

АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА И ОШИБОК ОЦЕНОК ДЫХАТЕЛЬНОЙ СИНУСОВОЙ АРИТМИИ ПРИ СТАРЕНИИ

В.М. Бахилин

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи, Санкт-Петербург

Резюме. Клиническая значимость вариабельности сердечного ритма (BCP) была оценена в конце прошлого века несмотря на то, что исследования BCP проводились с середины XIX века. В последние годы BCP все чаще используется для неинвазивного мониторинга вегетативной нервной системы. Однако интерпретация особенностей BCP до настоящего времени остается не до конца понятой и широко обсуждаемой. Известно, что колебания BCP создаются различными регуляторными системами организма, имеющими разные собственные частоты. Оцениваемыми параметрами BCP являются показатели SDNN и RMSSD – стандартные отклонения ряда RR-интервалов и ряда первых разностей RR-интервалов соответственно. Целью статьи были расчеты снижения мощности при старении в различных частотных диапазонах, анализ ошибок спектральных оценок и сравнение спектральных оценок ДСА со значениями показателей RMSSD. В качестве исходных данных использованы одновременные записи ЭКГ и дыхания базы данных Fantasia Physio Bank. За эталонные оценки приняты мощности в диапазоне частоты дыхания, найденном по записям измерений дыхания. Показано, что с возрастом быстрее всего снижается мощность HF диапазона, а наиболее медленно – VLF диапазона. Амплитуды колебаний HF диапазона сравниваются со значениями показателей RMSSD. Предлагается рассматривать показатель RMSSD как оценку скоростного параметра регуляторной системы. Спектральными методами оцениваются мощности отдельных частотных диапазонов. Для неинвазивного мониторинга вегетативной нервной системы используются спектральные оценки мощностей LF и HF диапазонов. При старении, стрессе, различных заболеваниях активность регуляторных систем снижается, однако остается неясным, в каких регуляторных системах и в какой мере происходят нарушения.

Ключевые слова: частотный диапазон, вариабельность, сердечный ритм, оценка дыхательной системы.

Для цитирования: Бахилин В.М. Анализ частотных диапазонов вариабельности сердечного ритма и ошибок оценок дыхательной синусовой аритмии при старении. *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ». Реабилитация, Врачи и Здоровье.* 2021;5(53):113-121. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2021.5.CLIN.6>



ANALYSIS OF FREQUENCY RANGES OF HEART RATE VARIABILITY AND ESTIMATION ERRORS OF RESPIRATORY SINUS ARRHYTHMIA IN AGING

V.M. Bahilin

Saint-Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech, St. Petersburg

Abstract. The clinical significance of heart rate variability (HRV) was assessed at the end of the last century, despite the fact that HRV studies have been conducted since the mid-19th century. In recent years, HRV has been increasingly used for non-invasive monitoring of the autonomic nervous system. However, the interpretation of HRV features is still not fully understood and widely discussed. It is known that HRV fluctuations are created by various regulatory systems of the body, which have different natural frequencies. The estimated HRV parameters are SDNN and RMSSD indicators – standard deviations of a number of RR-intervals and a number of first differences of RR-intervals, respectively. The purpose of the article was to calculate the power decrease with aging in different frequency ranges, analyze the errors of spectral estimates, and compare the spectral estimates of RSA with the values of RMSSD indicators. Simultaneous ECG and respiration records from the Fantasia Physio Bank database were used as initial data. For reference estimates, the powers in the range of respiration rate found from the records of respiration measurements are taken. It is shown that with age the power of the HF range decreases most rapidly, and the VLF range decreases most slowly. HF oscillation amplitudes are compared with RMSSD values. It is proposed to consider the RMSSD indicator as an assessment of the speed parameter of the regulatory system. Spectral methods are used to estimate the power of individual frequency ranges. For non-invasive monitoring of the autonomic nervous system, spectral estimates of the power of the LF and HF ranges are used. With aging, stress, and various diseases, the activity of regulatory systems decreases, but it remains unclear in which regulatory systems and to what extent violations occur.

Key words: frequency range, variability, heart rate, assessment of the respiratory system.

Cite as: Bahilin V.M. Analysis of frequency ranges of heart rate variability and estimation errors of respiratory sinus arrhythmia in aging. *Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ". Rehabilitation, Doctor and Health.* 2021;5(53):113-121. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2021.5.CLIN.6>

Введение

Методы оценки вариабельности сердечного ритма в виде пульсовой диагностики появились в Индии, Греции и арабском Востоке за много веков до нашей эры. Впервые явление вариабельности – длительности интервала времени от начала цикла одного сердечного сокращения до начала другого – были описаны в 1760 году. Уже в одном из первых экспериментальном исследовании системы кровообращения при катетеризации изменяется периодически в соответствии с дыхательными движениями. В 1847 году К. Людвиг установил, что на протяжении каждого дыхательного цикла частота сердечных сокращений сначала увеличивается, а затем уменьшается [1]. Такие изменения, названные дыхательной синусовой аритмией (ДСА), устранялись перерезкой блуждающих нервов.

Средний период колебаний ДСА (колебаний HF диапазона) совпадает со средним периодом дыхания и в норме лежит в пределах от 2,5 до 6,7 секунд. Существование самостоятельных ритмических колебаний артериального давления с периодом 10 секунд в экспериментах на животных при выключенном дыхании в 1865 году нашел Л. Траубе [2]. Эти колебания в 1869 году Э. Геринг [3] назвал волнами Траубе. Также он доказал прямую связь редкого дыхания с колебаниями артериального давления, названными волнами Геринга. В 1876 году З. Майер [4] исследовал колебания артериального давления с большим периодом, чем дыхательные волны Майера. Частотный диапазон волн Майера назван LF диапазоном.

Медленные колебания VLF диапазона (0.003±0.04 Гц) R-R интервалов были открыты в 1932 году А. Флейшом, Р. Бекман-

ном [5]. Эти авторы вычисляли среднюю продолжительность интервала R-R за каждый дыхательный цикл и строили график изменений этого показателя со временем. В результате обнаружены волнообразные колебания частоты сердечных сокращений продолжительностью 60–80 с. Каждая из таких волн прерывается более быстрыми (с периодами около 10 с и 15–25 с), но менее глубокими колебаниями. Было показано, что в положении стоя относительная мощность медленных волн возрастает. В 60-х годах двадцатого века В.В. Парин [6] с соавторами выдвинули концепцию о системе периодических изменений в соответствии с дыхательными движениями.

РевOLUTIONным этапом в применении анализа вариабельности сердечного ритма в клинической практике стали 80-е годы двадцатого века. В начале этого десятилетия к изучению периодических процессов в гемодинамике были применены спектральные методы, а в конце – доказано, что сниженная вариабельность сердечного ритма является надежным предиктором смертности после перенесенного инфаркта миокарда. В этот же период времени начался серийный выпуск приборов Finapres для непрерывной неинвазивной регистрации артериального давления. Принцип такой регистрации базируется на технологии, запатентованной в 1969 году чешским физиологом Я. Пеназом [7], которая заключается в фотоплетизмографической оценке объема артериальных сосудов пальца и использовании отслеживающей системы для создания вокруг пальца давления, противодействующего растяжению этих артериальных сосудов. В результате давление в манжете начинает повторять изменения давления в артерии. С помощью приборов Finapres можно оценивать волновую структуру колебаний артериального давления и чувствительность барорефлекса в основном с такой же точностью, как и при катетеризации артериальных сосудов. В US National Library of Medicine [8] на данный момент существует 800 ссылок на иссле-

дования, выполненные с использованием такой технологии.

Целью статьи были расчеты снижения мощности при старении в различных частотных диапазонах, анализ ошибок спектральных оценок и сравнение спектральных оценок дыхательной синусовой аритмии (ДСА) со значениями показателей RMSSD.

Материалы и методы

В качестве исходных данных использованы одновременные записи электрокардиограммы (ЭКГ) и дыхания базы данных Fantasia Physio Bank [9]. За эталонные оценки мощности ДСА приняты мощности в диапазонах частоты дыхания, найденных по записям измерений дыхания. Известно, что осцилляции ударного объема крови или систолического артериального давления в данном диапазоне зависят от дыхательных движений, их глубины. Амплитуда этих волн в большой степени зависит от уровня жидкости в организме. Генезис низкочастотных волн сердечного ритма более сложен. Большинство авторов полагают, что их мощность (или нормализованная мощность) отражает активность симпатического отдела вегетативной нервной системы, другие склоняются к мысли о наличии как симпатических, так и парасимпатических влияний в формировании этих колебаний. Показано наличие в диапазоне (0,04÷0,4 Гц) двух пиков спектральной плотности, которые могут иметь различные механизмы происхождения.

В настоящее время наиболее изученными являются механизмы возникновения высокочастотных (HF) волн сердечного ритма диапазона (0,04÷0,4 Гц), отражающих функционирование системы кардиореспираторного взаимодействия: воздействие системы дыхания на сердце осуществляется через парасимпатический нерв, идущий в составе блуждающего нерва от дыхательной области продолговатого мозга к синусовому узлу сердца, и изменяющий периоды срабатывания пейсмекеров синусового узла. Датчиками обратных связей являются, в основном, цен-

тральные хеморецепторы на кровеносных сосудах и периферические хеморецепторы альвеол лёгких, реагирующие на парциальные давления кислорода PaO_2 и углекислого газа $PaCO_2$ крови. Хеморецепторы передают информацию дыхательным нейронам ствола мозга, и отклонение газового состава крови от физиологических показателей рефлекторно ведет к соответствующему изменению параметров дыхания, обеспечивающему поддержание PaO_2 и $PaCO_2$ на оптимальном уровне. Многие исследователи считают, что в обратных связях системы КРВ участвуют также барорецепторы.

Существует несколько гипотез механизмов возникновения низкочастотных (LF) волн сердечного ритма и артериального давления. Основная гипотеза заключается в том, что такие колебания являются следствием периодического усиления и ослабления потока сигналов артериальных барорецепторов в такт волнам артериального давления третьего порядка. При этом, во время повышения артериального давления барорецепторные сигналы замедляют частоту сердечных сокращений, а при снижении – ускоряют. Продолжительность периода таких колебаний (8–12 секунд) определяется суммой задержек во времени процессов в эфферентной ветви рефлекторной барорецепторной дуги.

Компонент LF увеличивается в условиях эмоционального стресса или физической нагрузки, когда повышается давление, а барорефлекторная импульсация повышается. В условиях экспериментальной регионарной ишемии миокарда собак при отсутствии изменений артериального давления мощность LF волн увеличивается. Такие изменения могут быть следствием повышения содержания норадреналина в крови. Это подтверждается измерениями, проведенными во время хирургической операции у больных феохромоцитомой. При этом уровень концентрации норадреналина в плазме крови коррелировал с

мощностью низкочастотной компоненты спектра интервала R-R ($r = 0,68$). Впрочем, в покое в измерениях на здоровых лицах и лицах с нарушениями автономной нервной системы выявлено преобладание барорефлекторного механизма.

Волны VLF диапазона создаются колебаниями температуры тела, метаболизма, гормонов и, по мнению авторов [10, 11], генерируются сердцем.

Волновую структуру сердечного ритма можно исследовать и с помощью автокорреляционного анализа. Впрочем, при изменениях частоты периодического процесса автокорреляционный анализ может ничего не показать, хотя скрытая ритмика имеет место.

Для анализа изменений формы спектра длительностей интервалов R-R, а также закономерностей их трансформации при различных воздействиях, предложено применять структурно-лингвистический метод, позволяющий упростить описание этих изменений, сохраняя при этом наиболее важные свойства информации. Согласно другому методическому подходу предложено, наоборот, проводить анализ методом медианной спектрограммы за счет большей детализации частотных характеристик ВСР.

Длительность регистрации ритмограмм зависит от цели исследования. Важной и дискуссионной является проблема определения оптимального времени регистрации и анализа ритмограмм. Стандартными являются 5-минутные регистрации. Вместе с тем отмечается, что увеличение периода регистрации позволяет сделать анализ очень низких (VLF) и ультранизких (ULF) частот, то есть большего количества уровней регуляции.

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов снижения мощности при старении в различных частотных диапазонах сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Расчеты снижения мощности при старении в различных частотных диапазонах**Table 1.** Calculation of power reduction during aging in different frequency ranges

Возрастная группа	Средние по выборкам значения амплитуды диапазонов, мс			RMSSD
	VLF	LF	HF	
Молодые	39,5	32,5	30,6	51
Пожилые	24,3	13,8	11,0	20
Молодые/пожилые	1,6	2,4	2,8	2,6

Расчеты показывают, что при старении амплитуды колебаний BCP в LF и HF диапазонах снижаются сильнее, чем в VLF (очень низкочастотном) диапазоне, показатель RMSSD (Root Mean Square of the Successive Differences) снижается приблизительно в той же мере, что и амплитуда колебаний в HF (высокочастотном) диапазоне.

Ошибки оценок амплитуд колебаний в HF диапазоне (оценки ДСА), обусловленные несовпадением HF диапазона с частотной областью дыхания, вычислялись путем их сравнения с эталонными оценками ДСА. Для группы молодых относительные ошибки составили в среднем $16 \pm 9 \%$, для группы пожилых – $29 \pm 10 \%$. Ошибки показателя RMSSD могут возникнуть только вследствие неправильного выделения R-вершин и носят случайный характер. При правильном выделении R-вершин ошибки оценки показателя RMSSD пренебрежимо малы.

В наблюдениях [12] двух пациентов с тяжелой формой сердечной недостаточности с имплантированным искусственным левым желудочком показано, что до операции любые волны в спектрах интервала R-R, артериального давления и частоты дыхания отсутствовали. У первого пациента через месяц, а у второго – через 15 месяцев повторили исследование спектров колебаний. В спектре артериального давления медленные колебания отсутствовали, а в спектре интервала R-R собственного опорожненного сердца они появились и стали «выразительными и доминирующими». Итак, происхождение как высокочастотных, и тем более низкочастотных волн сердечного ритма, имеет сложный многокомпонентный характер, что обуславливается, по мнению [13], их сложной централь-

но-периферийной организацией. Исходя из этого, дискуссионным является вопрос о применении методов анализа вариабельности сердечного ритма для точной оценки вегетативного баланса регуляции сердечной деятельности. Итальянский ученый А. Маллиани [13] отстаивает положение при возможности точной оценки «симпатико-парасимпатического баланса» с помощью показателей спектра интервалов R-R. При этом, ключевым является положение, что волны LF определяются только симпатическими воздействиями, а HF – парасимпатическими, изменения тонуса двух звеньев вегетативной нервной системы происходят реципрокно.

Это подтверждается опытами с блокадой М-холинорецепторов на людях и собаках, в которых устраняются не только дыхательные, но и длинные волны сердечного ритма. Не найдена взаимосвязь между выбросом норадреналина при стимуляции мышц и спектральной мощностью на частоте 0,1 Гц. Не поддерживает теорию «симпатико-парасимпатического баланса» на основе как собственных экспериментальных данных, так и аналитического обзора литературы Д.Л. Экберг [14]. Показано, что существенное влияние на перераспределение мощности колебаний интервала R-R может осуществлять обычная частота дыхания человека. При низких частотах дыхания дыхательные волны могут смещаться в диапазон низких частот сердечного ритма.

Оценивать симпатовагальный баланс можно и по амплитуде волн артериального давления или ударного объема крови в различных частотных диапазонах, которые модулируются различными факторами. При этом можно обойти спорные вопросы, воз-

никающие при анализе колебаний интервала R-R. Так, в исследованиях на спонтанно гипертензивных крысах и крысах линии Вистар-Киото показано, что мощность спектра артериального давления в диапазоне низких частот обусловлена модуляцией вегетативной нервной системы и, в частности, симпатическими влияниями через α_1 -адренорецепторы. В измерениях вариабельности систолического давления на людях с повреждениями спинного мозга обнаружено, что при разрывах выше сегмента T3 мощность волн Майера уменьшается и изменяется нормальная их реакция на ортостатическую пробу.

Х. Портье и др. [15] в исследованиях на бегунах после 3 недель отдыха и 12 недель тренировок на выносливость выяснили, что симпатовагальный баланс можно оценивать по изменениям и соотношению мощности колебаний артериального давления в диапазонах низких и высоких частот. Впрочем, на волновые процессы в артериальном давлении могут влиять не только колебания сердечного выброса, но и модуляция тонуса периферических сосудов симпатическими, активностью системы NO. К.-Дж. Бар и др. [16] полагают, что вариативность ударного объема крови и артериального давления дает несколько иную информацию об активности автономной нервной системы, чем анализ изменений продолжительности интервала R-R. Этот вывод базируется на отсутствии вероятных корреляций между мощностями в одинаковых диапазонах колебаний различных показателей и их изменениях при блокадах м-холино и β -адренорецепторов, анализа связей их параметров с диаметром зрачка и его реакцией на свет. Дж. Спадачини [17] при стимуляции каротидного синуса созданием отрицательного давления в покое наблюдал повышение мощности медленных волн как ЧСС, так и АД, и быстрых волн АД. А при физической нагрузке подобное воздействие повышало только мощность осцилляций АД в диапазоне низких частот. Вместе с тем, по результатам исследова-

ний С.А. Коваленко [18] показано, что кросс-спектральный анализ мощности колебаний ударного объема крови и ЧСС в диапазоне 0,04–0,15 Гц может быть ценным показателем оценки функционального состояния сердечно-сосудистой системы.

По результатам исследований корректную оценку большинства показателей ВСР можно проводить при длительности записей 256 ± 32 кардиоинтервала. Однако, для исследований VLF, SDNN (Standard Deviation of the Normal-to-Normal) и связанных с ними показателей (CV, aMo, IN) требуется запись большей продолжительности. Вместе с этим, для точной оценки показателя дыхательной синусовой аритмии у молодых людей по данным Ф. Шаффер, Дж. П. Гинзберг [19] вполне достаточной является регистрация и анализ более 1 минуты. При сравнении результатов спектрального анализа ВСР по 2-минутным записям ЭКГ, проведенным на 63 лицах с перерывом в 1 и 2 недели, показано, что коэффициент корреляции между значениями показателей составлял более 0,5. Высокая степень связи ($R = 0,51-0,93$) при повторных (через 2 недели) измерениях спектральных компонентов вариативности частоты сердечных сокращений и артериального давления найден у лиц с разрывами спинного мозга. Уровень барорефлекторной чувствительности, что оценивался кросс-спектральным методом по когерентности между колебаниями кардиоинтервала и систолического артериального давления в диапазоне 0,067–0,133 Гц на 116 молодых мужчинах, показал высокий уровень воспроизводимости при трехкратных повторных измерениях с интервалом в одну неделю. Р. Маэстри и др. [20] при повторных измерениях параметров спонтанной барорефлекторной чувствительности на 44 здоровых мужчинах и 57 с инфарктом миокарда нашли их хорошую повторяемость.

А.Л. Уситало и др. [21] проводили анализ 5-минутных ЭКГ-записей в положении лежа на 208 парах (из них 104 здоровых) монозиготных и 296 парах (из них 173 здо-

ровых) дизиготных близнецов мужского пола среднего возраста. Установлено, что генетические факторы обуславливают 31–57 % вариации BCP, хронические болезни – 4 %, индекс массы тела, потребление кофе, курение, употребление медикаментов – 1–11 %. Не было найдено ни одного поведенческого фактора, который существенно влиял бы на BCP. На 772 здоровых близнецах и детях из одной семьи проводили амбулаторное мониторирование ЭКГ в течение 24 часов. Показан вероятный генетический вклад в SDNN и RMSSD, составлявший от 35 % до 48 %. В измерениях на 322 квебекских 5-месячных близнецах показано, что HF компонент BCP обуславливается экологическими и генетическими факторами, LF компонент – частично семейными и экологическими воздействиями. Генетические воздействия на HF больше у девушек, чем у парней.

Д. Бумсма [22] при анализе измерений параметров BCP, уровня ангиотензиногена и состояния ангиотензинпревращающего гена на 95 парах монозиготных и 46 парах дизиготных близнецов нашли, что параметры BCP обуславливаются генетической вариативностью. При этом генотип с повреждением ангиотензинпревращающего гена коррелировал с повышением уровня BCP. Найден вклад генетических факторов и при изменениях спектральных компонентов сердечного ритма на умственные нагрузки. Генетически обусловлен при этом был среднечастотный компонент (около 0,1 Гц) спектрограммы колебаний интервала R-R. В исследованиях Дж.К. Кантерс и др. [23] также показана достаточно высокая воспроизводимость спектральной компоненты барорефлекса при проведении повторных исследований BCP и вариативности артериального давления на 14 лицах в положении лежа и изменении положения тела. Общая вариативность как колебаний интервала R-R, так и артериального давления воспроизводилась в меньшей степени.

Выводы

Таким образом, проведено значительное количество исследований вариативности частоты сердечных сокращений как у людей, так и у животных другими учеными. Однако, на сегодня отсутствуют единые нормы значений спектральных составляющих этих показателей, что связано со многими факторами: неоднородностью исследуемых выборок, применением различных методов спектрального анализа, несоблюдением стандартных условий при измерениях. Вместе с этим практически не уделяется внимание анализу межиндивидуальной девиантности показателей волновой структуры сердечного ритма и их реактивности на нагрузку, что может приводить к ошибочной оценке результатов измерений.

При старении самые сильные нарушения наблюдаются в кардиореспираторной системе, генерирующей HF колебания сердечного ритма – ДСА. Значительные изменения амплитуд HF и LF колебаний по сравнению с изменениями амплитуды VLF колебаний дают основание предполагать, что с возрастом снижается скорость проводимости вегетативных нервов. Изменения амплитуды колебаний в HF диапазоне почти в 3 раза, на наш взгляд, делают несущественными ошибки в 20–30 % в поточной медицинской диагностике. Однако, для целей оценки состояния тяжелых больных целесообразно использовать значительно более точный показатель RMSSD. Определение RMSSD как стандартного отклонения ряда первых разностей RR интервалов, существенные различия между значениями RMSSD и спектральными оценками амплитуды ДСА, сильная зависимость RMSSD от частоты дыхания при одинаковых спектральных оценках амплитуды ДСА, на наш взгляд, делает неприемлемым использование RMSSD в качестве оценки амплитуды ДСА, однако не снижает ценности этого показателя. RMSSD – самостоятельный показатель, характеризующий скорости протекания процессов в регуляторных системах, и множество значительных результа-

тов, полученных с его помощью, подтверждают целесообразность и значимость его использования в медицинских и физиологических исследованиях.

Анализ литературы указывает на необходимость дальнейших исследований как

методических, так и теоретических аспектов variability сердечного ритма, их индивидуальных особенностей у здоровых людей.

Литература/References

- 1 Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology. Guidelines Heart rate variability Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*. 1996;17:354-381.
- 2 Traube L. *Gesammelte Beiträge zur Pathologie und Physiologie*. – Charleston: Nabu Press, 2010.
- 3 Hering E. *Beiträge zur Physiologie Teil I–V*. – Leipzig: Engelmann, 1864.
- 4 Mayer S. Studien zur Physiologie des Herzens und der Blutgefäße. *Abhandlung: Über spontane Blutdruckschwankungen. Sitzungsberichte Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Classe, Anatomie*. 1876;74:281-307.
- 5 Fleisen A., Beckmann R. Die raschen Schwankungen der Pulsfrequenz registriert mit dem Pulsfettsschreiber. *Zeitschrift für die Gesamte Experimentelle Medizin*. 1932;80:487-510.
- 6 Parin V.V., Baevsky R.M. *Introduction to Medical Cybernetics*. Moscow: Medicine. 1966.
- 7 Penaz J. Photoelectric measurement of blood pressure, volume and flow in the finger. *Digest of the 10th International Conference on Medical and Biological Engineering*. 1973;104:145-154.
- 8 National Library of Medicine [Electronic resource] – Access mode: <https://www.nlm.nih.gov/> (date of the application: 18/06/2021)
- 9 Goldberger A.L., Amaral L.A.N., Glass L., Hausdorff J.M., Ivanov P.Ch., Mark R.G., Mietus J.E., Moody G.B., Peng Ch.-K., Stanley H.E. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet. Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals. *Circulation*. 2000;101(23):e215-e220.
- 10 Elstad M. Cardiorespiratory interactions in humans and animals: rhythms for life. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. 2018;315:H6-H17.
- 11 Serafi A.S. Heart rate variability (HRV) – analysis and clinical significance. *International Journal of Biology and Biotechnology*. 2018;15(2):193-199.
- 12 Narkiewicz K., van de Borne P.J., Hausberg M., Cooley R.L., Winniford M.D., Davison D.E., Somers V.K. Cigarette smoking increases sympathetic outflow in humans. *Circulation*. 1998;98(6):528-534.
- 13 Malliani A., Pagani M., Lombardi F., Cerutti S. Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain. *Circulation*. 1991;84(2):482-492.
- 14 Eckberg D.L. Sympathovagal balance: a critical appraisal. *Circulation*. 1997;96(9):3224-3232.
- 15 Portier H., Louisy F., Laude D., Berthelot M., Guézennec C.Y. Intense endurance training on heart rate and blood pressure variability in runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2001;33(7):1120-1125.
- 16 Bär K.-J., Schulz S., Koschke M., Harzendorf C., Gayde S., Berg W., Boettger M. K. Correlations between the autonomic modulation of heart rate, blood pressure and the pupillary light reflex in healthy subjects. *Journal of the Neurological Sciences*. 2009;279(1-2):9-13.
- 17 Spadacini G., Passino C., Leuzzi S., Valle F., Piepoli M., Calciati A., Sleight P., Bernardi L. Frequency-dependent baroreflex control of blood pressure and heart rate during physical exercise. *International Journal of Cardiology*. 2006;107:171-179.
- 18 Kovalenko, S.A. Features of the functioning of the cardiovascular system in persons constantly performing power loads. *Sports Medicine*. 2015;1-2:52-58.
- 19 Shaffer F., Ginsberg J.P. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health*. 2017;5:Article number 258.
- 20 Acanfora D., Casucci G., Ciccone M. M., Scicchitano P., Lonobile T., Chiariello L., Incalzi R. A. Biomechanical and neuroautonomic adaptation to acute blood volume displacement in ischemic dilated cardiomyopathy: The predictive value of the CD25 test. *Journal of Applied Physiology*. 2020;129(5):1173-1182.

- 21 Uusitalo A.L.T., Vanninen E., Levälahti E., Battié M.C., Videman T., Kaprio J. Role of genetic and environmental influences on heart rate variability in middle-aged men. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. 2007;293:H1013-H1022.
- 22 Boomsma D., Busjahn A., Peltonen L. Classical twin studies and beyond. *Nature Reviews Genetics*. 2002;3:872–882.
- 23 Kanter J.K., Højgaard M.V., Agner E., Holstein-Rathlou N.H. Short- and long-term variations in non-linear dynamics of heart rate variability. *Cardiovascular Research*. 1996;31(3):400-409.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Competing interests. The author declare no competing interests.

Финансирование. Исследование проводилось без спонсорской поддержки.

Funding. This research received no external funding.

Соответствие нормам этики. Авторы подтверждают, что соблюдены права людей, принимавших участие в исследовании, включая получение информированного согласия в тех случаях, когда оно необходимо, и правила обращения с животными в случаях их использования в работе.

Compliance with ethical principles. The authors confirm that they respect the rights of the people participated in the study, including obtaining informed consent when it is necessary, and the rules of treatment of animals when they are used in the study.

Авторская справка

Бахилин

Виктор Михайлович

научный сотрудник лаборатории информатики и статистики, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи, Санкт-Петербург

ORCID 0000-0002-0116-9890

Вклад в статью 100 % – разработка дизайна исследования, сбор и анализ материала, написания текста работы