессу [41]. Данное состояние характерно для тревожных и депрессивных расстройств [42, 43].

Оценка функционального состояния организма. ВСР как показатель психического напряжения

Снижение ВСР является общепризнанным маркером стресса и повышенной когнитивной нагрузки, что подтверждается исследованиями в различных профессиональных группах, например операторов и медицинских работников. В условиях стресса активируется симпатическая нервная система, что выражается в уменьшении HF и увеличении LF [8, 44]. Метаанализ, включавший 37 публикаций, показал стойкую связь между состоянием стресса, снижением вагусной активности и повышением симпатического влияния [44].

Современные исследования продолжают углублять понимание ВСР как биомаркера стресса. Предлагаются новые интегральные показатели ВСР, специально разработанные для более надежной количественной оценки состояния стресса и расслабления [45]. Подтверждается, что ВСР остается валидным инструментом для понимания связи между автономной нервной системой и аффективными состояниями [46]. Важное место занимают методологические обзоры, систематизирующие применение различных показателей ВСР в психологических исследованиях стресса, эмоциональной регуляции и когнитивных процессов (например, [47]), а также обзоры, подчеркивающие клиническую значимость ВСР для оценки психического напряжения (например, [48]). Исследование, проведенное с участием спортсменов, показывает, что анализ ВСР эффективен для мониторинга адаптации к стрессу и нагрузкам, при этом также выявляются возрастные и половые особенности реакции [49].

Профессиональный стресс в медицине, например при работе в ночную смену, служит наглядной моделью адаптационных изменений. Непрерывное обследование врачей-хирургов круглосуточного стационара в течение 17-часового ночного дежурства обнаружило у них выраженный сдвиг вегетативного баланса в сторону симпатического доминирования в условиях профессионального стресса и недосыпания, что проявлялось значимым снижением мощности высокочастотного компонента ВСР и повышением соотношения LF/HF на фоне увеличения средней ЧСС [50].

Исследование когнитивной нагрузки с участием студентов-медиков, выполнявших задачи на клиническое мышление, показало сложные взаимоотношения между ВСР, когнитивной нагрузкой и производительностью. Была обнаружена положительная корреляция между самоотчетным уровнем когнитивной нагрузки (обусловленной сложностью задачи) и показателями ВСР в частотной (LF) и временной (SDNN, RMSSD) областях. В то же время более высокие самоотчетные оценки общей когнитивной нагрузки, а также большая средняя ЧСС ассоциировались с худшими результатами тестирования клинического мышления [51]. Это подчеркивает, что ВСР может отражать качество вегетативной адаптации к умственным нагрузкам при выполнении задач, причем как чрезмерная, так и недостаточная активация ВНС могут обуславливать снижение когнитивной производительности.

Нелинейные методы анализа ВСР, такие как расчет энтропии, демонстрируют повышенную чувствительность для выявления стрессовых состояний по сравнению с определением традиционных спектральных показателей [52]. Исследование адаптации студентов к учебной нагрузке подтверждает, что преобладание парасимпатической активности (высокая ВСР) ассоциировано с лучшей устойчивостью к когнитивному стрессу [53]. В другом исследовании у студентов с опережающим биологическим возрастом было выявлено напряжение регуляторных систем (повышенный индекс

напряжения ВСП) и снижение адаптационного потенциала [54].

Таким образом, мониторинг ВСП позволяет объективно оценивать уровень нервно-психического напряжения и когнитивной нагрузки в реальном времени как в острых стрессовых условиях, так и в процессе сложной умственной деятельности.

**Оптимальный баланс
между парасимпатическим тонусом
и контролируемой симпатической
активностью**

Высокая производительность в условиях сложных задач часто ассоциируется с состоянием оптимального психофизиологического баланса, иногда описываемого как «сфокусированное спокойствие». Это состояние характеризуется стабильно эффективным вагусным контролем (высокие значения HF и RMSSD), который обеспечивает быструю вегетативную адаптацию и эмоциональную устойчивость, и умеренной, целенаправленной симпатической активацией, необходимой для поддержания внимания и когнитивной деятельности [44].

Исследования показывают, что высокая ВСП в покое связана с лучшими исполнительными функциями, включая рабочую память и переключение между задачами [44]. В контексте профессиональной деятельности это означает способность сохранять ясность мышления, эмоциональную стабильность и эффективный самоконтроль даже в напряженных ситуациях. Напротив, состояние острого профессионального стресса, как у хирургов в ночную смену, характеризуется снижением вагусного контроля (падение HF) и чрезмерным симпатическим доминированием (рост LF/HF и ЧСС), что может подрывать когнитивные ресурсы и повышать риск ошибок в долгосрочной перспективе [50].

Следовательно, развитие и поддержание высокой ВСП при помощи практик, направленных на усиление вагусного тонуса (например, дыхательные упражнения, биологическая обратная связь, психическая саморегуляция), могут стать ключом к достижению и сохранению состояния «сфокусированного спокойствия»,

необходимого для оптимальной производительности, устойчивости к стрессу и долгосрочного профессионального здоровья в медицинской и других сферах деятельности, предполагающих серьезные нервно-психические и когнитивные нагрузки.

Заключение

ВСП в современной физиологии и клинической практике рассматривается как неинвазивный маркер, отражающий состояние вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы, а также более сложные системные процессы нейровисцеральной интеграции. Как показано в настоящем обзоре, ВСП является чувствительным индикатором адаптационного потенциала организма, связывающим соматическое здоровье с когнитивно-эмоциональной сферой.

ВСП оценивается с помощью временных, частотных и нелинейных показателей, каждый из которых отражает различные аспекты вегетативного баланса и регуляторной пластичности. При интерпретации показателей ВСП, особенно вагус-ассоциированных, необходимы статистическая поправка на ЧСС и учет возможного влияния ФРС во избежание методологических ошибок. Актуально введение в исследование интегральных индексов для оценки стресса [45] и применение нелинейных методов (энтропии) для снижения статистических погрешностей в анализе ВСП [52].

ВСП демонстрирует нелинейную возрастную траекторию, достигая пика в молодом возрасте и прогрессивно снижаясь в процессе старения. Гендерные различия, опосредованные влиянием половых гормонов, носят динамический характер и нивелируются в постменопаузе. Исследования на школьниках, такие как [12], подтверждают необходимость учета современных половозрастных нормативов. Генетические исследования доказывают высокую наследуемость ВСП (47–64 %), что свидетельствует о ее значимости как стабильного фенотипического маркера, отражающего врожденные особенности нейровисцеральной регуляции. Данные полногеномных ассоциативных исследований раскрывают полигенную природу ВСП

и ее генетические связи с кардиометаболическим здоровьем [23, 24].

Снижение ВСР ассоциировано с увеличением риска сердечно-сосудистых событий и общей смертности. При этом сохранение относительно высоких значений ВСР, особенно SDNN, у долгожителей является предиктором большей продолжительности жизни, исходя из чего ВСР следует рассматривать как один из индикаторов устойчивости регуляторных систем организма. Исследования на животных моделях указывают на общие метаболические пути, влияющие на долголетие и, возможно, на ВСР [55].

ВСР служит неинвазивным маркером эффективности ЦАС, в частности активности vmPFC. Высокая ВСР коррелирует с оптимальным вегетативным балансом, эмоциональной и физической стрессоустойчивостью, тогда как ее снижение характерно для состояний хронического стресса, тревоги и депрессии. Современные нейровизуализационные исследования предоставляют прямые доказательства ковариации ВСР с функциональной связностью в ключевых контурах мозга, регулирующих эмоции [38, 39], а также того, что тренировка ВСР повышает нейровисцеральную сложность [40].

Мониторинг ВСР позволяет объективно оценивать уровень стресса, когнитивной нагрузки и функционального состояния в реальном времени. Поддержание высокого вагусного тонуса посредством дыхательных практик, биологической обратной связи и методов саморегуляции может способствовать увеличению стрессоустойчивости, когнитивной эффективности и долгосрочному профессиональному здоровью в условиях больших нагрузок. Исследования подтверждают эффективность ВСР для мониторинга адаптации у спортсменов [49] и студентов [53, 54].

Таким образом, ВСР представляет собой мощный инструмент для комплексной оценки адаптационного резерва человека, объединяющий показатели вегетативного баланса, центральной регуляции и психофизиологического состояния. Дальнейшие исследования должны быть направлены на уточнение возрастных и индивидуальных нормативов, разработку стандартизированных протоколов интерпретации с учетом вмешивающихся факторов (таких как ЧСС и ФРС), а также на интеграцию ВСР-мониторинга в профилактическую и клиническую медицину для прогнозирования рисков, оптимизации функционального состояния и продления периода здоровой жизни.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список литературы

1. Malik M., Bigger J.T., Camm A.J., Kleiger R.E., Malliani A., Moss A.J., Schwartz P.J. Heart Rate Variability: Standards of Measurement, Physiological Interpretation and Clinical Use // Eur. Heart J. 1996. Vol. 17, № 3. P. 354–381. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.eurheartj.a014868>
2. Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology. Heart Rate Variability: Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and Clinical Use // Circulation. 1996. Vol. 93, № 5. P. 1043–1065. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>
3. Shaffer F., Ginsberg J.P. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms // Front. Public Health. 2017. Vol. 5. Art. № 258. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>
4. Baevsky R.M., Chernikova A.G. Heart Rate Variability Analysis: Physiological Foundations and Main Methods // Cardiometry. 2017. № 10. P. 66–76. <https://doi.org/10.12710/cardiometry.2017.10.6676>
5. Берёзный Е.А., Рубин А.М., Утехина Г.А. Практическая кардиоритмография. СПб.: Нео, 2005. 140 с.
6. Ходырев Г.Н., Хлыбова С.В., Циркин В.И., Дмитриева С.Л. Методические аспекты анализа временных и спектральных показателей вариабельности сердечного ритма (обзор литературы) // Вят. мед. вестн. 2011. № 3–4. С. 60–70.

7. Искакова К.З. Использование интервалометрии для оценки состояния вегетативной нервной системы (обзор) // Вестн. Казах. нац. мед. ун-та. 2014. № 1. С. 228–230.
8. Ishaque S., Khan N., Krishnan S. Trends in Heart-Rate Variability Signal Analysis // Front. Digit. Health. 2021. Vol. 3. Art. № 639444. <https://doi.org/10.3389/fdgth.2021.639444>
9. Thayer J.F., Lane R.D. A Model of Neurovisceral Integration in Emotion Regulation and Dysregulation // J. Affect. Disord. 2000. Vol. 61, № 3. P. 201–216. [https://doi.org/10.1016/S0165-0327\(00\)00338-4](https://doi.org/10.1016/S0165-0327(00)00338-4)
10. Thayer J.F., Lane R.D. Claude Bernard and the Heart–Brain Connection: Further Elaboration of a Model of Neurovisceral Integration // Neurosci. Biobehav. Rev. 2009. Vol. 33, № 2. P. 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.08.004>
11. Garavaglia L., Gulich D., Defeo M.M., Thomas Mailland J., Irurzun I.M. The Effect of Age on the Heart Rate Variability of Healthy Subjects // PLoS One. 2021. Vol. 16, № 10. Art. № e0255894. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255894>
12. Штина И.Е., Валина С.Л., Маклакова О.А., Устинова О.Ю., Эйфельд Д.А. Гендерные и возрастные особенности 5-минутной кардиоинтервалографии с ортостатической пробой у школьников // Профилактик. медицина. 2022. Т. 25, № 2. С. 49–55. <https://doi.org/10.17116/profmed2022502149>
13. Jandackova V.K., Scholes S., Britton A., Steptoe A. Are Changes in Heart Rate Variability in Middle-Aged and Older People Normative or Caused by Pathological Conditions? Findings from a Large Population-Based Longitudinal Cohort Study // J. Am. Heart Assoc. 2016. Vol. 5, № 2. Art. № e002365. <https://doi.org/10.1161/JAHA.115.002365>
14. Hernández-Vicente A., Hernando D., Santos-Lozano A., Rodríguez-Romo G., Vicente-Rodríguez G., Pueyo E., Bailón R., Garatachea N. Heart Rate Variability and Exceptional Longevity // Front. Physiol. 2020. Vol. 11. Art. № 566399. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.566399>
15. Kemp A.H., Quintana D.S., Felmingham K.L., Matthews S., Jelinek H.F. Depression, Comorbid Anxiety Disorders, and Heart Rate Variability in Physically Healthy, Unmedicated Patients: Implications for Cardiovascular Risk // PLoS One. 2012. Vol. 7, № 2. Art. № e30777. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030777>
16. Hayano J., Yuda E. Pitfalls of Assessment of Autonomic Function by Heart Rate Variability // J. Physiol. Anthropol. 2019. Vol. 38, № 1. Art. № 3. <https://doi.org/10.1186/s40101-019-0193-2>
17. Costa M.D., Redline S., Davis R.B., Heckbert S.R., Soliman E.Z., Goldberger A.B. Heart Rate Fragmentation as a Novel Biomarker of Adverse Cardiovascular Events: The Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis // Front. Physiol. 2018. Vol. 9. Art. № 1117. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01117>
18. Sammito S., Thielmann B., Klusmann A., Deußen A., Braumann K.M., Böckelmann I. Guideline for the Application of Heart Rate and Heart Rate Variability in Occupational Medicine and Occupational Health Science // J. Occup. Med. Toxicol. 2024. Vol. 19, № 1. Art. № 15. <https://doi.org/10.1186/s12995-024-00414-9>
19. Dearing C., Handa R.J., Myers B. Sex Differences in Autonomic Responses to Stress: Implications for Cardiometabolic Physiology // Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab. 2022. Vol. 323, № 3. P. E281–E289. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00058.2022>
20. Geovanini G.R., Vasques E.R., de Oliveira Alvim R., Mill J.G., Andreão R.V., Vasques B.K., Pereira A.C., Krieger J.E. Age and Sex Differences in Heart Rate Variability and Vagal Specific Patterns – Baependi Heart Study // Glob. Heart. 2020. Vol. 15, № 1. Art. № 71. <https://doi.org/10.5334/gh.873>
21. Monfredi O., Lyashkov A.E., Johnsen A.B., Inada S., Schneider H., Wang R., Nirmalan M., Wisloff U., Maltsev V.A., Lakatta E.G., Zhang H., Boyett M.R. Biophysical Characterization of the Underappreciated and Important Relationship Between Heart Rate Variability and Heart Rate // Hypertension. 2014. Vol. 64, № 6. P. 1334–1343. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.114.03782>
22. Golosheykin S., Grant J.D., Novak O.V., Heath A.C., Anokhin A.P. Genetic Influences on Heart Rate Variability // Int. J. Psychophysiol. 2017. Vol. 115. P. 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2016.04.008>
23. Nolte I.M., Munoz M.L., Tragante V., Amare A.T., Jansen R., Vaez A., von der Heyde B., Avery C.L., Bis J.C., Dierckx B. et al. Genetic Loci Associated with Heart Rate Variability and Their Effects on Cardiac Disease Risk // Nat. Commun. 2017. Vol. 8. Art. № 15805. <https://doi.org/10.1038/ncomms15805>
24. van de Vegte Y.J., Eppinga R.N., van der Ende M.Y., Hagemeyer Y.P., Mahendran Y., Salfati E., Smith A.V., Tan V.Y., Arking D.E., Ntalla I. et al. Genetic Insights into Resting Heart Rate and Its Role in Cardiovascular Disease // Nat. Commun. 2023. Vol. 14. Art. № 4646. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39521-2>

25. Benarroch E.E. The Central Autonomic Network: Functional Organization, Dysfunction, and Perspective // Mayo Clin. Proc. 1993. Vol. 68, № 10. P. 988–1001. [https://doi.org/10.1016/S0025-6196\(12\)62272-1](https://doi.org/10.1016/S0025-6196(12)62272-1)
26. Central Autonomic Network / ed. by E.E. Benarroch // Autonomic Neurology / ed. by E.E. Benarroch. New York, 2014. P. 3–14. <https://doi.org/10.1093/med/9780199920198.003.0001>
27. Thayer J.F., Åhs F., Fredrikson M., Sollers III J.J., Wager T.D. A Meta-Analysis of Heart Rate Variability and Neuroimaging Studies: Implications for Heart Rate Variability as a Marker of Stress and Health // Neurosci. Biobehav. Rev. 2012. Vol. 36, № 2. P. 747–756. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.11.009>
28. Thayer J.F., Broschot J.F. Psychosomatics and Psychopathology: Looking up and down from the Brain // Psychoneuroendocrinology. 2005. Vol. 30, № 10. P. 1050–1058. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2005.04.014>
29. Amodio D.M., Frith C.D. Meeting of Minds: The Medial Frontal Cortex and Social Cognition // Nat. Rev. Neurosci. 2006. Vol. 7, № 4. P. 268–277. <https://doi.org/10.1038/nrn1884>
30. Bush G., Luu P., Posner M.I. Cognitive and Emotional Influences in Anterior Cingulate Cortex // Trends Cogn. Sci. 2000. Vol. 4, № 6. P. 215–222. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01483-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01483-2)
31. Delgado M.R., Nearing K.I., LeDoux J.E., Phelps E.A. Neural Circuitry Underlying the Regulation of Conditioned Fear and Its Relation to Extinction // Neuron. 2008. Vol. 59, № 5. P. 829–838. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.06.029>
32. Milad M.R., Quirk G.J. Neurons in Medial Prefrontal Cortex Signal Memory for Fear Extinction // Nature. 2002. Vol. 420, № 6911. P. 70–74. <https://doi.org/10.1038/nature01138>
33. Quirk G.J., Beer J.S. Prefrontal Involvement in the Regulation of Emotion: Convergence of Rat and Human Studies // Curr. Opin. Neurobiol. 2006. Vol. 16, № 6. P. 723–727. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2006.07.004>
34. Amat J., Paul E., Zarza C., Watkins L.R., Maier S.F. Previous Experience with Behavioral Control over Stress Blocks the Behavioral and Dorsal Raphe Nucleus Activating Effects of Later Uncontrollable Stress: Role of the Ventral Medial Prefrontal Cortex // J. Neurosci. 2006. Vol. 26, № 51. P. 13264–13272. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3630-06.2006>
35. Milad M.R., Wright C.I., Orr S.P., Pitman R.K., Quirk G.J., Rauch S.L. Recall of Fear Extinction in Humans Activates the Ventromedial Prefrontal Cortex and Hippocampus in Concert // Biol. Psychiatry. 2007. Vol. 62, № 5. P. 446–454. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.10.011>
36. Enter D., Terburg D., Harrewijn A., Spinhoven P., Roelofs K. Single Dose Testosterone Administration Alleviates Gaze Avoidance in Women with Social Anxiety Disorder // Psychoneuroendocrinology. 2016. Vol. 63. P. 26–33. <https://dx.doi.org/10.1016/j.psyneuen.2015.09.008>
37. Cacioppo J.T., Gardner W.L., Berntson G.G. The Affect System Has Parallel and Integrative Processing Components: Form Follows Function // J. Pers. Soc. Psychol. 1999. Vol. 76, № 5. P. 839–855. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.76.5.839>
38. Tupitsa E., Egbuniwe I., Lloyd W.K., Puertollano M., Macdonald B., Joanknecht K., Sakaki M., van Reekum C.M. Heart Rate Variability Covaries with Amygdala Functional Connectivity During Voluntary Emotion Regulation // NeuroImage. 2023. Vol. 274. Art. № 120136. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120136>
39. Huber A., Koenig J., Bruns B., Bendszus M., Friederich H.C., Simon J.J. Brain Activation and Heart Rate Variability as Markers of Autonomic Function under Stress // Sci. Rep. 2025. Vol. 15, № 1. Art. № 28114. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12430-8>
40. Deschodt-Arsac V., Blons E., Gilfriche P., Spiluttini B., Arsac L.M. Entropy in Heart Rate Dynamics Reflects How HRV-Biofeedback Training Improves Neurovisceral Complexity During Stress-Cognition Interactions // Entropy (Basel). 2020. Vol. 22, № 3. Art. № 317. <https://doi.org/10.3390/e22030317>
41. McEwen B.S. Protective and Damaging Effects of Stress Mediators // N. Engl. J. Med. 1998. Vol. 338, № 3. P. 171–179. <https://doi.org/10.1056/NEJM199801153380307>
42. Etkin A., Wager T.D. Functional Neuroimaging of Anxiety: A Meta-Analysis of Emotional Processing in PTSD, Social Anxiety Disorder, and Specific Phobia // Am. J. Psychiatry. 2007. Vol. 164, № 10. P. 1476–1488. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2007.07030504>
43. Thayer J.F., Friedman B.H. Stop That! Inhibition, Sensitization, and Their Neurovisceral Concomitants // Scand. J. Psychol. 2002. Vol. 43, № 2. P. 123–130. <https://doi.org/10.1111/1467-9450.00277>
44. Dong J.G. The Role of Heart Rate Variability in Sports Physiology (Review) // Exp. Ther. Med. 2016. Vol. 11, № 5. P. 1531–1536. <https://doi.org/10.3892/etm.2016.3104>

45. Rudics E., Buzas A., Pálfi A., Szabó Z., Nagy Á., Hompoth E.A., Dombi J., Bilicki V., Szendi I., Dér A. Quantifying Stress and Relaxation: A New Measure of Heart Rate Variability as a Reliable Biomarker // *Biomedicines*. 2025. Vol. 13, № 1. Art. № 81. <https://doi.org/10.3390/biomedicines13010081>
46. Gullett N., Zajkowska Z., Walsh A., Harper R., Mondelli V. Heart Rate Variability (HRV) as a Way to Understand Associations Between the Autonomic Nervous System (ANS) and Affective States: A Critical Review of the Literature // *Int. J. Psychophysiol.* 2023. Vol. 192. P. 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2023.08.001>
47. Pham T., Lau Z.J., Chen S.H.A., Makowski D. Heart Rate Variability in Psychology: A Review of HRV Indices and an Analysis Tutorial // *Sensors (Basel)*. 2021. Vol. 21, № 12. Art. № 3998. <https://doi.org/10.3390/s21123998>
48. Perek S., Raz-Pasteur A. Heart Rate Variability: The Age-Old Tool Still Remains Current // *Harefuah*. 2021. Vol. 160, № 8. P. 533–536 (in Hebrew).
49. Марков А.И. Вариабельность сердечного ритма у лыжников-гонщиков Республики Коми 15–18 лет: возрастные и половые различия // *Журн. мед.-биол. исследований*. 2019. Т. 7, № 2. С. 151–160. <https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2019.7.2.151>
50. Amirian I., Andersen L.T., Rosenberg J., Gögenur I. Decreased Heart Rate Variability in Surgeons During Night Shifts // *Can. J. Surg.* 2014. Vol. 57, № 5. P. 300–304. <https://doi.org/10.1503/cjs.028813>
51. Solhjoo S., Haigney M.C., McBee E., van Merriënboer J.J.G., Artino Jr. A.R., Battista A., Ratcliffe T.A., Lee H.D., Durning S.J. Heart Rate and Heart Rate Variability Correlate with Clinical Reasoning Performance and Self-Reported Measures of Cognitive Load // *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9, № 1. Art. № 14668. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50280-3>
52. Димитриев Д.А., Саперова Е.В., Димитриев А.Д., Салимов Э.Р. Использование нелинейных параметров вариабельности сердечного ритма для выявления стресса // *Журн. мед.-биол. исследований*. 2021. Т. 9, № 3. С. 265–274. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z064>
53. Яманова Г.А. Тип регуляции сердечного ритма как критерий адаптации к условиям обучения // *Человек. Спорт. Медицина*. 2021. Т. 21, № 1. С. 62–70. <https://doi.org/10.14529/hsm210108>
54. Михайлова С.В., Хрычева Т.В. Адаптационные, регуляторные и функциональные возможности студентов с разным биологическим возрастом по шкале «Bio-age» // *Журн. мед.-биол. исследований*. 2023. Т. 11, № 3. С. 265–277. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z147>
55. Mao K., Quipildor G.F., Tabrizian T., Novaj A., Guan F., Walters R.O., Delahaye F., Hubbard G.B., Ikeno Y., Ejima K. et al. Late-Life Targeting of the IGF-1 Receptor Improves Healthspan and Lifespan in Female Mice // *Nat. Commun.* 2018. Vol. 9, № 1. Art. № 2394. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04805-5>

References

1. Malik M., Bigger J.T., Camm A.J., Kleiger R.E., Malliani A., Moss A.J., Schwartz P.J. Heart Rate Variability: Standards of Measurement, Physiological Interpretation and Clinical Use. *Eur. Heart J.*, 1996, vol. 17, no. 3, pp. 354–381. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.eurheartj.a014868>
2. Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology. Heart Rate Variability: Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and Clinical Use. *Circulation*, 1996, vol. 93, no 5, pp. 1043–1065. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>
3. Shaffer F., Ginsberg J.P. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Front. Public Health*, 2017, vol. 5. Art. no. 258. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>
4. Baevsky R.M., Chernikova A.G. Heart Rate Variability Analysis: Physiological Foundations and Main Methods. *Cardiometry*, 2017, no. 10, pp. 66–76. <https://doi.org/10.12710/cardiometry.2017.10.6676>
5. Bereznyy E.A., Rubin A.M., Utekhina G.A. *Prakticheskaya kardioritmografiya* [Practical Cardiorythmography]. St. Petersburg, 2005. 140 p.
6. Khodyrev G.N., Khlybova S.V., Tsirkin V.I., Dmitrieva S.L. Methodological Aspects of Analysis of Temporal and Spectral Parameters of Heart Rate Variability (Review). *Vjatsky Medical Bulletin*, 2011, no. 3–4, pp. 60–70 (in Russ.).
7. Iskakova K.Z. Ispol'zovaniye intervalometrii dlya otsenki sostoyaniya vegetativnoy nervnoy sistemy (obzor) [Use of Intervalometry for Assessment of the Autonomic Nervous System State (Review)]. *Bulletin of KazNMU*, 2014, no. 1, pp. 228–230 (in Russ.).

8. Ishaque S., Khan N., Krishnan S. Trends in Heart-Rate Variability Signal Analysis. *Front. Digit. Health*, 2021, vol. 3. Art. no. 639444. <https://doi.org/10.3389/fgdth.2021.639444>
9. Thayer J.F., Lane R.D. A Model of Neurovisceral Integration in Emotion Regulation and Dysregulation. *J. Affect. Disord.*, 2000, vol. 61, no. 3, pp. 201–216. [https://doi.org/10.1016/S0165-0327\(00\)00338-4](https://doi.org/10.1016/S0165-0327(00)00338-4)
10. Thayer J.F., Lane R.D. Claude Bernard and the Heart–Brain Connection: Further Elaboration of a Model of Neurovisceral Integration. *Neurosci. Biobehav. Rev.*, 2009, vol. 33, no. 2, pp. 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.08.004>
11. Garavaglia L., Gulich D., Defeo M.M., Thomas Mailland J., Irurzun I.M. The Effect of Age on the Heart Rate Variability of Healthy Subjects. *PLoS One*, 2021, vol. 16, no. 10. Art. no. e0255894. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255894>
12. Shtina I.E., Valina S.L., Maklakova O.A., Ustinova O.Yu., Eisfeld D.A. Gender and Age Features of 5-Minute Cardiointervalography with Orthostatic Test in Schoolchildren. *Rus. J. Prev. Med.*, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 49–55 (in Russ.). <https://doi.org/10.17116/profmed2022502149>
13. Jandackova V.K., Scholes S., Britton A., Steptoe A. Are Changes in Heart Rate Variability in Middle-Aged and Older People Normative or Caused by Pathological Conditions? Findings from a Large Population-Based Longitudinal Cohort Study. *J. Am. Heart Assoc.*, 2016, vol. 5, no. 2. Art. no. e002365. <https://doi.org/10.1161/JAHA.115.002365>
14. Hernández-Vicente A., Hernando D., Santos-Lozano A., Rodríguez-Romo G., Vicente-Rodríguez G., Pueyo E., Bailón R., Garatachea N. Heart Rate Variability and Exceptional Longevity. *Front. Physiol.*, 2020, vol. 11. Art. no. 566399. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.566399>
15. Kemp A.H., Quintana D.S., Felmingham K.L., Matthews S., Jelinek H.F. Depression, Comorbid Anxiety Disorders, and Heart Rate Variability in Physically Healthy, Unmedicated Patients: Implications for Cardiovascular Risk. *PLoS One*, 2012, vol. 7, no. 2. Art. no. e30777. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030777>
16. Hayano J., Yuda E. Pitfalls of Assessment of Autonomic Function by Heart Rate Variability. *J. Physiol. Anthropol.*, 2019, vol. 38, no. 1. Art. no. 3. <https://doi.org/10.1186/s40101-019-0193-2>
17. Costa M.D., Redline S., Davis R.B., Heckbert S.R., Soliman E.Z., Goldberger A.B. Heart Rate Fragmentation as a Novel Biomarker of Adverse Cardiovascular Events: The Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis. *Front. Physiol.*, 2018, vol. 9. Art. no. 1117. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01117>
18. Sammito S., Thielmann B., Klusmann A., Deußen A., Braumann K.M., Böckelmann I. Guideline for the Application of Heart Rate and Heart Rate Variability in Occupational Medicine and Occupational Health Science. *J. Occup. Med. Toxicol.*, 2024, vol. 19, no. 1. Art. no. 15. <https://doi.org/10.1186/s12995-024-00414-9>
19. Dearing C., Handa R.J., Myers B. Sex Differences in Autonomic Responses to Stress: Implications for Cardiometabolic Physiology. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 2022, vol. 323, no. 3, pp. E281–E289. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00058.2022>
20. Geovanini G.R., Vasques E.R., de Oliveira Alvim R., Mill J.G., Andreão R.V., Vasques B.K., Pereira A.C., Krieger J.E. Age and Sex Differences in Heart Rate Variability and Vagal Specific Patterns – Baependi Heart Study. *Glob. Heart*, 2020, vol. 15, no. 1. Art. no. 71. <https://doi.org/10.5334/gh.873>
21. Monfredi O., Lyashkov A.E., Johnsen A.B., Inada S., Schneider H., Wang R., Nirmalan M., Wisloff U., Maltsev V.A., Lakatta E.G., Zhang H., Boyett M.R. Biophysical Characterization of the Underappreciated and Important Relationship Between Heart Rate Variability and Heart Rate. *Hypertension*, 2014, vol. 64, no. 6, pp. 1334–1343. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.114.03782>
22. Golosheykin S., Grant J.D., Novak O.V., Heath A.C., Anokhin A.P. Genetic Influences on Heart Rate Variability. *Int. J. Psychophysiol.*, 2017, vol. 115, pp. 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2016.04.008>
23. Nolte I.M., Munoz M.L., Tragante V., Amare A.T., Jansen R., Vaez A., von der Heyde B., Avery C.L., Bis J.C., Dierckx B. et al. Genetic Loci Associated with Heart Rate Variability and Their Effects on Cardiac Disease Risk. *Nat. Commun.*, 2017, vol. 8. Art. no. 15805. <https://doi.org/10.1038/ncomms15805>
24. van de Vegte Y.J., Eppinga R.N., van der Ende M.Y., Hagemeyer Y.P., Mahendran Y., Salfati E., Smith A.V., Tan V.Y., Arking D.E., Ntalla I., et al. Genetic Insights into Resting Heart Rate and Its Role in Cardiovascular Disease. *Nat. Commun.*, 2023, vol. 14. Art. no. 4646. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39521-2>
25. Benarroch E.E. The Central Autonomic Network: Functional Organization, Dysfunction, and Perspective. *Mayo Clin. Proc.*, 1993, vol. 68, no. 10, pp. 988–1001. [https://doi.org/10.1016/S0025-6196\(12\)62272-1](https://doi.org/10.1016/S0025-6196(12)62272-1)
26. Benarroch E.E. (ed.). Central Autonomic Network. Benarroch E.E. (ed.). *Autonomic Neurology*. New York, 2014, pp. 3–14. <https://doi.org/10.1093/med/9780199920198.003.0001>
27. Thayer J.F., Åhs F., Fredrikson M., Sollers III J.J., Wager T. D. A Meta-Analysis of Heart Rate Variability and Neuroimaging Studies: Implications for Heart Rate Variability as a Marker of Stress and Health. *Neurosci. Biobehav. Rev.*, 2012, vol. 36, no. 2, pp. 747–756. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.11.009>

28. Thayer J.F., Broschot J.F. Psychosomatics and Psychopathology: Looking up and down from the Brain. *Psychoneuroendocrinology*, 2005, vol. 30, no. 10, pp. 1050–1058. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2005.04.014>
29. Amodio D.M., Frith C.D. Meeting of Minds: The Medial Frontal Cortex and Social Cognition. *Nat. Rev. Neurosci.*, 2006, vol. 7, no. 4, pp. 268–277. <https://doi.org/10.1038/nrn1884>
30. Bush G., Luu P., Posner M.I. Cognitive and Emotional Influences in Anterior Cingulate Cortex. *Trends Cogn. Sci.*, 2000, vol. 4, no. 6, pp. 215–222. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01483-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01483-2)
31. Delgado M.R., Nearing K.I., LeDoux J.E., Phelps E.A. Neural Circuitry Underlying the Regulation of Conditioned Fear and its Relation to Extinction. *Neuron*, 2008, vol. 59, no. 5, pp. 829–838. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.06.029>
32. Milad M.R., Quirk G.J. Neurons in Medial Prefrontal Cortex Signal Memory for Fear Extinction. *Nature*, 2002, vol. 420, no. 6911, pp. 70–74. <https://doi.org/10.1038/nature01138>
33. Quirk G.J., Beer J.S. Prefrontal Involvement in the Regulation of Emotion: Convergence of Rat and Human Studies. *Curr. Opin. Neurobiol.*, 2006, vol. 16, no. 6, pp. 723–727. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2006.07.004>
34. Amat J., Paul E., Zarza C., Watkins L.R., Maier S.F. Previous Experience with Behavioral Control over Stress Blocks the Behavioral and Dorsal Raphe Nucleus Activating Effects of Later Uncontrollable Stress: Role of the Ventral Medial Prefrontal Cortex. *J. Neurosci.*, 2006, vol. 26, no. 51, pp. 13264–13272. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3630-06.2006>
35. Milad M.R., Wright C.I., Orr S.P., Pitman R.K., Quirk G.J., Rauch S.L. Recall of Fear Extinction in Humans Activates the Ventromedial Prefrontal Cortex and Hippocampus in Concert. *Biol. Psychiatry*, 2007, vol. 62, no. 5, pp. 446–454. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.10.011>
36. Enter D., Terburg D., Harrewijn A., Spinhoven P., Roelofs K. Single Dose Testosterone Administration Alleviates Gaze Avoidance in Women with Social Anxiety Disorder. *Psychoneuroendocrinology*, 2016, vol. 63, pp. 26–33. <https://dx.doi.org/10.1016/j.psyneuen.2015.09.008>
37. Cacioppo J.T., Gardner W.L., Berntson G.G. The Affect System Has Parallel and Integrative Processing Components: Form Follows Function. *J. Pers. Soc. Psychol.*, 1999, vol. 76, no. 5, pp. 839–855. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.76.5.839>
38. Tupitsa E., Egbuniwe I., Lloyd W.K., Puertollano M., Macdonald B., Joanknecht K., Sakaki M., van Reekum C.M. Heart Rate Variability Covaries with Amygdala Functional Connectivity During Voluntary Emotion Regulation. *NeuroImage*, 2023, vol. 274, Art. no. 120136. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120136>
39. Huber A., Koenig J., Bruns B., Bendszus M., Friederich H.C., Simon J.J. Brain Activation and Heart Rate Variability as Markers of Autonomic Function under Stress. *Sci. Rep.*, 2025, vol. 15, no. 1. Art. no. 28114. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12430-8>
40. Deschodt-Arsac V., Blons E., Gilfriche P., Spiluttini B., Arsac L.M. Entropy in Heart Rate Dynamics Reflects How HRV-Biofeedback Training Improves Neurovisceral Complexity During Stress-Cognition Interactions. *Entropy (Basel)*, 2020, vol. 22, no. 3. Art. no. 317. <https://doi.org/10.3390/e22030317>
41. McEwen B.S. Protective and Damaging Effects of Stress Mediators. *N. Eng. J. Med.*, 1998, vol. 338, no. 3, pp. 171–179. <https://doi.org/10.1056/NEJM199801153380307>
42. Etkin A., Wager T.D. Functional Neuroimaging of Anxiety: A Meta-Analysis of Emotional Processing in PTSD, Social Anxiety Disorder, and Specific Phobia. *Am. J. Psychiatry*, 2007, vol. 164, no. 10, pp. 1476–1488. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2007.07030504>
43. Thayer J.F., Friedman B.H. Stop That! Inhibition, Sensitization, and Their Neurovisceral Concomitants. *Scand. J. Psychol.*, 2002, vol. 43, no. 2, pp. 123–130. <https://doi.org/10.1111/1467-9450.00277>
44. Dong J.G. The Role of Heart Rate Variability in Sports Physiology (Review). *Exp. Ther. Med.*, 2016, vol. 11, no. 5, pp. 1531–1536. <https://doi.org/10.3892/etm.2016.3104>
45. Rudics E., Buzas A., Pálfi A., Szabó Z., Nagy Á., Hompóth E.A., Dombi J., Bilicki V., Szendi I., Dér A. Quantifying Stress and Relaxation: A New Measure of Heart Rate Variability as a Reliable Biomarker. *Biomedicines*, 2025, vol. 13, no. 1. Art. no. 81. <https://doi.org/10.3390/biomedicines13010081>
46. Gullett N., Zajkowska Z., Walsh A., Harper R., Mondelli V. Heart Rate Variability (HRV) as a Way to Understand Associations Between the Autonomic Nervous System (ANS) and Affective States: A Critical Review of the Literature. *Int. J. Psychophysiol.*, 2023, vol. 192, pp. 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2023.08.001>
47. Pham T., Lau Z.J., Chen S.H.A., Makowski D. Heart Rate Variability in Psychology: A Review of HRV Indices and an Analysis Tutorial. *Sensors (Basel)*, 2021, vol. 21, no. 12. Art. no. 3998. <https://doi.org/10.3390/s21123998>

48. Perek S., Raz-Pasteur A. Heart Rate Variability: The Age-Old Tool Still Remains Current. *Harefuah*, 2021, vol. 160, no. 8, pp. 533–536 (in Hebrew).
49. Markov A.L. Heart Rate Variability in Cross-Country Skiers Aged 15–18 Years Living in the Komi Republic: Age- and Sex-Related Differences. *J. Med. Biol. Res.*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 151–160 (in Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2019.7.2.151>
50. Amirian I., Andersen L.T., Rosenberg J., Gögenur I. Decreased Heart Rate Variability in Surgeons During Night Shifts. *Can. J. Surg.*, 2014, vol. 57, no. 5, pp. 300–304. <https://doi.org/10.1503/cjs.028813>
51. Solhjoo S., Haigney M.C., McBee E., van Merriënboer J.J.G., Artino Jr. A.R., Battista A., Ratcliffe T.A., Lee H.D., Durning S.J. Heart Rate and Heart Rate Variability Correlate with Clinical Reasoning Performance and Self-Reported Measures of Cognitive Load. *Sci. Rep.*, 2019, vol. 9, no. 1. Art. no. 14668. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50280-3>
52. Dmitriev D.A., Saperova E.V., Dmitriev A.D., Salimov E.R. The Use of Nonlinear Parameters of Heart Rate Variability for Stress Detection. *J. Med. Biol. Res.*, 2021, vol. 9, no. 3, pp. 265–274 (in Russ.). <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z064>
53. Yamanova G.A. Tip regulyatsii serdechnogo ritma kak kriteriy adaptatsii k usloviyam obucheniya [Type of Heart Rhythm Regulation as a Criterion for Adaptation to Learning Conditions]. *Hum. Sport Med.*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 62–70. <https://doi.org/10.14529/hsm210108>
54. Mikhaylova S.V., Khrycheva T.V. Adaptive, Regulatory and Functional Capabilities of Students with Different Biological Ages According to the “Bio-Age” Scale. *J. Med. Biol. Res.*, 2023, vol. 11, no. 3, pp. 265–277 (in Russ.). <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z147>
55. Mao K., Quipildor G.F., Tabrizian T., Novaj A., Guan F., Walters R.O., Delahaye F., Hubbard G.B., Ikeno Y., Ejima K. et al. Late-life Targeting of the IGF-1 Receptor Improves Healthspan and Lifespan in Female Mice. *Nat. Commun.*, 2018, vol. 9, no. 1. Art. no. 2394. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04805-5>

Поступила в редакцию 12.01.2026 / Одобрена после рецензирования 24.02.2026 / Принята к публикации 02.03.2026
Submitted 12 January 2026 / Approved after reviewing 24 February 2026 / Accepted for publication 2 March 2026