

УДК 612.79; 615.37

DOI 10.24412/2312-2935-2023-4-562-580

ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ КРОВООБРАЩЕНИЯ ПРИ ВЕЛОЭРГОМЕТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ У ПОЖИЛЫХ ПАЦИЕНТОВ

А.В. Рубинский^{1,2}, Н.О. Антипов³, Л.А. Заровкина¹, А.Н. Шишкевич^{2,4}, А.В. Барыкина^{5,6}, М.М. Дальсаева⁷

¹ ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Санкт-Петербург

² АННО ВО НИЦ «Санкт-Петербургский институт биорегуляции и геронтологии», г. Санкт-Петербург

³ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург

⁴ ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург

⁵ АНО НИМЦ «Геронтология», г. Москва

⁶ ОГБУЗ «Яковлевская ЦРБ», г. Строитель

⁷ ООО Клиника эстетической медицины «МД Клиник», г. Грозный

Введение. Модификации физиологических процессов в организме в процессе старения повышает риск развития старческой астении. Согласно проведенным ранее исследованиям, физическая нагрузка оказывает положительное влияние на вегетативный контроль организма в целом, который можно оценивать по функциональному состоянию кровообращения, а потому физические упражнения используются как один из обязательных элементов реабилитации. Низкий уровень физической активности (ФН) может провоцировать гиперсимпатикотонию, приводить к повышению реактивности симпатической нервной системы и увеличивать риски неблагоприятных исходов, как для средней возрастной группы, так и для пожилой.

Цель. Совершенствование диагностических процедур для оценки влияния физической реабилитации по изменению хаотичности показателей кровообращения в процессе пробы с физической нагрузкой у пациентов среднего и пожилого возраста.

Материалы и методы. Исследование проводилось для двух возрастных групп (56±3,5 лет и 68±1,8 лет). В качестве исследуемого параметра использовалась энтропия (ApEn, SampEn). Показатели кровообращения регистрировали с помощью приборно-аппаратного комплекса «Кардиотехника-САКР» (НАО Инкарт, Санкт-Петербург) во время проведения велоэргометрической пробы по методике с низкоинтенсивной ступенчатовозрастающей физической нагрузкой (с 40 до 60 Вт).

Результаты. Продемонстрированы преимущества использования методов нелинейной динамики для анализа временных интервалов сердечных сокращений (RR), а также предложен анализ интервалов показателей артериального давления (STI, DTI) для оценки регуляторных систем кровообращения.

Заключение. Можно утверждать, что влияние физической реабилитации на регуляторные механизмы кровообращения отражаются на изменении хаотичности как сердечной

деятельности, так и сосудов, что прослеживается при нагрузочных пробах. Оба параметра хаотичности позволяют получить статистические значимые различия как до и после прохождения реабилитации, у пациентов среднего или пожилого возраста. Оценка хаотичности позволяет подтвердить влияние физической реабилитации на вариабельность кровообращения с учетом возрастных особенностей по оценке вариабельности не только ритмограмм сердечных сокращений (RR), но и ритмограмм показателей артериального давления (STI и DTI), изменчивость которых проявляется при различных стрессогенных состояниях организма.

Ключевые слова: физическая нагрузка, пожилой возраст, энтропия

DYNAMICS OF NONLINEAR INDICATORS OF BLOOD CIRCULATION VARIABILITY DURING CYCLING EXERCISE IN ELDERLY PATIENTS

A.V. Rubinskiy^{1,2}, N.O. Antipov³, L.A. Zarovkina¹, A.N. Shishkevich^{2,4}, A.V. Barykina^{5,6}, M.M. Dal'saeva⁷

¹ Pavlov University, St. Petersburg

² St. Petersburg Institute of Bioregulation and Gerontology, St. Petersburg

³ Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg

⁴ Military Medical Academy named after S.M. Kirov, St. Petersburg

⁵ Research Medical Centre «GERONTOLOGY», Moscow

⁶ Yakovlevskaya Central regional hospital, Stroitel

⁷ LLC Clinic of Aesthetic Medicine «MD Klinik», Grozny

Introduction. The modification of physiological processes in the body lead to increase the risk of developing fragility during aging. According to previous studies, physical activity has a positive effect on the neurological whole body's control, such as the functional state of blood circulation during physical exercise as main direct of physical rehabilitation. Caused by low level of physical activity hypersympathicotonia lead to an increase in the reactivity of the sympathetic nervous system and the risks of adverse outcomes for the middle and the elderly age group.

The purpose of the study is to improve diagnostic procedures for assessing the impact of physical rehabilitation on changing the randomness of blood circulation indicators during the exercise test in middle-aged and elderly patients.

Materials and methods. The study was conducted for two age groups (56 ± 3.5 years and 68 ± 1.8 years). Entropy (ApEn, SampEn) was used as the studied parameter. Blood circulation parameters were recorded using the «Cardiotechnika-SACR» (Inkart, St. Petersburg) during a bicycle physical test with low-intensity ramp protocol increasing of physical activity (from 40 to 60 watts).

Results. The advantages of using nonlinear dynamics methods for the analysis heart rate variability (RR) and time intervals of blood pressure (STI, DTI) are for monitoring regulatory circulatory systems.

Conclusion. It can be influence on the regulatory mechanisms of blood circulation during physical rehabilitation in the change of both cardiac activity and blood pressure, which can be traced during exercise tests. All parameters are allowed to obtain statistically significant differences before and after physical rehabilitation in middle-aged or elderly patients. After assessment of randomness we are allowed to confirm the influence of physical rehabilitation on the variability of blood circulation,

accounts age-related characteristics, except heart rate variability, also variable blood pressure (STI and DTI), which manifests condition of the body in various stress.

Keywords: physical activity, old age, entropy

Введение. Вследствие модификации физиологических процессов в организме человека в процессе онтогенеза и несоответствия стрессогенных факторов возможностям может повышаться риск развития старческой астении. Согласно проведенным ранее исследованиям, среди значимых факторов, предопределяющих благоприятность исхода, отмечают физическую нагрузку (ФН), влияние которой на вегетативный контроль организма в целом, можно оценивать по функциональному состоянию кровообращения. Физические нагрузки используют в качестве обязательного элемента программ физической реабилитации [1, 2], так как низкий уровень физической активности (ФА) может провоцировать гиперсимпатикотонию и приводить к повышению реактивности нервной системы, тем самым увеличиваются риски неблагоприятных исходов, как для людей среднего, так и пожилого возраста [3].

Дозированная ФН помогает улучшить регуляторные функции организма, что, несомненно, отражается на функции сердца, поэтому для выявления физиологического дистресса традиционно используют ЭКГ-сигнал [4]. Доказывая влияние ФН на функции вегетативной регуляции кровообращения [5], исследователи решают диагностическую задачу состояния кровообращения при ФН по регуляции сократительной работы сердца с помощью анализа variability сердечного ритма (BCP), однако, стандартная оценка ритмограммы RR-интервалов не всегда может отражать в полной мере картину реактивности системы кровообращения. Этого позволяет избежать объективизация анализа и оценка информации о нескольких ритмических процессах системы кровообращения, не ограничиваясь ЭКГ-сигналом, кроме того, анализ таких записей можно дополнить исследованием хаотичности для случайных процессов. В последнее время в научной литературе стали популярными характеристики и параметры, получаемые с помощью методов нелинейной динамики – аппроксимированная (ApEn) и выборочная (SampEn) энтропии [6].

В нашем исследовании мы дополнили анализ стандартных диагностических процедур и исследовали влияние ФН на динамику хаотичности BCP в различных возрастных группах на разных этапах физической реабилитации. К достоинству и научной новизне этой работы можно отнести то, что оценивались не только стандартные RR-интервалы, но и дополнительные временные характеристики кровообращения variability сосудистого

ритма: межсистолические (STI) и междуистолические (DTI) интервалы. Данные характеристики позволяют оценить влияние ФН, так как в покое характеристики сердечного и сосудистого ритма совпадают, а при физической нагрузке STI и DTI могут иметь отличное поведение от RR-интервалов. Уже проведен ряд исследований, в которых значения энтропии предлагают использовать для оценки влияния физических упражнений [7,8]. Кроме того, энтропия является мерой измерения поведения интервалов RR, STI, DTI в зависимости от уровня ФН для прогнозирования возможного эффекта от реабилитационных мероприятий. Так, общеизвестно и показано в исследованиях [9,10,11] снижение значения энтропии RR-интервалов, при ФН, что обусловлено сокращением сложности сигнала кардиоритма, однако, анализа других стохастических характеристик кровообращения в исследованиях с ФН не производилось.

В связи с вышесказанным, цель работы в совершенствовании диагностических процедур для оценки влияния физической реабилитации по изменению хаотичности показателей кровообращения в процессе пробы с физической нагрузкой у пациентов среднего и пожилого возраста.

Материалы и методы. Выборка и протокол нагрузочных проб. В исследовании принимали участие пациенты пульмонологического профиля, которые проходили реабилитацию в научно-исследовательском институте ревматологии и аллергологии научно-клинического исследовательского центра ПСПбГМУ им. акад. И.П. Павлова. Были сформированы две группы по 10 человек: среднего возраста ($56 \pm 3,5$ лет) и пожилого возраста ($68 \pm 1,8$ лет), уравновешенные по числу женщин и мужчин. Все пациенты, проходившие реабилитацию, получали лечение в соответствии со стандартными общепризнанными протоколами и принимаемыми препаратами. Кроме этого, пациенты не принимали антибактериальных и противовирусных препаратов в течении трех месяцев до начала описываемого исследования.

Согласно протоколу исследования, утвержденному локальным этическим комитетом при ПСПбГМУ им. И.П. Павлова, были отобраны 20 пациентов для обследования в состоянии покоя и в условиях ступенчато возрастающей ФН. Все пациенты были предупреждены об имеющихся рисках и подписали добровольное информированное согласие. Во время физической нагрузки, которую пациенты выполняли с учетом возраста, одновременно и синхронно регистрировали ЭКГ-сигнал и сфигмофотоплетизмографический сигнал с функцией непрерывного измерения артериального давления (АД) приборно-аппаратным

комплексом «Кардиотехника-САКР» (НАО Инкарт, Санкт-Петербург), совмещенным с велоэргометром. Исследование пациентов проводили в начале и по окончании курса медицинской реабилитации, спустя 7-10 дней. Проанализировав динамику показателей в состоянии покоя, пробы с ФН и в период восстановления, делали вывод о влиянии физической реабилитации на реактивность регуляторных механизмов по степени хаотичности различных временных интервалов показателей системы кровообращения.

Исследование проводили в два основных этапа по пять минут каждый, в время которых производили регистрацию сигнала ЭКГ и АД. Первый этап – регистрация показателей кровообращения сидя в состоянии покоя, второй этап – при выполнении ФН на велоэргометре. На втором этапе согласно RAMP-протоколу стартовое значение физической нагрузки соответствовало уровню 40 Вт, который каждую минуту возрастал на 5 Вт, достигая предельного значения 60 Вт – «легкий» уровень (3-4 МЕТ). Ограничение периода нагрузки пятиминутным периодом с одномоментными ступенями применено для сокращения времени незначимых переходных процессов с быстрым достижением «устойчивого» состояния вегетативной регуляции. При этом ежеминутное увеличение нагрузки позволяет определить порог, после которого быстрое достижение «устойчивого» состояния становится невозможно.

Регистрация ЭКГ и используемое оборудование. Все приведенные в работе исследования проведены и обработаны в соответствии с действующими Национальными стандартами регистрации, обработки и интерпретации результатов в действующей редакции. В качестве устройства регистрации в данном исследовании использовали приборно-аппаратный комплекс «Кардиотехника-САКР» (НАО Инкарт, Санкт-Петербург). Комплекс был адаптирован для совместной работы с велоэргометром. Регистрация сигнала ЭКГ происходила непрерывно в стандартных отведениях параллельно с сигналом пальцевой сфигмофотоплетизмографии и регистрации АД. Аппаратный комплекс способен в автоматическом режиме распознавать R-пики на ЭКГ-сигнале, аналогично детектируются систолические и диастолические пики. Регистрируемые сигналы прошли необходимую фильтрацию на уровне приборно-аппаратного комплекса и не требовали дополнительной обработки (устранение шумов сетевой наводки, мышечных шумов). Подробнее о принципах работы комплекса описано в ранее [12].

Предварительная обработка сигналов. Алгоритм предварительной обработки и расчета параметров хаотичности реализован с помощью среды MATLAB. Используя метки R-

пиков, пульсовых волн, расставленные на записях сигналов в автоматическом режиме с последующей ручной коррекцией, получали время для каждой метки в отдельности и рассчитывали интервалы: RRTI (RR time interval), SSTI (systola time interval), DDTI (dyastola time interval), которые представляли в виде ритмограмм для пятиминутной записи в состоянии покоя, а при выполнении ФН поминутно для каждой ступени задаваемой мощности. В дальнейшем ритмограммы по каждой ступени нагрузки составляли отдельные выборки, которые обозначили: no load – состояние покоя; step 1 – 40 Вт; step 2 – 45 Вт; step 3 – 50 Вт; step 4 – 55 Вт; step 5 – 60 Вт, а показатели ApEn и SampEn рассчитывали для каждой выборки.

Расчет показателей хаотичности. При анализе результатов исследования рассчитывали аппроксимированную (ApEn) и примерную (SampEn) энтропию. Оба способа расчета предназначены для оценки степени сложности анализируемого сигнала, однако SampEn обладает преимуществом. Так SampEn устойчива к самоповторяемым паттернам внутри временного ряда и не зависит от его длины [13]. Поскольку в алгоритме расчета SampEn используются корреляционные интегралы, получаемые значения нужно рассматривать как приближительную, а не реальную меру хаотичности. Ввиду различий в алгоритме вычисления каждого из параметров – полученные значения могут различаться [14]. Для расчета параметра ApEn необходимо определить длину последовательности $X(i) = [x(i), x(i + 1), \dots, x(i + m - 1)]$, $i = 1, \dots, (N - m + 1)$, для которой необходимо получить логарифмическую вероятность попадания точки в радиус гиперсферы $R = rSDX$, $r = 0.05 \dots 0.3$.

Оценка логарифмической вероятности получается путем расчета натурального логарифма с усреднением по индексу i :

$$V_r(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln C_r^m(i)$$

Значение ApEn – это приращение логарифмической вероятности при переходе от цепочки длиной m к цепочке $m + 1$:

$$ApEn(m, r) = V_m(r) - V_{m+1}(r)$$

Итоговое значение ApEn принимается при длине ряда $m = 2$.

Для расчета параметра SampEn также используется вектор длиной m и функция расстояния $d[X_m(i), X_m(j)] (i \neq j)$. Радиус гиперсферы определяется как $r = 0,2 * std$

Значение SampEn определяется отношением:

$$SampEn = -\ln \frac{A}{B}, \text{ при}$$

$$A = d[X_{m+1}(i), X_{m+1}(j)] < r$$

$$B = d[X_m(i), X_m(j)] < r$$

Коэффициенты A и B определяют число пар паттернов векторов выполняющие условие, описанное выше. Итоговое значение SampEn также определялось при длине ряда $m = 2$.

Статистический анализ. Значение параметров хаотичности оценивалось для каждой возрастной группы до и после прохождения реабилитации, после проводили сравнение между группами для одинаковых условий. Значения энтропий усредняли по возрастным группам с предварительным удалением выбросов методом z-score. Для расчета статистических различий использовали критерий Манна-Уитни [15,16]. Данный критерий позволяет достоверно оценить различия между малыми выборками.

Результаты. Описание и анализ ритмограмм показателей кровообращения. Как продемонстрировали результаты исследования состояние покоя характеризуется отсутствием статистически значимых различий у каждого пациента между показателями энтропии динамики SSTI, DDTI и RRTI по трехминутным САКР-записям. Это можно увидеть наглядно в результате сравнения трех ритмограмм, один из характерных примеров которого без отличительных особенностей флуктуаций, представлен на рисунке 1.

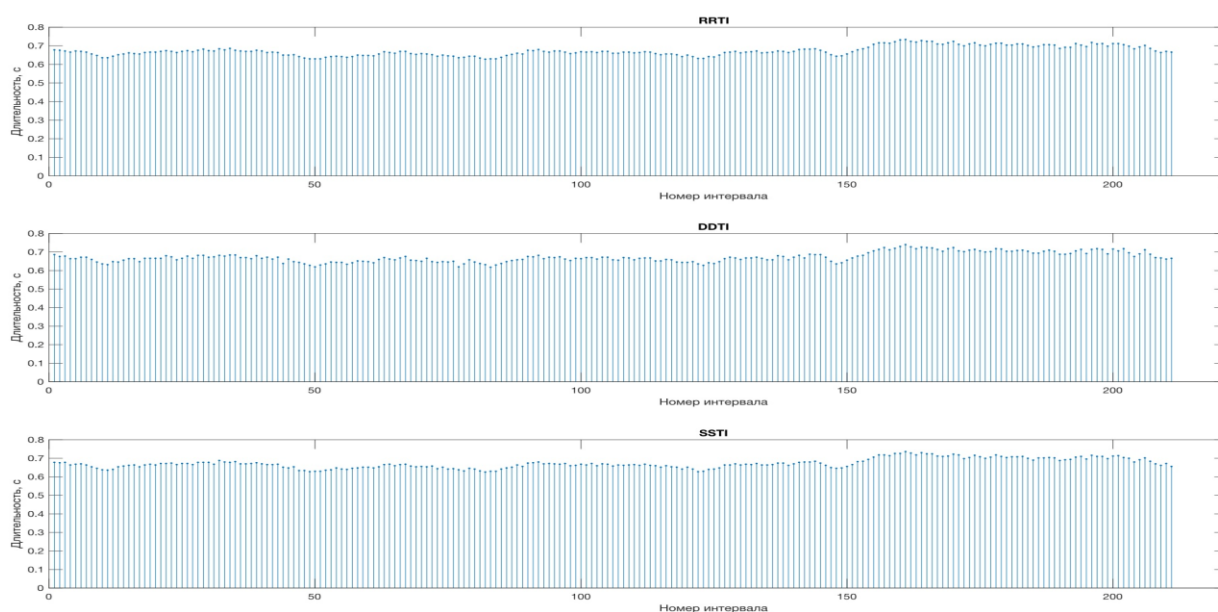


Рисунок 1. Ритмограммы RTI, SSTI, DDTI в состоянии покоя (Пациент. М., 68 л). Объяснение в тексте.

Исследование реакции интервалов на нарастающую ФН помогает различать получаемые значения для параметров хаотичности. Таким образом, для RR интервалов наблюдается равномерное снижение длительности без выраженных флуктуаций при всех уровнях нагрузки. Для SSTI наблюдали незначительное увеличение флуктуаций на предпоследнем и последнем уровнях нагрузки, в то время как, наиболее чувствительным параметром к физической нагрузке оказался DDTI, продемонстрировавшим наиболее хаотичное поведение при физической нагрузке из представленных на рисунке 2.

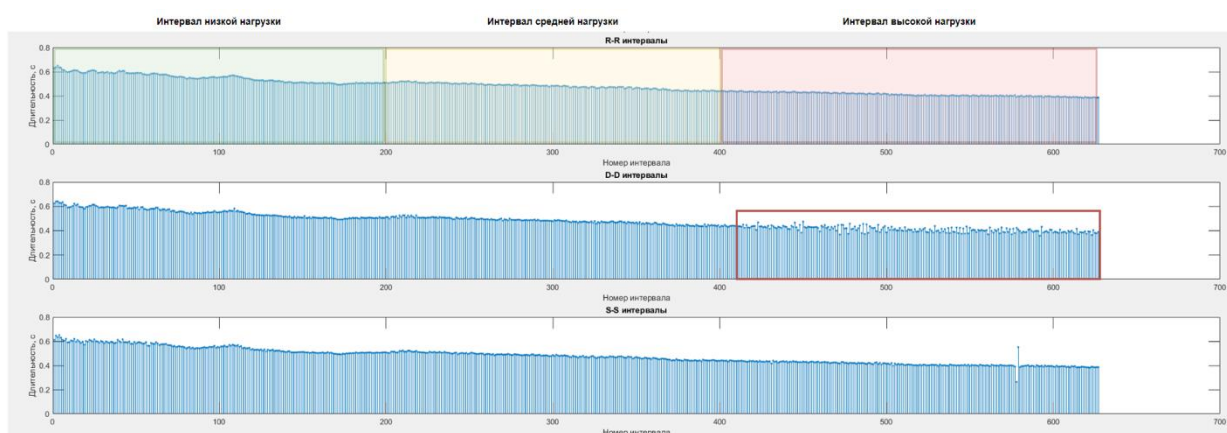


Рисунок 2. Ритмограмма RRTI, SSTI, DDTI при условиях постепенно нарастающей нагрузки (зеленая зона: 40-45 Вт, желтая зона: 45-50 Вт, красная зона: 50-60 Вт).

Анализ сравнения и поиск доказательства отличий временных интервалов RTI, DDTI, SSTI при ФН с помощью рутинных показателей среднего (M), медианы (m) и среднеквадратичного отклонения (SD) не выявил достоверных различий. Так, SD между временными рядами для пациентов средней и пожилой возрастных групп до и после прохождения реабилитации находились в диапазоне $[-0,005;0,005]$ для усредненных значений RR-интервалов, STI, DTI на каждой ступени физической нагрузки.

Оценка влияния физической реабилитации на реактивность регуляторных систем по изменению хаотичности показателей кровообращения. Полученные результаты применения $ApEn$ и $SampEn$ позволили количественно оценить хаотичность сердечного и сосудистого ритмов при низкоинтенсивной физической нагрузке, выявить отличия в сравнении с состоянием покоя, а также эффект физической реабилитации на показатели, характеризующие возможности регуляции кровообращения и сравнить группы пациентов среднего и пожилого возраста. Как продемонстрировали результаты исследования,

статистически значимые изменения показателей хаотичности до и после физической реабилитации мы наблюдали на ритмограммах RRTI у пациентов пожилого возраста уже на начальном уровне физической нагрузки, а у пациентов среднего возраста начиная с третьей ступени. Отличия хаотичности ритмограмм после физической реабилитации были статистически достоверными для показателей ApEn и SampEn для RR-интервалов у пациентов среднего возраста и для SSTI для пациентов пожилого возраста, графически представленные на рисунках 3 (а,б соответственно).

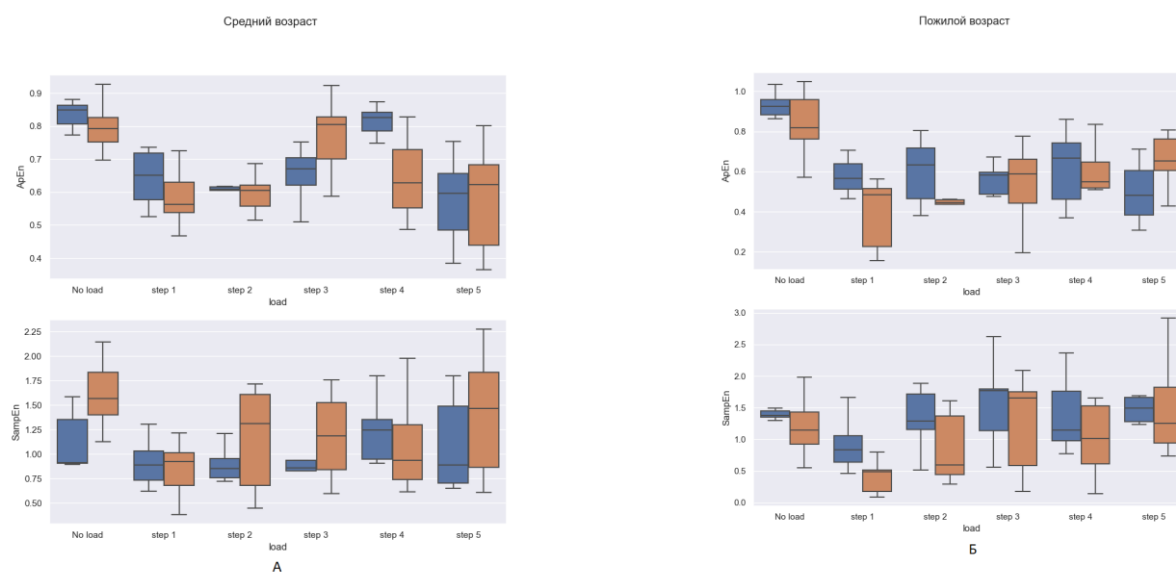


Рисунок 3. А. Значения параметров хаотичности интервала RRTI (ApEn, SampEn) для средней возрастной группы до и после реабилитации. **Б.** Значения параметров хаотичности интервала SSTI (ApEn, SampEn) для пожилой возрастной группы до и после реабилитации. Синие box plot – до реабилитации, оранжевые box plot – после реабилитации.

ApEn и SampEn для ритмограммы RR-интервалов различались на четвертой ступени ФН в группе пациентов среднего возраста ($p=0,01$ и $p=0,03$ соответственно). Сосудистый ритм, оцениваемый нами по ритмограмме SSTI, так же показал изменение хаотичности при ФН. Так, ApEn статистически достоверно различался в обеих возрастных группах: на предпоследней ступени нагрузки для среднего возраста (U-критерий, $p=0,02$) и уже на начальном уровне нагрузки для пациентов пожилого возраста (U-критерий, $p=0,04$) (рис.4).

Следует отметить, что при анализе ритмограмм RR-интервалов, SSTI, DDTI значения SampEn, характеризующее хаотичность поведения, выше как в покое, так и на всех ступенях нагрузки, чем значения ApEn, что может быть связано с влиянием самоповторяемых

паттернов сигнала на фоне сниженного общего уровня хаотичности. В связи с этим, интересно наблюдать динамику показателя хаотичности SampEn для пробы с ФН в сравнении с состоянием покоя. Результаты в виде графиков изменения SampEn для трех ритмограмм (RR-интервалов, SSTI, DDTI) продемонстрированы на рисунке 4.

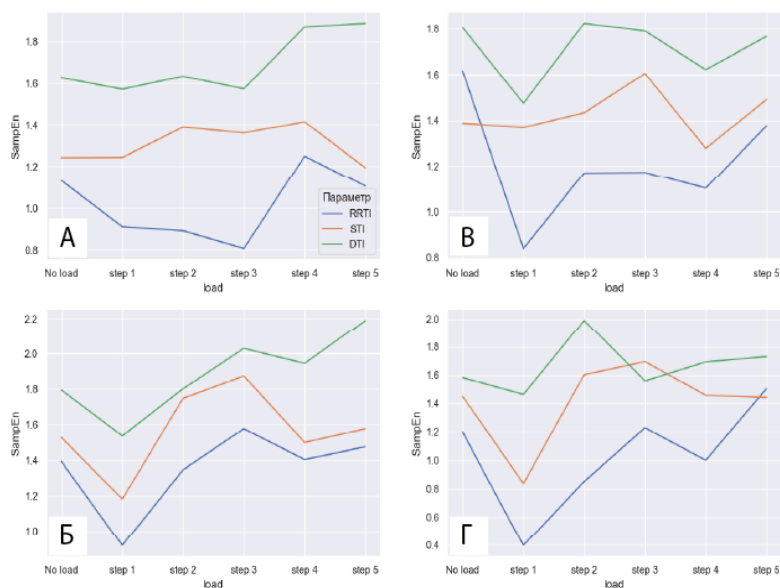


Рисунок 4. Динамика изменения параметра SampEn для трех видов интервалов. RRTI – синий цвет, SSTI – оранжевый цвет, DDTI – зеленый цвет. **А** – средний возраст до реабилитации, **Б** – пожилой возраст до реабилитации, **В** – средний возраст после реабилитации, **Г** – пожилой возраст после реабилитации.

Можно отметить, что в состоянии покоя хаотичность ритмограммы DDTI выше, чем хаотичность ритмограмм RR-интервалов и SSTI в обеих возрастных группах (рис. 4). Динамика изменения параметров хаотичности в зависимости от проведения физической реабилитации представлена на рисунке 5.

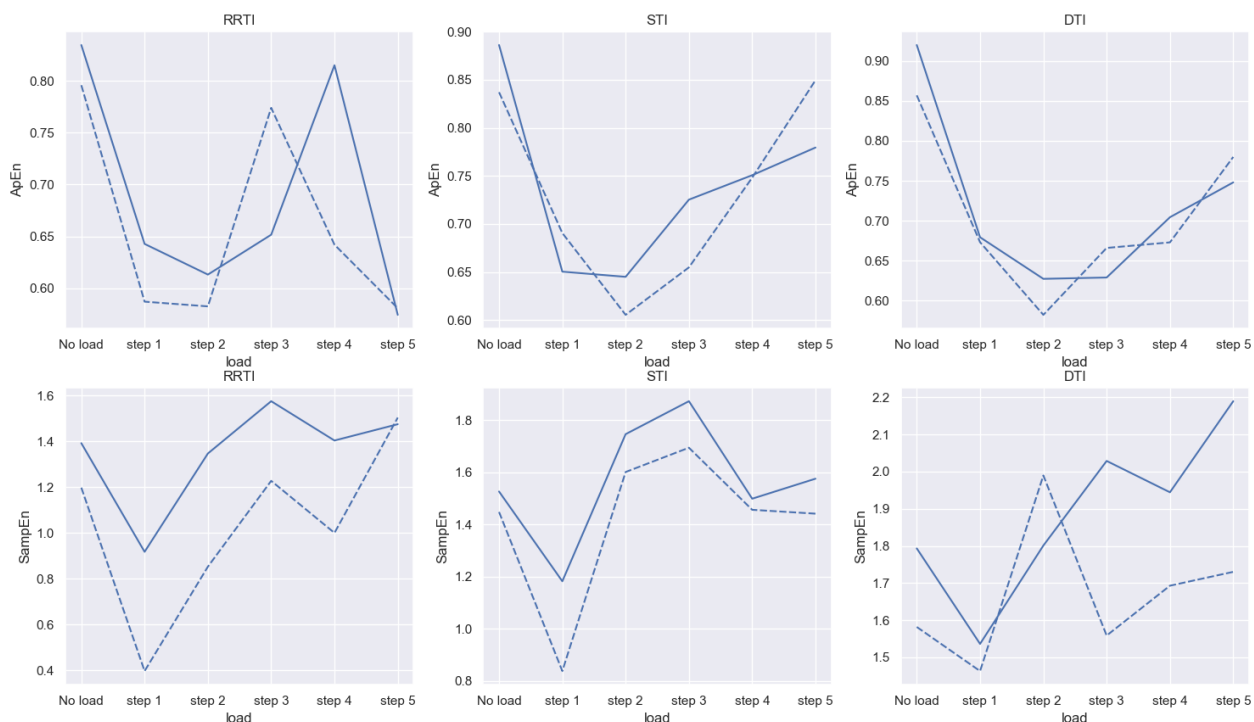


Рисунок 5. Динамика изменения значений параметров хаотичности (ApEn, SampEn) для трех ритмограмм (RTI, SSTI, DDTI) при разных уровнях ФН (0 Вт, 40 Вт, 45 Вт, 50 Вт, 55 Вт, 60 Вт) . Верхние графики для возрастной группы, параметр ApEn. Нижние графики для пожилой возрастной группы. Сплошной линией показаны значения параметров до прохождения реабилитации, пунктирной линией показаны значения параметров после прохождения реабилитации.

ApEn для ритмограммы RR-интервалов демонстрирует волнообразную динамику – значительное снижение в начале нагрузочного тестирования при минимальной ФН, с возрастанием в середине и снижением в конце пробы. ApEn для ритмограмм SSTI, DDTI имеет схожую динамику в группе пациентов пожилого возраста – в начале пробы при минимальной физической нагрузке значение параметра резко снижается относительно состояния покоя, а по мере увеличения физической нагрузки постепенно возрастает (рис 5). Динамика ApEn соответствует данным, полученным в более ранних исследованиях, в которых показано снижение возможности предсказуемости значений ритмограммы RR-интервалов при повышении уровня физической нагрузки. В покое ApEn после реабилитации остается на том же уровне, а динамика ApEn после реабилитации повторяется, но отличается распределением пиков по уровням нагрузки. Так, например, для RR-интервалов пик после реабилитации

сместился на третью ступень ФН, а для SSTI и DDTI ритмограмм появился выраженный минимум на второй ступени.

SampEn для ритмограмм RR и SSTI после реабилитации в группе пациентов пожилого возраста на большинстве ступеней нагрузки имеет значение ниже, чем до реабилитации, но оба графика демонстрируют сходное волнообразное течение. Следует отметить, что на последних уровнях ФН DDTI имеет значительно более хаотичное поведение (SampEn) до реабилитации в группе пациентов пожилого возраста, а после реабилитации снижается значение SampEn заметно снижается, что характеризует «сглаживание» ритмограммы DDTI после реабилитации.

Заключение. В состоянии покоя показатели хаотичности (ApEn, SampEn) для ритмограмм интервалов SSTI и DDTI демонстрируют волнообразный тренд, однако, этого не видно из обычной ритмограммы при ее визуальной и статистической оценке. Таким образом, даже в состоянии покоя показатели ApEn и SampEn позволяют выявлять отличия между ритмограммами интервалов, причем статистически незначимые после усреднения. При пробе с ФН динамика может изменяться в зависимости от возраста, однако, общий тренд – это начальная депрессия ApEn и SampEn с дальнейшим восстановлением значения в состоянии покоя, что может говорить о систематизации временного ряда, его насыщении.

Достоверно влияние физической реабилитации на хаотичность было показано для временных интервалов (RRTI, SSTI, DDTI) на четвертой и пятой минутах нагрузочного тестирования, особенно для DDTI у пациентов пожилого возраста. В таком состоянии интервалы SSTI и DDTI являются более информативными, чем RTI и дают более полную картину реактивности регуляции кровообращения на умеренном уровне нагрузки. Кроме этого, отмечена тенденция у пациентов среднего возраста к повышению уровня хаотичности после курса физической реабилитации и, наоборот, к понижению у пожилых пациентов. Данная тенденция сохраняется, как для параметра ApEn, так и для параметра SampEn.

Различия в значениях параметров ApEn и SampEn можно объяснить алгоритмами расчета, однако, параметр SampEn демонстрирует более резкие перепады значений при переходе между этапами нагрузки, что может свидетельствовать о влиянии переходных процессов в организме и большей чувствительности данного параметра из-за исключения повторяющихся паттернов, влияющих на общий уровень хаотической картины работы сердца. В заключение можно отметить, поскольку не вызывает сомнений утверждение, что курс физической реабилитации оказывает влияние на вегетативную регуляцию кровообращения

путем изменения хаотичности сердечной деятельности, не найдено надежных персонафицированных способов его определения. Однако можно утверждать, что такие реакции нужно исследовать при нагрузочных пробах в условиях переходных процессов. Оба исследованных параметра хаотичности позволяют получить значимые отличия в индивидуальном состоянии: курс реабилитации, средний или пожилой возраст. Таким образом, подходы к оценке влияния физической реабилитации по хаотичности variability ритмограмм показателей кровообращения (общепринятый RRTI и дополнительные SSTI и DDTI), а также возрастных различий, является перспективным для изучения заметного влияния при низких уровнях стресса организма.

Список литературы

1. Grässler B, Thielmann B, Böckelmann I, Hökelmann A. Effects of different exercise interventions on heart rate variability and cardiovascular health factors in older adults: a systematic review. *Eur Rev Aging Phys Act.* 2021;18(1):24. doi: 10.1186/s11556-021-00278-6
2. Иванова О. А., Куклин С. Г. Толерантность к физической нагрузке, структура сердечного ритма и артериальное давление у пожилых женщин перед началом периода реабилитации в группах здоровья. *Сибирский медицинский журнал.* 2015; 133(2): 52-55
3. Moraes ÍAP, Silva TD, Massetti T, Menezes LDC, Ribeiro VF, Tropiano LMCC, Barnabé V, Hoshi RA, Monteiro CBM, Fernandes M. Fractal correlations and linear analyses of heart rate variability in healthy young people with different levels of physical activity. *Cardiol Young.* 2019;29(10):1236-1242. doi: 10.1017/S1047951119001793
4. Liou J-W, Wang P-S, Wu Y-T, Lee S-K, Chang S-D, Liou M. ECG Approximate Entropy in the Elderly during Cycling Exercise. *Sensors.* 2022; 22(14):5255. <https://doi.org/10.3390/s22145255>
5. Felber Dietrich D, Ackermann-Liebrich U, Schindler C, Barthélémy JC, Brändli O, Gold DR, Knöpfli B, Probst-Hensch NM, Roche F, Tschopp JM, von Eckardstein A, Gaspoz JM; Sapaldia team. Effect of physical activity on heart rate variability in normal weight, overweight and obese subjects: results from the SAPALDIA study. *Eur J Appl Physiol.* 2008;104(3):557-65. doi: 10.1007/s00421-008-0800-0. Epub 2008 Jul 3. PMID: 18597107; PMCID: PMC3705554
6. Lewis MJ, Short AL. Sample entropy of electrocardiographic RR and QT time-series data during rest and exercise. *Physiol Meas.* 2007;28(6):731-44. doi: 10.1088/0967-3334/28/6/011

7. Hautala AJ, Mäkikallio TH, Seppänen T, Huikuri HV, Tulppo MP. Short-term correlation properties of R-R interval dynamics at different exercise intensity levels. *Clin Physiol Funct Imaging*. 2003 ;23(4):215-23. doi: 10.1046/j.1475-097x.2003.00499.x. PMID: 12914561.
8. Javorka M, Zila I, Balhárek T, Javorka K. Heart rate recovery after exercise: relations to heart rate variability and complexity. *Braz J Med Biol Res*. 2002;35(8):991-1000. doi: 10.1590/s0100-879x2002000800018
9. Platisa MM, Gal V. Reflection of heart rate regulation on linear and nonlinear heart rate variability measures. *Physiol Meas*. 2006;27(2):145-54. doi: 10.1088/0967-3334/27/2/005. Epub 2006 Jan 4. PMID: 16400201
10. Goya-Esteban R., Sa J.P., Rojo-Álvarez J.L., Barquero-Pérez Ó. Characterization of Heart Rate Variability Loss with Aging and Heart Failure Using Sample Entropy. *Computers in Cardiology*. 2008; 35: 41 - 44. 10.1109/CIC.2008.4748972.
11. Zhang D, She J, Zhang Z, Yu M. Effects of acute hypoxia on heart rate variability, sample entropy and cardiorespiratory phase synchronization. *Biomed Eng Online*. 2014;13:73. doi: 10.1186/1475-925X-13-73. PMID: 24920347; PMCID: PMC4059097
12. Пивоваров В. В., Тихоненко В. М., Кормилицын А. Ю., Зайцев Г. К. Система "Кардиотехника-САКР" для измерения в каждом сердечном цикле истинного артериального давления в плече при его высокой вариабельности. *Поликлиника*. 2019; 1(1):30-32
13. Sasaki H. Effects of the exercise intensities standardized by anaerobic threshold on EEG and heart rate variability. *The Hokkaido Journal of Medical Science*. 1998;73(4):327-341.
14. Delgado-Bonal A., Marshak A. Approximate entropy and sample entropy: A comprehensive tutorial. *Entropy*. 2019; 21(6):541
15. Кузнецов Л. А., Журавлева М. Г. Построение карт контроля качества с помощью непараметрического критерия Вилкоксона-Манна-Уитни. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2009;75 (1):70-74
16. Корнеев А. А., Кричевец А. Н. Условия применимости критериев Стьюдента и Манна-Уитни. *Психологический журнал*. 2011. 32 (1): 97-110
17. Gramkow MH, Hasselbalch SG, Waldemar G, Frederiksen KS. Resting State EEG in Exercise Intervention Studies: A Systematic Review of Effects and Methods. *Front Hum Neurosci*. 2020;14:155. doi: 10.3389/fnhum.2020.00155. PMID: 32477081; PMCID: PMC7232557
18. Рубинский А. В., Антипов Н. О., Рябкова В. А. , Исманова В.Д., Калиниченко А.Н., Марченко В.Н. Исследование жизнеспособности по вариабельности показателей

кровообращения у пациентов среднего и пожилого возраста. Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики. 2023; 1: 278-293. DOI 10.24412/2312-2935-2023-1-278-293

19. Лоскутов А. Ю., Козлов А. А., Хаханов Ю. М. Энтропия и прогноз временных рядов в теории динамических систем. Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2009; 17(4):98-113

20. Рубинский А.В., Марченко В.Н., Калиниченко А.Н., Антипов Н.О., Рябкова В.А., Аль мажмай Н.М.Х. К вопросу об объективизации оценки жизнеспособности пациентов пожилого возраста по показателям вегетативной регуляции //Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики. 2022; 4:144-159

Reference

1. Grässler B, Thielmann B, Böckelmann I, Hökelmann A. Effects of different exercise interventions on heart rate variability and cardiovascular health factors in older adults: a systematic review. *Eur Rev Aging Phys Act.* 2021;18(1):24. doi: 10.1186/s11556-021-00278-6

2. Ivanova O. A., Kuklin S. G. Tolerantnost' k fizicheskoj nagruzke, struktura serdechnogo ritma i arterial'noe davlenie u pozhilyh zhenshchin pered nachalom perioda reabilitacii v gruppah zdorov'ya [Exercise tolerance, heart rate structure and blood pressure in elderly women before the start of the rehabilitation period in health groups] *Sibirskij Nauchnyj medicinskij zhurnal [Siberian Scientific Medical Journal]*. 2015; 133(2): 52-55. (InRussian)

3. Moraes ÍAP, Silva TD, Massetti T, Menezes LDC, Ribeiro VF, Tropiano LMCC, Barnabé V, Hoshi RA, Monteiro CBM, Fernandes M. Fractal correlations and linear analyses of heart rate variability in healthy young people with different levels of physical activity. *Cardiol Young.* 2019;29(10):1236-1242. doi: 10.1017/S1047951119001793

4. Liou J-W, Wang P-S, Wu Y-T, Lee S-K, Chang S-D, Liou M. ECG Approximate Entropy in the Elderly during Cycling Exercise. *Sensors.* 2022; 22(14):5255. <https://doi.org/10.3390/s22145255>

5. Felber Dietrich D, Ackermann-Liebrich U, Schindler C, Barthélémy JC, Brändli O, Gold DR, Knöpfli B, Probst-Hensch NM, Roche F, Tschopp JM, von Eckardstein A, Gaspoz JM; Sapaldia team. Effect of physical activity on heart rate variability in normal weight, overweight and obese subjects: results from the SAPALDIA study. *Eur J Appl Physiol.* 2008;104(3):557-65. doi: 10.1007/s00421-008-0800-0. Epub 2008 Jul 3. PMID: 18597107; PMCID: PMC3705554

6. Lewis MJ, Short AL. Sample entropy of electrocardiographic RR and QT time-series data during rest and exercise. *Physiol Meas.* 2007;28(6):731-44. doi: 10.1088/0967-3334/28/6/011
7. Hautala AJ, Mäkikallio TH, Seppänen T, Huikuri HV, Tulppo MP. Short-term correlation properties of R-R interval dynamics at different exercise intensity levels. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2003 ;23(4):215-23. doi: 10.1046/j.1475-097x.2003.00499.x. PMID: 12914561.
8. Javorka M, Zila I, Balhárek T, Javorka K. Heart rate recovery after exercise: relations to heart rate variability and complexity. *Braz J Med Biol Res.* 2002;35(8):991-1000. doi: 10.1590/s0100-879x2002000800018
9. Platisa MM, Gal V. Reflection of heart rate regulation on linear and nonlinear heart rate variability measures. *Physiol Meas.* 2006;27(2):145-54. doi: 10.1088/0967-3334/27/2/005. Epub 2006 Jan 4. PMID: 16400201
10. Goya-Esteban R., Sa J.P., Rojo-Álvarez J.L., Barquero-Pérez Ó. Characterization of Heart Rate Variability Loss with Aging and Heart Failure Using Sample Entropy. *Computers in Cardiology.* 2008; 35: 41 - 44. 10.1109/CIC.2008.4748972
11. Zhang D, She J, Zhang Z, Yu M. Effects of acute hypoxia on heart rate variability, sample entropy and cardiorespiratory phase synchronization. *Biomed Eng Online.* 2014;13:73. doi: 10.1186/1475-925X-13-73. PMID: 24920347; PMCID: PMC4059097
12. Pivovarov V. V., Tihonenko V. M., Kormilicyn A. YU., Zajcev G. K. Sistema "Kardiotekhnika-SAKR" dlya izmereniya v kazhdom serdechnom cikle istinnogo arterial'nogo davleniya v pleche pri ego vysokoj variabel'nosti ["Cardiotechnika-SACR" system for measuring true blood pressure in the shoulder in each cardiac cycle with its high variability]. *Poliklinika [Polyclinic].*2019; 1(1):30-32 (InRussian)
13. Sasaki H. Effects of the exercise intensities standardized by anaerobic threshold on EEG and heart rate variability. *The Hokkaido Journal of Medical Science.* 1998;73(4):327-341
14. Delgado-Bonal A., Marshak A. Approximate entropy and sample entropy: A comprehensive tutorial. *Entropy.* 2019; 21(6):541
15. Kuznecov L. A., ZHuravleva M. G. Postroenie kart kontrolya kachestva s pomoshch'yu neparametricheskogo kriteriya Vilkoksona-Manna-Uitni [Building quality control maps using the nonparametric Wilcoxon-Mann-Whitney criterion]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Factory laboratory. Diagnostics of materials].* 2009;75 (1):70-74.

16. Korneev A. A., Krichevec A. N. Usloviya primenimosti kriteriev St'yudenta i Manna-Uitni [Conditions of applicability of the Student and Mann-Whitney criteria]. Psihologicheskij zhurnal [Psychological journal]. 2011. 32 (1): 97-110 (InRussian)
17. Gramkow MH, Hasselbalch SG, Waldemar G, Frederiksen KS. Resting State EEG in Exercise Intervention Studies: A Systematic Review of Effects and Methods. Front Hum Neurosci. 2020;14:155. doi: 10.3389/fnhum.2020.00155. PMID: 32477081; PMCID: PMC7232557
18. Rubinskij A. V., Antipov N. O., Ryabkova V. A. , Ismanova V.D., Kalinichenko A.N., Marchenko V.N. Issledovanie zhiznesposobnosti po variabel'nosti pokazatelej krovoobrashcheniya u pacientov srednego i pozhilogo vozrasta [Viability study by variability of circulatory parameters in middle-aged and elderly patients]. Sovremennye problemy zdavoohraneniya i medicinskoj statistiki [Current problems of healthcare and medical statistics]. 2023; 1: C. 278-293. DOI 10.24412/2312-2935-2023-1-278-293 (InRussian)
19. Loskutov A. YU., Kozlov A. A., Hahanov YU. M. Entropiya i prognoz vremennyh ryadov v teorii dinamicheskikh sistem [Entropy and time series prediction in the theory of dynamical systems]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Prikladnaya nelinejnaya dinamika [Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics]. 2009; 17(4):98-113 (InRussian)
20. Rubinskij A.V., Marchenko V.N., Kalinichenko A.N., Antipov N.O., Ryabkova V.A., Al'mazhmaj N.M.H. K voprosu ob ob"ektivizacii ocenki zhiznesposobnosti pacientov pozhilogo vozrasta po pokazatelyam vegetativnoj regulyacii [On the issue of objectification of the assessment of the viability of elderly patients by indicators of vegetative regulation]. Sovremennye problemy zdavoohraneniya i medicinskoj statistiki [Current problems of healthcare and medical statistics]. 2022;4:144-159 (InRussian)

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Acknowledgments. The study did not have sponsorship.

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

Сведения об авторах

Рубинский Артемий Владимирович - кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры медицинской реабилитации и адаптивной физической культуры, ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6-8; старший научный сотрудник лаборатории возрастной патологии

сердечно-сосудистой системы, АННО ВО НИЦ «Санкт-Петербургский институт биорегуляции и геронтологии», 197110, Санкт-Петербург, пр. Динамо, 3, e-mail: rubinskiyav@lspbgnu.ru, ORCID: 0000-0003-1041-8745; SPIN-cod: 3020-0781

Антипов Никита Олегович, аспирант кафедры биотехнических систем, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5, литера Ф, e-mail: jobber1994@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9848-5146; SPIN-код: 8849-3775

Заровкина Любовь Анатольевна, кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры медицинской реабилитации и адаптивной физической культуры, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0002-1720-1875;

Шишкевич Андрей Николаевич - доктор медицинских наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории возрастной патологии сердечно-сосудистой системы, АННО ВО НИЦ «Санкт-Петербургский институт биорегуляции и геронтологии», 197110, Санкт-Петербург, пр. Динамо, 3; преподаватель первой кафедры хирургии (усовершенствования врачей) им. П.А. Куприянова ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации, 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, 6; e-mail: shishkevich50@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4605-6678, SPIN-cod: 1323-2430

Барыкина Анастасия Викторовна - научный сотрудник отдела клинической геронтологии, Автономная некоммерческая организация «Научно-исследовательский медицинский центр «Геронтология» (АНО НИМЦ «Геронтология»), 125371, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 116, стр.1, оф.321; врач функциональной диагностики ОГБУЗ «Яковлевская ЦРБ», 309070, Россия, Белгородская область, г. Строитель, ул. Ленина, д. 26, e-mail: barykina_2021@list.ru, ORCID: 0009-0009-2147-4532

Дальсаева Милана Муссаевна - врач-дерматовенеролог, ООО Клиника эстетической медицины «МД Клиник», 364000, Чеченская республика, г. Грозный, ул. Гикало, 1, 2 эт. левое крыло, e-mail: mila_na_da@mail.ru, ORCID: 0009-0007-3007-5299

Information about authors

Rubinskiy Artemy V. - Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Medical Rehabilitation and Adaptive Physical Culture, Pavlov University, 6-8, L'va Tolstogo str., Saint Petersburg, 197022, Russia; Senior researcher at the Laboratory of Age-related Pathology of the cardiovascular system, St. Petersburg Institute of Bioregulation and Gerontology, pr. Dinamo 3, St.Petersburg, 197110, e-mail: rubinskiyav@lspbgnu.ru, ORCID: 0000-0003-1041-8745; SPIN-cod: 3020-0781

Antipov Nikita O. - graduate student in department of biotechnical systems, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (ul. Professora Popova 5, 197022 St. Petersburg, Russian Federation), e-mail: jobber1994@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9848-5146; SPIN-код: 8849-3775

Zarovkina Lubov'A. - Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Medical Rehabilitation and Adaptive Physical Culture, Pavlov University, 6-8, L'va Tolstogo str., Saint Petersburg, 197022, Russia, ORCID: 0000-0002-1720-1875;

Shishkevich Andrey N. - MD, PhD, Senior researcher at the Laboratory of Age-related Pathology of the cardiovascular system, St. Petersburg Institute of Bioregulation and Gerontology, pr. Dinamo 3, St.Petersburg, 197110; The First Department and Clinic of Postgraduate Surgery named after P.A. Kupriyanov Military Medical Academy named after S.M. Kirov MO RF, st. Academician Lebedeva 6, St. Petersburg, 194044, e-mail: shishkevich50@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4605-6678, SPIN-cod: 1323-2430

Barykina Anastasia Viktorovna - Research Associate of the Department of Clinical Gerontology, Research Medical Centre «GERONTOLOGY», 125371, Russia, Moscow, Volokolamskoe highway,116, b.1, of. 321; functional diagnostics doctor, Yakovlevskaya Central regional hospital, 309070, Russia, Belgorod region, Stroitel, 26 Lenina street, e-mail: barykina_2021@list.ru, ORCID:0009-0009-2147-4532

Dal'saeva Milana Mussaevna - dermatovenerologist, LLC Clinic of Aesthetic Medicine «MD Klinik», 364000, Chechen republic, Grozny, Gikalo str., second floor, left wing, e-mail: mila_na_da@mail.ru, ORCID 0009-0007-3007-5299

Статья получена: 28.09.2023 г.
Принята к публикации: 25.12.2023 г.