

Научная статья
УДК 519.246.85 + 616.1
doi: 10.34822/1999-7604-2022-3-32-38

НЕЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КАРДИОСИГНАЛОВ С ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ

Виолетта Вячеславовна Григоренко^{1✉}, Нина Борисовна Назина²

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹ grigv_84@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-9073-4184>

² nnb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9363-160X>

Аннотация. В статье рассматривается исследование и оценка хаотической динамики параметров сложных нестационарных биосистем, в частности особый тип хаоса, возникающий в параметрах, которыми эти системы описаны. В отличие от детерминированного хаоса Лоренса, в таких системах не только невозпроизводим процесс, но и никогда невозпроизводимо начальное состояние системы. В основе исследования лежит оценка степени хаотичности временных рядов кардиосигналов сердечно-сосудистой системы человека с использованием методов непараметрической математической статистики, методов нелинейной динамики. При помощи автокорреляционного анализа на примере элементов кардиосигналов (временных рядов кардиоинтервалов) сердечно-сосудистой системы показано, что параметры биосистем имеют строго хаотическую структуру и нелинейную тенденцию. Расчет старшего показателя Ляпунова показал, что происходит постоянная смена знака (+, –) при каждой регистрации кардиосигналов, что доказывает наличие хаотических процессов в работе сердца. Исследование может быть использовано для идентификации параметров функционального состояния организма человека.

Ключевые слова: нелинейная динамика, старший показатель Ляпунова, анализ временных рядов, коэффициент автокорреляции, коррелограмма

Для цитирования: Григоренко В. В., Назина Н. Б. Нелинейный анализ параметров кардиосигналов с хаотической динамикой // Вестник кибернетики. 2022. № 3 (47). С. 32–38. DOI 10.34822/1999-7604-2022-3-32-38.

Original article

NON-LINEAR ANALYSIS OF CARDIAC SIGNALS PARAMETERS WITH CHAOTIC DYNAMICS

Violetta V. Grigorenko^{1✉}, Nina B. Nazina²

^{1,2} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ grigv_84@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-9073-4184>

² nnb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9363-160X>

Abstract. The article studies and evaluates the chaotic dynamics parameters of complex non-stationary biosystems, in particular, a specific chaos type occurring in the parameters that describe the systems mentioned. Contrary to Lawrence deterministic chaos, these systems provide neither the process of repetition nor the repetition of the system's initial state. The study is based on the evaluation of the degree of chaotic time series of cardiac signals of a human cardiovascular system using methods of non-parametric mathematical statistics and those of non-linear dynamics. On the example of elements of cardiac signals (time series cardiac intervals) of a cardiovascular system and with autocorrelation analysis, the study shows that biosystem parameters have a strictly chaotic structure and non-linear trend. The chaotic processes in cardiac performance are demonstrated by computing the largest Lyapunov exponent and, as a result, a constant sign (+, –) change in each cardiac signal recording. The study can be used to identify parameters of the functional state of a human organism.

Keywords: non-linear dynamics, largest Lyapunov exponent, time series analysis, autocorrelation coefficient, correlogram

For citation: Grigorenko V. V., Nazina N. B. *Non-Linear Analysis of Cardiac Signals Parameters with Chaotic Dynamics // Proceedings in Cybernetics*. 2022. No. 3 (47). P. 32–38. DOI 10.34822/1999-7604-2022-3-32-38.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на значительный прогресс в расширении инструментальных способов неинвазивной диагностики состояний параметров биосистем, идет постоянный поиск повышения информационной отдачи от полученных данных исследований. На сегодняшний день актуальной проблемой является построение эффективных способов и алгоритмов обработки и анализа параметров биосистем, а также получения более точных и качественных результатов для дальнейшего прогнозирования и оценки функционального состояния организма человека.

По классификации W. Weaver, предложенной в 1948 г., биосистемы (и в частности, сердечно-сосудистая система) относятся к системам третьего типа (далее – СТТ) [1]. Это динамически изменяющиеся, нестационарные, открытые (подверженные воздействию шумов как внешней, так и внутренней природы) системы, а их параметры строго хаотичны [2, 3]. В отличие от детерминированного хаоса Лоренса, в таких системах не только невозпроизводим процесс, но и никогда невозпроизводимо начальное состояние системы $x(t_0)$ [4].

Оценка состояния СТТ зависит от возможностей количественного описания протекающих процессов в рамках ограниченной информации, в условиях большого количества внешних факторов воздействия, а также индивидуальных особенностей человека [5, 6]. Основной причиной создания моделей поведения вектора состояния СТТ является именно невозпроизводимость результатов экспериментов. Каждый раз регистрируемые выборки вектора кардиосигнала будут «уникальны» даже при одинаковых условиях эксперимента и, более того, уникальностью будет обладать каждый временной участок такого сигнала [7].

В современной медицине, в том числе российской, широко используют детерминистско-стохастический подход (далее – ДСП) обработки данных о состоянии систем третьего типа (нормативы, инструкции и т. д.). В ДСП параметры, которыми описана система организма человека или его подсистема, всегда усреднены. С позиции детерминистского подхода многократное повторение любого процесса должно обеспечивать идентификацию моделей сложной динамической системы в фазовом пространстве состояний. В стохастическом подходе такой вектор состояния системы $x(t)$ должен иметь повторяющееся начальное значение $x(t_0)$ и воспроизводимую функцию распределения $f(x)$ для всех конечных состояний $x(t_k)$. Если начальное состояние $x(t_0)$ воспроизвести точно невозможно, то применение стохастического подхода уже ограничено (нет повторений результатов испытаний) [8].

В последние годы активно развивается новое направление в естествознании – теория хаоса-самоорганизации [9]. В ее основе лежит идентификация особого типа хаоса, свойственного сложным, нестационарным, динамическим биосистемам, с использованием методов непараметрической математической статистики, методов нелинейной динамики (расчет старшего показателя Ляпунова), а также расчета параметров квазиаттракторов, которые качественно и количественно описывают хаотическую динамику биомедицинских сигналов [9].

Сердечно-сосудистая система (далее – ССС) относится к СТТ и представляет собой сложную, динамическую систему, параметры которой меняются в зависимости от времени и целого ряда внешних и внутренних факторов (в том числе шумов), которые непрерывно влияют на ее состояние [10]. Современные представления об особенностях кардиосигналов, которыми описана ССС, указывают на

необходимость исследования и оценки степени хаотичности такого рода сигналов. Такая количественная оценка может стать важным признаком для идентификации функциональных состояний организма человека, а также ряда патологий в работе сердца.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Одним из основных параметров для анализа состояния ССС является кардиосигнал. Кардиосигнал является нестационарным сигналом, который обладает индивидуальными биологическими свойствами организма конкретного человека. Одним из элементов структуры кардиосигнала является кардиоинтервал (далее – КИ). КИ ССС характеризуют сердечный ритм. Нормогенезу соответствуют интервалы между ударами сердца, которые варьируются, но без значительных отклонений, а равенство или существенное отклонение от среднего значения кардиоинтервалов свидетельствует о наличии патологии, например, различного рода аритмии (брадикардия, тахикардия) [11, 12]. Для регистрации кардиосигналов в исследовании использовался стационарный медицинский прибор – пульсоксиметр «Элокс-01М», который регистрирует пульсовую волну с одного из пальцев в положении сидя, в течение пятиминутного интервала времени (согласно рекомендациям Ассоциации кардиологов Европы) [13]. Сертифицированный медицинский прибор, пульсоксиметр «Элокс-01М», активно используется для экспресс-анализа состояния функциональных систем организма человека (применялся инфракрасный датчик для регистрации пульсовой волны и уровня насыщения кислорода – SpO_2).

В качестве способа идентификации хаотических процессов работы параметров сердечно-сосудистой системы в исследовании используется, во-первых, расчет коэффициента автокорреляции и построение автокорреляционных функций (далее – коррелограмм), по которым можно сделать вывод о структуре временного ряда (линейности, тенденции, хаотичности); во-вторых, определение скорости разбегания фазовых траекторий кардиосигналов, которая оценивается на основе расчета старшего показателя Ляпунова [14].

Хаотичность процесса работы сердца подтверждает использование метода анализа временных рядов КИ, расчета коэффициентов автокорреляции (далее – АСФ) и визуализации полученных функций в виде коррелограмм. При помощи автокорреляционной функции и по виду коррелограммы определялось наличие нелинейности в сигнале.

Старший показатель Ляпунова (далее – СПЛ) позволяет идентифицировать тип динамической системы с точки зрения присутствия хаотического поведения, а также способен отражать уровень хаотичности сигнала [15]. Знак старшего показателя Ляпунова полностью характеризует тип колебаний динамической системы: если он положителен, то это является признаком хаотичности биосистемы. Для расчета СПЛ в работе используется интерполяционный метод, представленный в работах А. В. Беспалова, Н. Д. Поляхова [15, 16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методами математической непараметрической статистики определялась корреляционная зависимость между последовательными уровнями временного ряда со сдвинутыми на несколько шагов во времени рядами данных. Для каждой обследуемой число повторов регистраций кардиосигналов в эксперименте составило 15. Проводились расчеты коэффициента автокорреляции для лагов от 1 до 50. Пример результата расчета коэффициента автокорреляции с соответствующим ему лагом, а также коррелограмма временных рядов кардиоинтервалов обследуемых в различных функциональных состояниях представлены на рис. 1а, 1б, 1в. По оси абсцисс отложены значения лагов $\tau = 50$, по оси ординат – значения коэффициента автокорреляции АСФ.

На рис. 1а, 1б, 1в видно, что для всех состояний превалирует значение коэффициента корреляции меньше 0,5, что говорит о хаотичности процесса для всех временных рядов кардиоинтервалов, также визуализируется значительная разница в форме самой коррелограммы. В результате проведенных исследований было выявлено, что кардиоинтервалы имеют только хаотическую структуру временных рядов, а также сильную нелинейную составляющую.

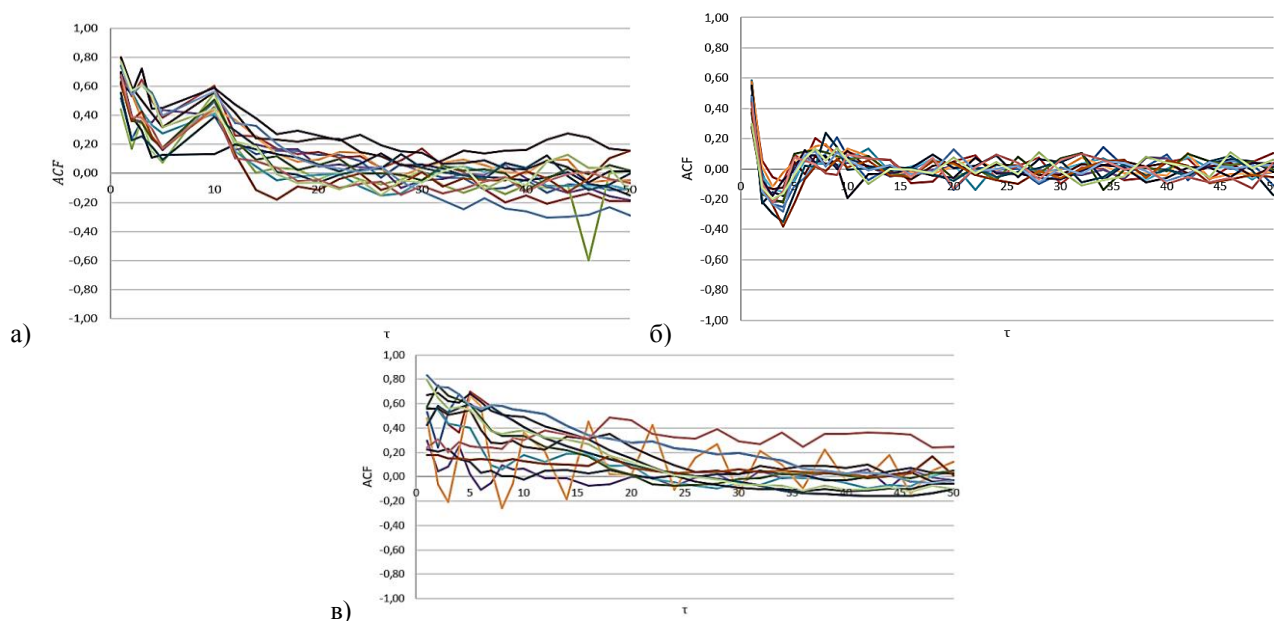


Рис. 1. Коррелограмма:

а – временных рядов кардиоинтервала (15 регистраций) обследуемой в состоянии нормогенеза;
б – временных рядов кардиоинтервала (15 регистраций) обследуемой в состоянии брадикардии;
в – временных рядов кардиоинтервала (15 регистраций) обследуемой в состоянии тахикардии

Примечание: составлено авторами.

На рис. 2а, 2б, 2в представлены рассчитанные коэффициенты СПЛ для трех человек (обследуемых) в различных функциональных состояниях (15 регистраций кардиосигнала).

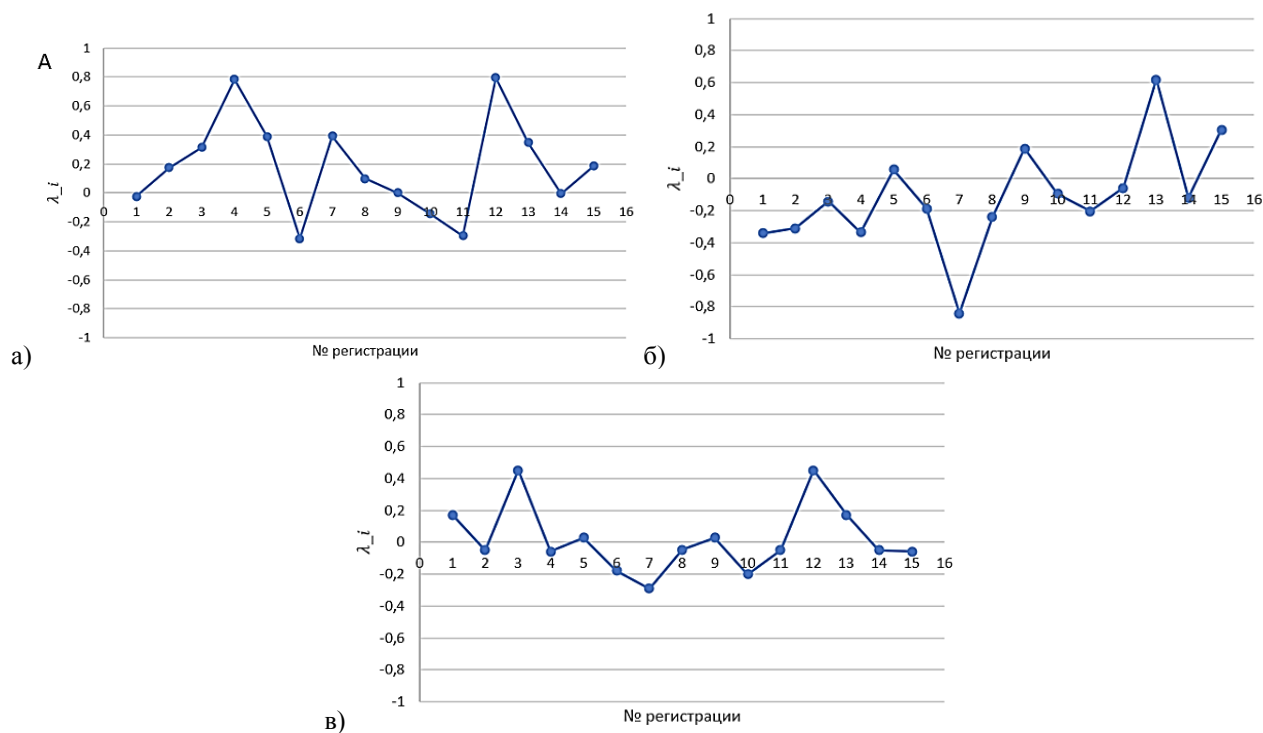


Рис. 2. Расчет СПЛ:

а – для временных рядов КИ обследуемой в состоянии нормогенеза;
б – для временных рядов КИ обследуемой в состоянии брадикардии;
в – для временных рядов КИ обследуемой в состоянии тахикардии

Примечание: составлено авторами.

В таблице представлены результаты расчета СПЛ (λ_i) для 15 повторов регистрации кардиосигналов испытуемых в различных

функциональных состояниях, а также рассчитанные абсолютные (Δ_x) и относительные (ε , %) погрешности.

Таблица

Результаты расчета СПЛ (λ_i) для 15-ти повторов регистраций кардиосигналов

№ рег-ии КИ	Состояния								
	Нормогенез			Брадикардия			Тахикардия		
	λ_i	Δ_x	ε , %	λ_i	Δ_x	ε , %	λ_i	Δ_x	ε , %
1	-0,0247	0,11	1,37 %	-0,3415	0,9798	1,03 %	0,1696	0,77	0,85 %
2	0,1750	0,40	0,70 %	-0,3102	0,17	0,20 %	-0,0512	0,73	2,70 %
3	0,3131	0,71	0,70 %	-0,1427	0,1	0,25 %	0,4498	0,26	0,12 %
4	0,7822	0,56	0,22 %	-0,3354	0,26	0,28 %	-0,0580	0,02	0,07 %
5	0,3893	0,69	0,54 %	0,0557	0,65	4,33 %	0,0278	0,83	6,38 %
6	-0,3144	0,13	0,13 %	-0,1871	0,58	1,12 %	-0,1779	0,35	0,36 %
7	0,3930	0,91	0,71 %	-0,8426	0,76	0,32 %	-0,2898	0,88	0,54 %
8	0,0977	0,03	0,09 %	-0,2414	0,82	1,22 %	-0,0470	0,73	2,70 %
9	0,0012	0,39	0,00 %	0,1884	0,93	1,79 %	0,0278	0,86	6,62 %
10	-0,1461	0,91	1,94 %	-0,0940	0,4	1,54 %	-0,2006	0,5	0,50 %
11	-0,2959	0,05	0,05 %	-0,2027	0,97	1,73 %	-0,0512	0,73	2,70 %
12	0,7939	0,41	0,16 %	-0,0583	0,39	2,44 %	0,4498	0,26	0,12 %
13	0,3469	0,80	0,71 %	0,6189	0,9	0,52 %	0,1696	0,77	0,85 %
14	-0,0056	0,83	0,75 %	-0,1207	0,9	2,73 %	-0,0494	0,82	3,16 %
15	0,1859	0,98	1,63 %	0,3058	0,94	1,11 %	-0,0580	0,02	0,07 %

Примечание: составлено авторами.

Как видно из рис. 2а, 2б, 2в и табл. 1, знак СПЛ все время меняет знак от регистрации к регистрации кардиосигнала вне зависимости от функционального состояния организма человека, что говорит о хаотической природе процесса работы сердца.

Необходимым условием возникновения хаоса в динамических нестационарных системах является размерность фазового пространства $N > 3$. В исследовании количество значений временного ряда КИ варьируется от 290 до 500 в зависимости от функционального состояния обследуемого (брадикардия: $\bar{x} = 280$; нормогенез: $\bar{x} = 300 \sim 350$; тахикардия: $\bar{x} = 500$ и выше).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования было выявлено и экспериментально подтверждено, что кардиосигналы, которыми описана сердечно-сосудистая система человека, имеют особую строго хаотическую структуру:

1. Результаты расчета коэффициентов автокорреляции и построение коррелограмм временных рядов кардиоинтервалов для обследуемых как в норме, так и при наличии патологии показали непрерывную смену знака с каждым увеличением лага, также нет стремления АСФ к нулю.

2. Расчет старшего показателя Ляпунова для временных рядов кардиоинтервалов демонстрирует постоянную смену знака, а фазовые траектории непрерывно и хаотически пересекаются, что говорит о наличии хаоса, отличного от детерминированного (динамического) хаоса Лоренца. В аттракторах Лоренца их пересечение невозможно, так как они всегда расходятся.

Таким образом, представленный в работе стохастический и хаотический анализ временных рядов кардиоинтервалов ССС человека позволяет повысить качество диагностики физиологического состояния организма человека и расширить функциональные возможности существующих миниатюрных медицинских приборов кардиодиагностики.

Список источников

References

1. Чемпалова Л. С., Яхно Т. А., Манина Е. А., Игнатенко А. П., Оразбаева Ж. А. Гипотеза W. Weaver при изучении произвольных и непроизвольных движений // Вестн. новых мед. технологий. 2021. Т. 28, № 1. С. 75–77.
2. Grigorenko V. V., Eskov V. M., Filatov M. A., Pavlyk A. V. New Information Technologies in the Analysis of Electroencephalograms // J Phys: Conf Ser. 2020. Vol. 1679. P. 032081.
3. Grigorenko V. V., Eskov V. M., Nazina N. B., Egorov A. A. Information-Analytical System of Cardiographic Information Functional Diagnostics // J Phys: Conf Ser. 2020. Vol. 1515. P. 052027.
4. Еськов В. М., Еськов В. В., Гавриленко Т. В., Вохмина Ю. В. Формализация эффекта «повторение без повторения» Н. А. Бернштейна // Биофизика. 2017. Т. 62, № 1. С. 168–176.
5. Филатова О. Е., Русак С. Н., Майстренко Е. В., Добрынина И. Ю. Возрастная динамика параметров сердечно-сосудистой системы населения Севера РФ // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 2. С. 40–49.
6. Filatova O. E., Bashkatova Yu. V., Shakirova L. S., Filatov M. A. Neural Network Technologies in System Synthesis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1047. P. 012099.
7. Филатова О. Е., Хадарцева К. А., Филатова Д. Ю., Живаева Н. В. Биофизика сложных систем – complexity // Вестн. новых мед. технологий. 2016. Т. 23, № 2. С. 9–17.
8. Григоренко В. В. Обработка кардиографической информации на основе стохастического и хаотического подходов // Вестник НГИЭИ. 2019. № 4 (95). С. 78–88.
9. Vokhmina Yu. V., Eskov V. M., Gavrilenko T. V., Filatova O. E. Measuring Order Parameters Based on Neural Network Technologies // Measurement Techniques. 2015. Vol. 58. P. 462–466.
10. Аль-Хулейди Н. А. Система обработки и нейросетевого анализа биоэлектрических сигналов для решения задач медицинской диагностики : дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2014. 150 с.
11. Антипов О. И., Нагорная М. Ю. Показатель Херста биоэлектрических сигналов // Инфокоммуникационные технологии. 2011. № 1 (9). С. 75–77.
12. Хачатрян К. С., Манило Л. А. Метод анализа псевдофазового портрета в задаче распознавания биомедицинских сигналов // Биотехносфера. 2016. № 5 (47). С. 14–18.
13. Physiological Basis of Heart Rate Variability (HRV). URL: https://www.vitalscan.com/dt_hrv1.html (дата обращения: 03.06.2022).
14. Старченкова К. С., Манило Л. А. Оценка энтропии ритмограмм для разных видов сердечных аритмий // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы : сб. тр. XXXII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2019. С. 206–209.
1. Chempalova L. S., Yakhno T. A., Manina E. A., Ignatenko A. P., Orazbaeva Zh. A. W. Weaver Hypothesis in Voluntary and Involuntary Movement's Studying // Journal of New Medical Technologies. 2021. Vol. 28, No. 1. P. 75–77. (In Russian).
2. Grigorenko V. V., Eskov V. M., Filatov M. A., Pavlyk A. V. New Information Technologies in the Analysis of Electroencephalograms // J Phys: Conf Ser. 2020. Vol. 1679. P. 032081.
3. Grigorenko V. V., Eskov V. M., Nazina N. B., Egorov A. A. Information-Analytical System of Cardiographic Information Functional Diagnostics // J Phys: Conf Ser. 2020. Vol. 1515. P. 052027.
4. Eskov V. M., Eskov V. V., Gavrilenko T. V., Vokhmina Yu. V. Formalization of the Effect of "Repetition without Repetition" Discovered by N. A. Bernshtein // Biophysics. 2017. Vol. 62, No. 1. P. 168–176. (In Russian).
5. Filatova O. E., Rusak S. N., Maystrenko E. V., Dobrynina I. Yu. Aging Dynamics of Cardiovascular System Parameters of the Russian North Citizen // Slozhnost. Razum. Postneklassika. 2016. No. 2. P. 40–49. (In Russian).
6. Filatova O. E., Bashkatova Yu. V., Shakirova L. S., Filatov M. A. Neural Network Technologies in System Synthesis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1047. P. 012099.
7. Filatova O. E., Khadartseva K. A., Filatova D. Yu., Zhivaeva N. V. Biophysics of Complex Systems – Complexity // Journal of New Medical Technologies. 2016. Vol. 23, No. 2. P. 9–17. (In Russian).
8. Grigorenko V. V. Processing of Cardiographic Information on the Basis of Stochastic and Chaotic Approaches // Bulletin NGIEI. 2019. No. 4 (95). P. 78–88. (In Russian).
9. Vokhmina Yu. V., Eskov V. M., Gavrilenko T. V., Filatova O. E. Measuring Order Parameters Based on Neural Network Technologies // Measurement Techniques. 2015. Vol. 58. P. 462–466.
10. Al-Khuleydi N. A. Sistema obrabotki i neurosetevogo analiza bioelektricheskikh signalov dlia resheniia zadach meditsinskoi diagnostiki : Cand. Sci. Dissertation (Engineering). Vladimir, 2014. 150 p. (In Russian).
11. Antipov O. I., Nagornaya M. Yu. Bioelectric Signal Hurst Index // Infokommunikatsionnye tekhnologii. 2011. No. 1 (9). P. 75–77. (In Russian).
12. Khachatryan K. S., Manilo L. A. The Method of Analysis Pseudophase Portrait in the Problem of Recognition of Biomedical Signals // Biotekhnosfera. 2016. No. 5 (47). P. 14–18. (In Russian).
13. Physiological Basis of Heart Rate Variability (HRV). URL: https://www.vitalscan.com/dt_hrv1.html (accessed: 03.06.2022).
14. Starchenkova K. S., Manilo L. A. Estimation of Entropy of Rhythmograms for Different Types of Cardiac Arrhythmias // Biotekhnicheskie, meditsinskie i ekologicheskie sistemy, izmeritelnye ustroystva i robototekhnicheskie komplekсы : Proceedings of the XXXII All-Russian Scientific and

15. Беспалов А. В., Поляхов Н. Д., Якупов О. Э. Алгоритм оценки первого показателя Ляпунова по временному ряду // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. 2010. Т. 1. С. 151–155.
16. Поляхов Н. Д., Беспалов А. В. Сравнительный анализ методов оценки первого показателя Ляпунова // Современ. проблемы науки и образования. 2012. № 6. С. 7.
- Engineering Conference of Students, Young Scientists and Specialists. Ryazan, 2019. P. 206–209. (In Russian).
15. Bespalov A. V., Polyakhov N. D., Yakupov O. E. Algoritm otsenki pervogo pokazatelya Lyapunova po vremennomu riadu // International Conference on Soft Computing and Measurement. 2010. Vol. 1. P. 151–155. (In Russian).
16. Polyakhov N. D., Bespalov A. V. Comparative Analysis of First Lyapunov Exponent Estimation Methods // Modern Problems of Science and Education. 2012. No. 6. P. 7. (In Russian).

Информация об авторах

В. В. Григоренко – старший преподаватель.
Н. Б. Назина – доцент.

Information about the authors

V. V. Grigorenko – Senior Lecturer.
N. B. Nazina – Associate Professor.