

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENTATION,
METROLOGY AND
INFORMATION-
MEASURING DEVICES
AND SYSTEMS

УДК 612.014.08:519.24

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-4-63-72

Вейвлет-интроскопия биосетей организма человека^{*}

Г. М. АЛДОНИН^а, В. В. ЧЕРЕПАНОВ^б

660041, РФ, г. Красноярск, ул. Куренского, 28, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Институт инженерной физики и радиоэлектроники

^а GAldonin@sfu-kras.ru ^б VCherepanov@sfu-kras.ru

В отечественной и зарубежной практике накоплен большой опыт создания средств мониторинга функционального состояния организма человека. Существующие комплексы в основном проводят анализ электрокардиограммы, артериального давления и ряда других физиологических параметров. Диагностика часто строится на основе формальных статистических данных, не всегда корректных в силу нестационарности биопроецессов и без учета их физической природы.

Актуальной задачей мониторинга состояния сердечно-сосудистой системы является создание эффективных алгоритмов компьютерных технологий обработки биосигналов на основе нелинейных динамических моделей систем организма, поскольку биосистемы и биопроецессы имеют нелинейный характер и фрактальную структуру. Примеры подобных структур – нервная и мышечная системы сердца, сосудистая и бронхиальная системы организма человека. Связь систем организма с их организацией в виде самоподобных фрактальных структур со скейлингом, близким к «золотому сечению», делает возможной их топическую диагностику.

Получение детальной информации о состоянии биосетей организма человека для топической диагностики возможно на основе вейвлет-анализа биосигналов (так называемой вейвлет-интроскопии). С помощью вейвлет-преобразования можно выявить структуру биосистем и биопроецессов как картину линий локальных экстремумов вейвлет-диаграмм биосигналов. Математические модели и программные средства вейвлет-интроскопии позволяют извлекать дополнительную информацию из биосигналов о состоянии биосистем. Раннее обнаружение латентных форм заболеваний с помощью вейвлет-интроскопии позволяет сократить сроки излечения и уменьшить последствия нарушений функционального состояния организма, снизить риск наступления инвалидности.

Учет факторов организации биосистем организма в виде самоподобных фрактальных структур со скейлингом, близким к «золотому сечению», делает возможным создание методики топической диагностики важнейших биосистем организма человека.

^{*} Статья получена 06 апреля 2021 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (грант проект № 19-37-90072).

Ключевые слова: электрокардиограмма, фотоплетизмограмма, самоорганизация, самоподобие, фракталы, скейлинг, автоволны, солитон, n -мерный тор, КАМ-теорема, ФПУ-теорема «возврата», топическая диагностика

ВВЕДЕНИЕ

Раннее обнаружение латентных форм заболеваний с помощью индивидуального мониторинга функционального состояния организма (ФСО) позволяет сократить сроки излечения и уменьшить последствия нарушений ФСО, снизить риск наступления инвалидности. Инфаркт и инсульт могут быть первыми и иногда последними предупреждениями о заболевании, так как сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) зачастую протекают бессимптомно, а наиболее эффективный способ борьбы с заболеваниями – это своевременная диагностика и профилактика. Уровень развития технического прогресса позволяет создавать всё более совершенные средства диагностики ФСО [1, 2].

Учет факторов организации биосистем организма в виде самоподобных фрактальных структур со скейлингом, близким к «золотому сечению», делает возможным создание методики топической диагностики важнейших биосистем организма человека.

Поскольку деятельность организма, как самоорганизующейся системы, представляет собой нелинейные процессы, то для мониторинга состояния сердечной деятельности (СД) необходима разработка физически и физиологически адекватных нелинейных моделей СД и аппаратно-программных средств (АПС) диагностики организма с помощью вейвлет-анализа биосигналов.

Природные процессы, в том числе и биосистемы, имеют циклический характер. Морфогенез биосистем организма подчиняется общим законам самоорганизации в виде фрактальных структур с масштабно-инвариантным самоподобием [3] на основе которых строятся нелинейные модели проводящей нервной системы сердца (ПНСС) и сосудистой системы человека. Одно из применений синергетического подхода – анализ физической и физиологической природы электрических процессов в важнейшей биосистеме – ПНСС.

ВЕЙВЛЕТ-ИНТРОСКОПИЯ

В последнее время в кардиологии развиваются методы топической диагностики СД [4]. В работе исследована возможность топической диагностики состояния биосистем фрактальных структур биосигналов с масштабно-инвариантным самоподобием на основе вейвлет-интроскопии. Вейвлет-диаграммы биосигналов отражают фрактальные масштабно-инвариантные структуры со скейлингом, близким к «золотому сечению» [5]. В ренормгрупповом подходе скелетные функции вейвлет-преобразования выявляют структуру анализируемого процесса, а скейлинги (Sc) – масштабную инвариантность или их самоподобие. Одним из применений синергетического подхода является анализ физической и физиологической природы электрических процессов в важнейшей биосистеме – ПНСС.

Германом Гельмгольцем с учениками еще в 1850 году установлена форма нервного импульса и его распространение в виде уединенной волны колоколообразной формы [6] (в современном понимании солитон), подобной частице, движущаяся с постоянной скоростью. Волна возбуждения в виде солитона распространяется от водителя ритма вначале в правое и затем в левое предсердие, достигая атриовентрикулярного (А-В) узла. Затем волна распространяется по межжелудочковой перегородке через пучок Гиса, проходит по

правой и левой ножкам пучка Гиса и разветвляется по волокнам Пуркинье на миокарде левого и правого желудочков, вызывая их сокращение.

Для определения структурных свойств биосигналов и биопроцессов эффективно применение вейвлет-анализа, которое заключается в разложении одномерного сигнала по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами солитоноподобной функции (вейвлета) посредством масштабных изменений и переносов [7].

При распространении волн возбуждения по ПНСС, имеющей самоподобную фрактальную структуру, в узлах ветвления формируются сети турбулентности за счет изменения сечения ветвей нервов по закону Фибоначчи. Эти турбулентности формируют спектр ЭКС, причем вейвлет-спектр отражает топологию ПНСС (помечены окружностями на рис. 1, а). То же самое характерно для сосудистой сети (рис. 1, б), для бронхиальной и других биосистем.

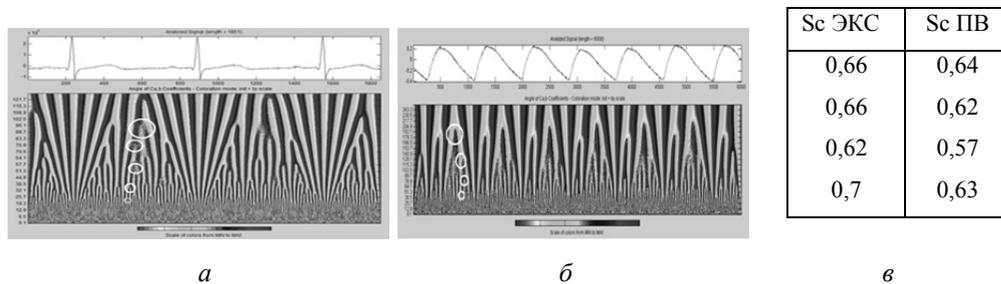


Рис. 1. Фазовые вейвлет-спектры ЭКС (а), ПВ (б) и их скейлинги (в)

Fig. 1. Phase wavelet spectra of EKS (a), PW (b) and their scaling (c)

В ходе исследования использовались различные материнские вейвлеты, из которых наиболее адекватными солитоноподобным волнам в ПНСС являются базисные вейвлеты «Солитон» и «Мексиканская шляпа» (рис. 2).

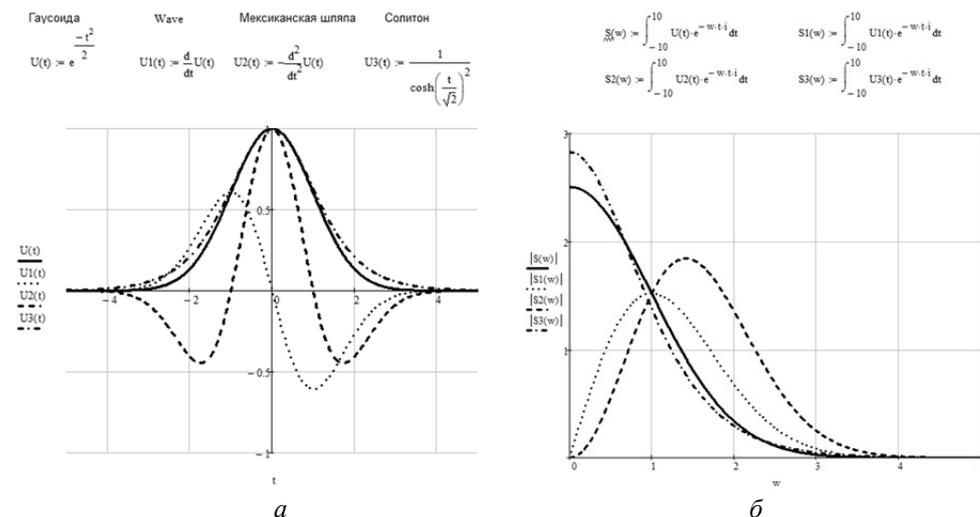


Рис. 2. Сравнительные характеристики базисных вейвлетов (а) и их спектров (б)

Fig. 2. Comparative characteristics of basic wavelets (a) and their spectra (b)

Одним из критериев базисных вейвлетов в литературе рассматривается равенство нулю среднего значения функции (рис. 3). Среди представленных этому критерию не соответствует солитон. Однако при вейвлет-преобразовании биосигналов со спектром $1/f$ это не влияет на его информативность потому, что область низких частот биосигналов не содержит информации о топологии биосетей и не используется при анализе их структуры.

Нулевое среднее = 0	Ограниченность $< \infty$		Конечная норма функции $< \infty$			
$\int_{-\infty}^{\infty} W(t) dt = 2.507$	$\int_{-\infty}^{\infty} W1(t) dt = 0$	$\int_{-\infty}^{\infty} (W(t))^2 dt = 1.772$	$\int_{-\infty}^{\infty} (W1(t))^2 dt = 0.886$	$\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} W(t)^2 dt} = 1.331$	$\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} W1(t)^2 dt} = 0.941$	
$\int_{-\infty}^{\infty} W3(t) dt = 7.811 \times 10^{-12}$	$\int_{-\infty}^{\infty} W4(t) dt = 2$	$\int_{-\infty}^{\infty} (W3(t))^2 dt = 1.329$	$\int_{-\infty}^{\infty} (W4(t))^2 dt = 1.333$	$\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} W3(t)^2 dt} = 1.153$	$\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} W4(t)^2 dt} = 1.155$	

Рис. 3. Проверка на соответствие критериям базисных вейвлетов

Fig. 3. Check for compliance with the criteria for basic wavelets

Достоинством вейвлет-спектров ЭКС является их представление в частотной и временной области, т. е. содержит пространственно-временную информацию о работе ПНСС (рис. 4), что может служить основой для топической диагностики биосетей [8].

Частота и мощность электрофлуктуаций ЭКС соответствуют топологии ПНСС. Двигаясь по ветвям сети, импульс возбуждения формирует максимальные флуктуации сигнала от больших ветвей русла сети к гармонически уменьшающимся по длине и возрастающим по частоте ее ветвей. Дробление сети приводит в той же зависимости к падению по мощности флуктуаций ЭКС, дробящегося по закону $1/f$, формируя гармонический спектр вида $1/f$.

В частности, в вейвлет-диаграммах для кардиокомплекса PQRST выявляются его латентные компоненты [9–11].

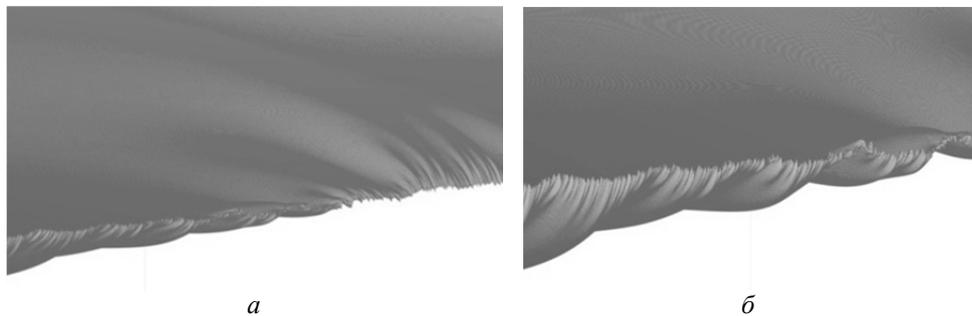


Рис. 4. Экспериментальная запись возбуждения области пейсмейкера (а) и предсердной области ПНСС (б)

Fig. 4. Experimental recording of excitation of the pacemaker area (a) and atrial CNSH area (b)

Например, структура P -волны наблюдается как сумма отдельных волн возбуждений в нервных ветвях правого и левого предсердий (рис. 5, а) с точными амплитудно-временными параметрами распространения возбуждения в этой нервной сети.

Фрактальные структуры в ветвящихся биосетях с масштабно-инвариантным самоподобием можно формализовать моделью в виде деревьев Кейли [12]. Учитывая, что электрический потенциал охватывается возбуждением прежде всего правое предсердие, в котором находится синусовый узел, можно говорить о его более короткой ветвистой структуре. Это отражено в модели уменьшением длины одной из ветвистых структур (рис. 5, б).

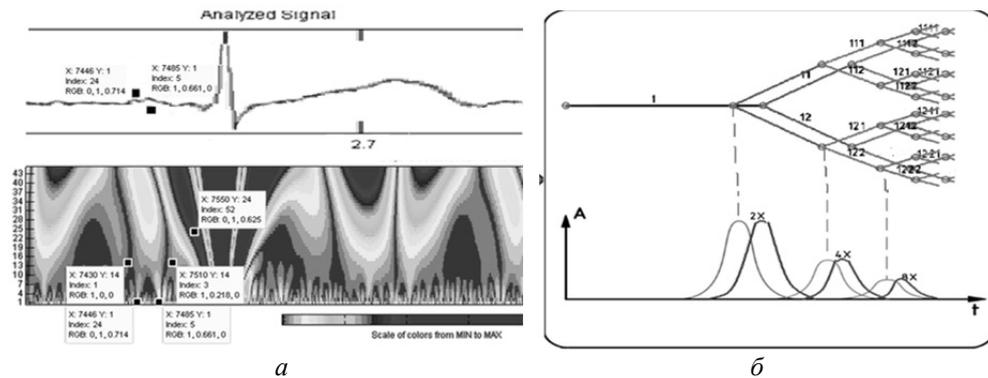


Рис. 5. Вейвлет-диаграмма ЭКС в ПНСС в правом и левом предсердиях (а), представление ветвистой структуры ПНСС в правом и левом предсердиях в виде деревьев Кейли (б)

Fig. 5. Wavelet diagram of the pacemaker in the CNSH in the right and left atrium (a), representation of the branching structure of the CNSH in the right and left atrium in the form of Keiley-trees (b)

Дополнительно проявляются волны возбуждения в пучке Бахмана и нисходящем пучке к межпредсердной перегородке к А-В-узлу (рис. 6, а-г). Выявление узлов биосетей по вейвлет-диаграмме биосигналов возможно визуальным исследованием вейвлет-диаграммы.

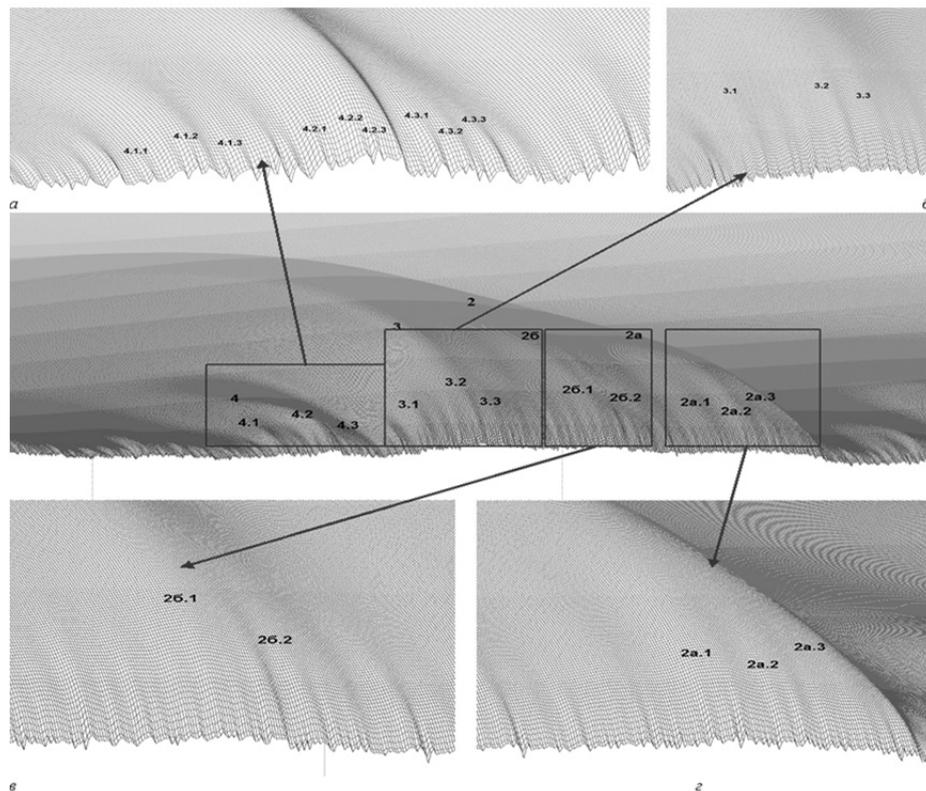


Рис. 6. Волны возбуждения в левом (а) и правом (б) предсердиях, пучке Бахмана (в) и нисходящем пучке к межпредсердной перегородке А-В-узла (г)

Fig. 6. Excitation waves in the left (a) and right (b) atria, Bachmann's bundle (c) and the descending bundle to the atrial septum of the AV node (d)

Анализ выявления узлов биосетей по вейвлет-диаграмме биосигналов возможен визуальным исследованием вейвлет-диаграммы ЭКС [13, 14]. Сопоставляя узлы ПНСС и соответствующие по фазе и времени волны спектра ЭКС на вейвлет-диаграмме, можно получить латентную ЭКГ, отображающую весь процесс прохождения возбуждения от пейсмейкера в виде солитонов по всем сегментам ПНСС.

В смежных тактах кардиоцикла можно предположить «пережимаемость» возбуждения волокон Пуркинье. На рис. 7, *a* и *б* показано суммарное отображение трех последовательных *P*-волн электрокардосигналов (выделены разным цветом) в вейвлет-диаграмме без патологии и после инфаркта и инсульта при работе кардиостимулятора.

На рис. 7, *в* представлены три совмещенных полных смежных *PQRST*-комплекса.

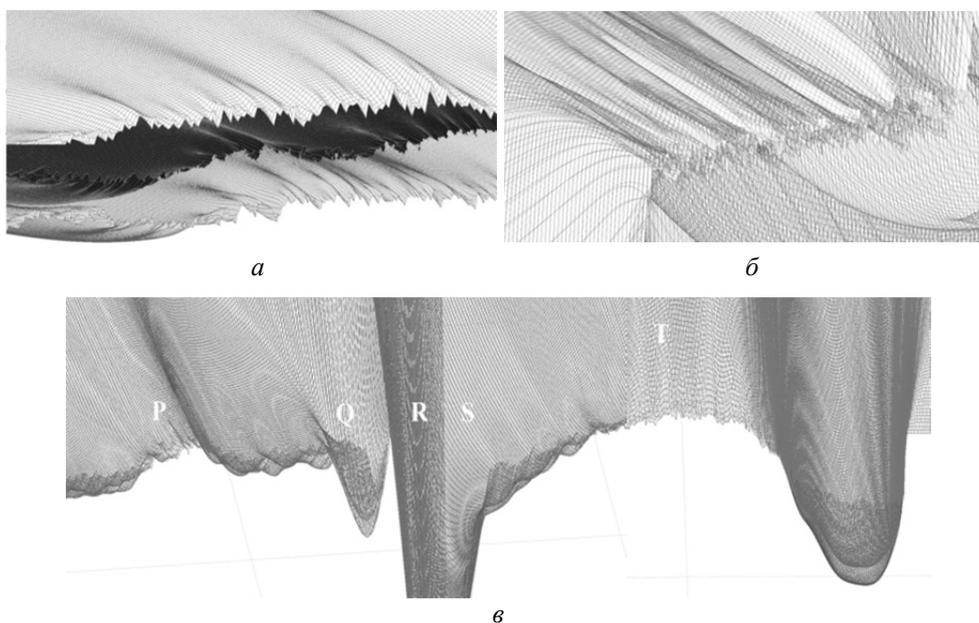


Рис. 7. Отображение трех последовательных *P*-волн электрокардосигналов суммарно (выделены разными оттенками) в вейвлет-диаграмме в норме (*a*) и после инфаркта (*б*), совмещение вейвлет-диаграмм *PQRST*-волн трех смежных ЭКС кардиоциклов (*в*)

Fig. 7. Visual display of 3 consecutive *P*-waves of electrocardiosignals in total (highlighted in different colors) in the wavelet diagram in the norm (*a*) and after a heart attack (*b*), the combination of the *PQRST* wavelet diagrams of three adjacent pacemaker cardiac cycles (*c*)

Также можно применить вейвлет-интроскопию для топической диагностики сосудистой системы (рис. 8) [15]. На рис. 8 представлен пример вейвлет-интроскопии с помощью вейвлет-преобразования экспериментального сигнала ПВ при прохождении по сонной артерии и выявление узлов ветвления сосудистой сети. Сигнал ПВ получен с помощью фотоплетизмографического датчика, установленного на мочке уха.

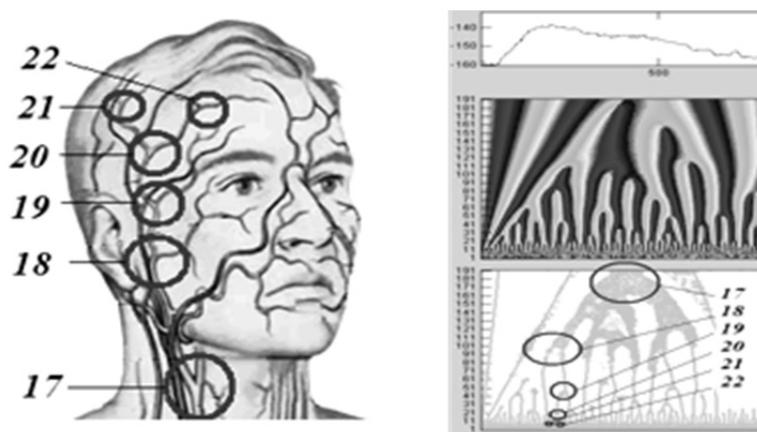


Рис. 8. Вейвлет-диаграмма правосторонней сонной артерии и выявление узлов ветвления сосудов

Fig. 8. Wavelet diagram of the right-sided carotid artery and identification of vascular branching nodes

Такая же технология вейвлет-интроскопии может применяться для анализа фонокардиосигнала и сигнала системы дыхания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая масштабно-инвариантную фрактальную структуру биосистем с самоподобием вида $1/f$ (признак наличия в них структурных связей), являющуюся критерием структурной устойчивости биосистем и критерием их нормы, можно выявлять скрытые эффекты в структуре биосистем. Это дает общую теоретико-прикладную основу разработки методов и средств структурного анализа биосигналов на основе вейвлет-интроскопии.

Методы структурного анализа на основе вейвлет-преобразования биосигналов являются методической основой для достоверного описания и топической диагностики биосистем. Математические модели и программные средства вейвлет-интроскопии позволяют извлекать дополнительную информацию из биосигналов о состоянии биосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Национальные российские рекомендации по применению методики холтеровского мониторинга в клинической практике и спортивной медицине // Труды Российского национального конгресса кардиологов. – СПб., 2013. – 190 с.
2. Романец И.А., Атопков В.А., Гурия Г.Т. Топологические основы классификации электрокардиограмм // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – Т. 4, № 4. – С. 895–915.
3. Мандельброт Б.Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Ин-т компьютер. исслед., 2002. – 660 с.
4. Неинвазивное активационное картирование сердца // Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В. Вишневского: web-сайт. – URL: <https://www.vishnevskogo.ru/patients/diagnostika/neinvazivnoe-aktivatsionnoe-kartirovanie-serdtsa> (дата обращения: 02.12.2021).

5. *Тимашев С.Ф.* Фликкер-шум и числовые последовательности Фибоначчи // Журнал физической химии. – 1995. – Т. 69, № 12.
6. *Гельмгольц Г.* Скорость распространения нервного возбуждения. – М.: ГИЗ, 1923. – 90 с.
7. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145–1170. – DOI: 10.3367/UFNr.0166.199611a.1145.
8. *Урицкий В.М., Музалевская Н.И.* Фрактальные структуры и процессы в биологии // Биомедицинская информатика и эниология (проблемы, результаты, перспективы) / под ред. Р.И. Полонникова, Г.К. Короткова. – СПб.: Ольга, 1995. – С. 84–129.
9. Патент 2633347 Российская Федерация. Способ регистрации латентной электрокардиограммы всех разделов четырехкамерного сердца и устройство для его осуществления / Г.М. Алдонин, В.Н. Моргун, А.В. Солдатов. – № 2015135732; заявл. 24.08.2015; опубл. 11.10.2017, Бюл. № 29.
10. Detection of prior myocardial infarction patients prone to malignant ventricular arrhythmias using wavelet transform analysis / K. Yodogawa, T. Ohara, H. Takayama, Y. Seino, T. Katoh, K. Mizuno // International Heart Journal. – 2011. – Vol. 52, N 5. – P. 286–289. – DOI: 10.1536/ihj.52.286.
11. *Солдатов А.В., Алдонин Г.М., Черепанов В.В.* Вейвлет-анализ электрической активности сердца // МЕДТЕХ-2017: 19-я научно-техническая конференция. – Греция, 2017. – С. 28–35.
12. *Олемской А.И., Флат А.А.* Использование концепции фракталов в физике конденсированной среды // Успехи физических наук. – 1993. – Т. 163, № 12. – С. 1–50. – DOI: 10.3367/UFNr.0163.199312a.0001.
13. *Алдонин Г.М., Солдатов А., Черепанов В.В.* Вейвлет-анализ биосигналов // МЕДТЕХ-2018: 20-я научно-техническая конференция. – Ламеция, Италия, 2018.
14. *Алдонин Г.М., Черепанов В.В.* Моделирование электрокардиосигнала и экспериментальная вейвлет-интроскопия проводящей нервной сети сердца // МЕДТЕХ-2019: 21-я научно-техническая конференция. – Пелопоннес, Греция, 2019.
15. Патент 2723763 Российская Федерация. Способ вейвлет-интроскопии сосудистой сети кровеносного русла / Г.М. Алдонин, В.В. Черепанов. – № 2019108517/14; заявл. 25.03.2019; опубл. 17.06.2020, Бюл. № 17.

Алдонин Геннадий Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Приборостроение и наноэлектроника» Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета. E-mail: GAldonin@sfu-kras.ru

Черепанов Василий Викторович, аспирант кафедры «Приборостроение и наноэлектроника» Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета. E-mail: VCherepanov@sfu-kras.ru

Aldonin Gennady M., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Instrument making and Nanoelectronics in the Institute of Engineering Physics and Radioelectronics of the Siberian Federal University. E-mail: GAldonin@sfu-kras.ru

Cherepanov Vasily V., a postgraduate student at the department of instrument making and nanoelectronics" in the Institute of Engineering Physics and Radioelectronics of the Siberian Federal University. E-mail: VCherepanov@sfu-kras.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-4-63-72

Wavelet introscopy of human organism bionets*G.M. ALDONIN^a, V.V. CHEREPANOV^b*Siberian Federal University, School of Engineering Physics and Radio Electronics, 79 Svo-bodny Prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation*^a *GAldonin@sfu-kras.ru* ^b *VCherepanov@sfu-kras.ru***Abstract**

In domestic and foreign practice, a great deal of experience has been accumulated in the creation of means for monitoring the functional state of the human body. The existing complexes mainly analyze the electrocardiogram, blood pressure and a number of other physiological parameters. Diagnostics is often based on formal statistical data which are not always correct due to the nonstationarity of bioprocesses and without taking into account their physical nature.

An urgent task of monitoring the state of the cardiovascular system is the creation of effective algorithms for computer technologies to process biosignals based on nonlinear dynamic models of body systems since biosystems and bioprocesses have a nonlinear nature and fractal structure. The nervous and muscular systems of the heart, the vascular and bronchial systems of the human body are examples of such structures. The connection of body systems with their organization in the form of self-similar fractal structures with scaling close to the "golden ratio" makes it possible to diagnose them topically.

It is possible to obtain detailed information about the state of the human body's bio-networks for topical diagnostics on the basis of the wavelet analysis of biosignals (the so-called wavelet-introscopy). With the help of wavelet transform, it is possible to reveal the structure of biosystems and bioprocesses, as a picture of the lines of local extrema of wavelet diagrams of biosignals. Mathematical models and software for wavelet introscopy make it possible to extract additional information from biosignals about the state of biosystems. Early detection of latent forms of diseases using wavelet introscopy can shorten the cure time and reduce the consequences of disorders of the functional state of the body (FSO), and reduce the risk of disability.

Taking into account the factors of organizing the body's biosystems in the form of self-similar fractal structures with a scaling close to the "golden ratio" makes it possible to create a technique for topical diagnostics of the most important biosystems of the human body.

Keywords: electrocardiogram, photoplethysmogram, self-organization, self-similarity, fractals, scaling, autowaves, soliton, n -dimensional torus, KAM-theorem, FPU-theorem of "return", topical diagnostics

REFERENCES

1. Natsional'nye rossiiskie rekomendatsii po primeneniyu metodiki kholterovskogo monitorirovaniya v klinicheskoi praktike i sportivnoi meditsine [National Russian guidelines for the application of the Holter monitoring technique in clinical practice and sports medicine]. *Trudy Rossiiskogo natsional'nogo kongressa kardiologov* [Proceedings of the Russian national congress of cardiologists]. St. Petersburg, 2013. 190 p.
2. Romanets I.A., Atopkov V.A., Guria G.T. Topologicheskie osnovy klassifikatsii elektrokardiogrammm [Topological basis of ECG classification]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie = Computer Research and Modeling*, 2012, vol. 4, no. 4, pp. 895–915.
3. Mandelbrot B.B. *The fractal geometry of nature*. New York, Freeman, 1977 (Russ. ed.: Mandel'brot B.B. *Fraktal'naya geometriya prirody*. Moscow, Institute of Computer Sciences Publ., 2002. 660 p.).

* Received 06 April 2021.

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (grant project No. 19-37-90072).

4. Neinvazivnoe aktivatsionnoe kartirovanie serdtsa [Non-invasive activation mapping of the heart]. *Natsional'nyi meditsinskii issledovatel'skii tsentr khirurgii im. A.V. Vishnevskogo* [National Medical Research Center of Surgery named after A. Vishnevsky]: website. Available at: <https://www.vishnevskogo.ru/patients/diagnostika/neinvazivnoe-aktivatsionnoe-kartirovanie-serdtsa> (accessed 02.12.2021).

5. Timashev S.F. Flikker-shum i chislovye posledovatel'nosti Fibonachchi [Flicker noise and the Fibonacci numerical sequences]. *Zhurnal fizicheskoi khimii = Russian Journal of Physical Chemistry A*, 1995, vol. 69, no. 12. (In Russian).

6. Helmholtz H. *Skorost' rasprostraneniya nervnogo vzbuzhdeniya* [The rate of spread of nervous excitement]. Moscow, GIZ Publ., 1923. 90 p. (In Russian).

7. Astaf'eva N.M. Veivlet-analiz: osnovy teorii i primery primeneniya [Wavelet analysis: basic theory and some applications]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi*, 1996, vol. 166, no. 11, pp. 1145–1170. DOI: 10.3367/UFNr.0166.199611a.1145. (In Russian).

8. Urtskii V.M. Muzalevskaya N.I. Fraktal'nye struktury i protsessy v biologii [Fractal structures and processes in biology]. *Biomeditsinskaya informatika i eniologiya (problemy, rezul'taty, perspektivy)* [Biomedical informatics and eniology (problems, results, perspectives)]. St. Petersburg, Olga Publ., 1995, pp. 84–129.

9. Aldonin G.M., Morgun V.N., Soldatov A.V. *Sposob registratsii latentnoi elektrokardiogrammy vsekhn razdelov chetyrekhkammerenogo serdtsa i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for registration of latent electrocardiogram of all sections of fourchamber heart and device for its implementation]. Patent RF, no. 2633347, 2017.

10. Yodogawa K., Ohara T., Takayama H., Seino Y., Katoh T., Mizuno K. Detection of prior myocardial infarction patients prone to malignant ventricular arrhythmias using wavelet transform analysis. *International Heart Journal*, 2011, vol. 52, no. 5, pp. 286–289. DOI: 10.1536/ihj.52.286.

11. Soldatov A.V., Aldonin G.M., Cherepanov V.V. [Wavelet analysis of the electrical activity of the heart]. *MEDTEKh-2017: 19-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* [MEDTECH-2017: 19th scientific and technical conference], Thasos, Greece, 2017, pp. 28–35. (In Russian).

12. Olemskoi A.I., Flat A.Ya. Ispol'zovanie kontseptsii fraktalov v fizike kondensirovannoi sredy [Application of fractals in condensed-matter physics]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi*, 1993, vol. 163, no. 12, pp. 1–50. DOI: 10.3367/UFNr.0163.199312a.0001. (In Russian).

13. Aldonin G.M., Soldatov A., Cherepanov V.V. [Wavelet analysis of biosignals]. *MEDTEKh-2018: 20-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* [MEDTECH-2018: 20th scientific and technical conference], Lamezia, Italy, 2018. (In Russian).

14. Aldonin G.M., Cherepanov V.V. [Modeling of the electrocardiosignal and experimental wavelet introscopy of the conductive nervous network of the heart]. *MEDTEKh-2019: 21-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* [MEDTECH-2019: 21st scientific and technical conference], Peloponnese, Greece, 2019. (In Russian).

15. Aldonin G.M., Cherepanov V.V. *Sposob veivlet-introskopii sosudistoi seti krovenosnogo rusla* [Method of wavelet-introscopy of vascular network of blood channel]. Patent RF, no. 2723763, 2020.

Для цитирования:

Алдонин Г.М., Черепанов В.В. Вейвлет-интроскопия биосетей организма человека // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 4 (84). – С. 63–72. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-4-63-72.

For citation:

Aldonin G.M., Cherepanov V.V. Veivlet-introskopiya biosetei organizma cheloveka [Wavelet introscopy of human organism bionets]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 4 (84), pp. 63–72. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-4-63-72.